

**Análisis del impacto de las energías renovables en la sostenibilidad del sector transporte en
Colombia**

James Donaldo Alfaro Viana

Asesora

Angélica Robayo Avendaño

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI
Ingeniería Industrial

2026

Resumen

El cambio hacia fuentes de energía renovables en Colombia es un asunto que necesita ser atendido para reducir el consumo de combustibles fósiles y su efecto en el cambio climático. Reconocer los obstáculos más significativos que impiden la adopción de fuentes de energía renovables en el ámbito del transporte en Colombia y qué estrategias pueden potenciar su integración para una movilidad sostenible. Es así, que el propósito de este trabajo será examinar cómo las energías renovables afectan el sector de transporte en Colombia, evaluando los beneficios económicos y ambientales, enfocándose en la reducción de emisiones y la sostenibilidad. Para ello, se consultarán temas de política energética en Colombia en el sector transporte, economía de las energías renovables, tecnología de vehículos eléctricos e híbridos y la experiencia internacional del sector con su implementación.

En este sentido, la metodología consistirá en revisar y analizar bibliográficamente información sobre el uso de energías renovables aplicadas en el sector transporte colombiano, con el fin de identificar oportunidades y debilidades que permitan comprender su impacto en la sostenibilidad del sistema de transporte nacional y formular recomendaciones que orienten políticas públicas y privadas hacia un modelo de movilidad más limpio, eficiente y responsable con el ambiente.

Palabras clave: Energías renovables, Movilidad sostenible, Sostenibilidad, Transporte, Transición energética.

Abstract

The shift towards renewable energy sources in Colombia is an issue that needs to be addressed to reduce fossil fuel consumption and its impact on climate change. Identifying the most significant obstacles hindering the adoption of renewable energy sources in the Colombian transportation sector and determining strategies to enhance their integration for sustainable mobility. Therefore, the purpose of this work is to examine how renewable energy affects the transportation sector in Colombia, evaluating the economic and environmental benefits, with a focus on emissions reduction and sustainability. To this end, the study will explore topics such as energy policy in Colombia's transportation sector, the economics of renewable energy, electric and hybrid vehicle technology, and international experiences in the sector with their implementation.

In this sense, the methodology will consist of reviewing and analyzing bibliographic information on the use of renewable energies applied in the Colombian transport sector, in order to identify opportunities and weaknesses that allow understanding their impact on the sustainability of the national transport system and formulate recommendations that guide public and private policies towards a cleaner, more efficient and environmentally responsible mobility model.

Keywords: Renewable energy, Sustainable mobility, Sustainability, Transport, Energy transition.

Tabla de Contenido

Introducción	9
Justificación	11
Objetivos.....	13
Objetivo General.....	13
Objetivos Específicos	13
Planteamiento del Problema	14
Marco Conceptual.....	16
Fuentes de Energía.....	16
Tipos de Fuentes de Energía.....	16
Energía Renovable.....	16
Energías no Renovables.....	17
Fuentes de Energía Renovables que se Pueden Usar en Colombia.....	18
Energía Solar	18
Energía Eólica.....	18
Energía Hidroeléctrica	18
Energía Biomasa.....	19
Marco Teórico.....	20
Metodología	24
Enfoque de la Investigación	24
Tipo de Estudio.....	24
Procedimiento Metodológico	25
Criterios de Selección de la Información	30

Alcance y Limitaciones del Estudio	30
Capítulos de la Monografía.....	31
Análisis de los Tipos de Energías Renovables Implementadas en Colombia y su Aplicación en el Sector Transporte.....	31
Marco Científico Global	33
Dinámica del Parque Automotor y su Relación con la Demanda Energética	35
Ineficiencias Estructurales en el Uso Energético del Transporte Actual.....	38
Desacople entre Generación Eléctrica Renovable y Demanda Final	41
Factores Determinantes del Impacto de las Energías Renovables en la Sostenibilidad del Transporte	48
Políticas Públicas y Marco Normativo para la Sostenibilidad del Transporte	54
Estado Actual del Impacto Ambiental y Social en el Sector Transporte.....	58
Análisis Tecnológico-Ambiental	59
Impactos Sociales y de Gobernanza: Aspectos Clave	63
Panorama Actual y Contribución Estratégica de los Biocombustibles	69
Estudio de Casos Relevantes	72
Barreras y Oportunidades Para la Adopción de Energías Renovables en el Sector Transporte	78
Barreras Energéticas y Estructurales (Impacto Alto)	78
Barreras Tecnológicas e Infraestructura (Impacto Alto)	79
Barreras Institucionales, Normativas y de Gobernanza (Impacto Alto).....	79
Barreras Económicas (Impacto Medio)	80
Barreras Territoriales y Sociales (Impacto Derivado)	80
Propuesta de Estrategias Orientadas a Fortalecer el Uso de Energías Renovables	83

Estrategia 1: Consolidar y Escalar el Uso de Biocombustibles Como Pilar de Descarbonización.....	84
Estrategia 2: Reorientar la Expansión Solar y Eólica Hacia la Electrificación del Transporte	86
Estrategia 3: Priorizar la Electrificación del Transporte Público y Urbano de Carga	88
Estrategia 4: Gestionar el Rol de la Energía Hidroeléctrica Como Fuente de Respaldo.....	92
Estrategia 5: Rediseñar Instrumentos de Mercado y Planificación Energética	93
Fase 1: Estabilización y Alianzas Estratégicas (Corto Plazo)	95
Fase 2: Infraestructura Híbrida y Descentralización (Mediano Plazo).....	96
Fase 3: Consolidación y Normalización del Ecosistema (Largo Plazo).....	98
Conclusiones	104
Referencias Bibliográficas	106

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Consumo de energía por tipo de transporte (%)</i>	35
Figura 2 <i>Comparación entre la matriz de demanda energética final y la matriz de generación eléctrica en Colombia (2024)</i>	42
Figura 3 <i>Emisiones de CO2</i>	46
Figura 4 <i>Estrategias orientadas al fortalecimiento de energías renovables</i>	84
Figura 5 <i>Roadmap de Implementación Táctica</i>	95

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Relación entre fases metodológicas y objetivos específicos</i>	25
Tabla 2 <i>Ineficiencias estructurales del sector transporte colombiano</i>	39
Tabla 3 <i>Principales instrumentos normativos</i>	54
Tabla 4 <i>Indicadores ambientales clave del sector transporte relevantes para la transición energética</i>	62
Tabla 5 <i>Principales desafíos de gobernanza en la transición energética del transporte</i>	68
Tabla 6 <i>Casos representativos de proyectos de energías renovables</i>	73
Tabla 7 <i>Síntesis y priorización de barreras para la adopción de energías renovables en el sector transporte colombiano</i>	81
Tabla 8 <i>Matriz estrategia–problema–impacto esperado para la transición energética del transporte en Colombia</i>	99
Tabla 9 <i>Indicadores de seguimiento para las estrategias de fortalecimiento del uso de energías renovables en el transporte</i>	101

Introducción

En el contexto actual de crisis climática mundial, la transición hacia fuentes de energía sin carbono se ha consolidado como un eje fundamental del desarrollo sostenible. En Colombia, el sector transporte representa uno de los principales desafíos para el cumplimiento de los compromisos derivados del Acuerdo de París, al concentrar aproximadamente el 35 % del consumo energético nacional y depender en más del 96 % de combustibles fósiles. Esta dependencia estructural incide directamente en el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, la baja eficiencia energética y la vulnerabilidad del sistema frente a la volatilidad de los mercados energéticos internacionales.

En este escenario, el presente estudio analiza la incorporación de energías renovables en el sector transporte colombiano, considerando el potencial energético diverso del país, que incluye el desarrollo eólico en La Guajira, la generación hidroeléctrica en departamentos como Antioquia y Huila y el papel estratégico de los biocombustibles en regiones como el Valle del Cauca y los Llanos Orientales. No obstante, el despliegue de estas alternativas se enfrenta a barreras relevantes, como limitaciones económicas, rezagos en infraestructura, debilidades institucionales y conflictos socioambientales asociados al uso del suelo y a la gobernanza territorial, que restringen su integración efectiva en el sistema de movilidad.

A pesar de los avances normativos y tecnológicos, persiste una brecha de conocimiento en el análisis integrado del impacto real de las energías renovables en la sostenibilidad del sector transporte en Colombia. La literatura existente se ha centrado principalmente en la generación eléctrica o en tecnologías abordadas de forma aislada, sin evaluar su interacción con la demanda del transporte ni el desacople entre la generación renovable y el consumo final.

Frente a esta brecha, la presente monografía contribuye con un análisis sistemático del impacto de las energías renovables y propone directrices estratégicas orientadas a fortalecer su integración en un modelo de movilidad más limpio, eficiente y resiliente, alineado con los objetivos nacionales de transición energética y neutralidad de carbono al año 2050.

Justificación

Frenar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) constituye uno de los principales retos del desarrollo sostenible contemporáneo. En este contexto, el sector transporte adquiere un papel estratégico dada su elevada dependencia de combustibles fósiles y su aporte significativo a la contaminación atmosférica y a las emisiones de GEI en Colombia. La adopción de opciones de transporte limpias y sostenibles, como los vehículos eléctricos (EV), vehículos híbridos (HEV) y, en fases iniciales, vehículos impulsados por hidrógeno, representa una alternativa relevante para mitigar dichos impactos y avanzar hacia un sistema energético más eficiente y resiliente.

Desde una perspectiva ambiental y económica, la incorporación de energías renovables en el transporte permitiría reducir de manera significativa las emisiones asociadas a la combustión de hidrocarburos y diversificar la matriz energética nacional, disminuyendo la dependencia de fuentes no renovables. En este sentido, Colombia cuenta con ventajas comparativas importantes derivadas de su ubicación geográfica y su biodiversidad, que le otorgan un alto potencial para el aprovechamiento de fuentes como la energía solar, eólica, hídrica y la biomasa. No obstante, la transición hacia estas fuentes exige un análisis riguroso de las tecnologías disponibles y de sus implicaciones técnicas, económicas y ambientales, tal como lo señala Agudelo (2017), quien destaca la necesidad de evaluar integralmente las alternativas energéticas limpias como condición para una implementación eficiente y sostenible.

Desde una dimensión social, la transformación del transporte hacia modelos energéticos más limpios incide directamente en la calidad de vida de la población, particularmente en áreas urbanas donde la contaminación del aire afecta de forma desproporcionada a los grupos más vulnerables. Asimismo, el impulso a tecnologías limpias puede contribuir a la generación de

empleo, al fortalecimiento de capacidades técnicas y a la dinamización de cadenas productivas asociadas a las energías renovables, incluyendo la agroindustria de los biocombustibles.

Desde un enfoque territorial, Colombia presenta profundas diferencias regionales en términos de disponibilidad de recursos, infraestructura y dinámicas socioeconómicas. Regiones como el Valle del Cauca, los Llanos Orientales, Antioquia y Huila concentran oportunidades estratégicas para el desarrollo de energías renovables aplicadas al transporte, pero también enfrentan retos relacionados con el uso del suelo, los impactos ambientales y la gobernanza territorial. Analizar estas particularidades resulta fundamental para evitar soluciones homogéneas y promover estrategias coherentes con las realidades locales.

Desde la formación en Ingeniería Industrial, esta monografía aporta una visión sistémica orientada a la eficiencia, la optimización de recursos y la gestión integral de procesos energéticos, consolidando un análisis crítico que articula dimensiones técnicas, sociales y territoriales. En consecuencia, el estudio no solo presenta relevancia teórica, sino que ofrece insumos estratégicos para la formulación de políticas públicas y decisiones sectoriales orientadas a una transición energética del transporte más equitativa, eficiente y sostenible.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el impacto de las energías renovables en la sostenibilidad del sector transporte, para la promoción de prácticas que impulsen su desarrollo eficiente y sostenible en Colombia

Objetivos Específicos

Analizar los tipos de energías renovables implementadas en Colombia y su grado de aplicación en el sector transporte, con el fin de comprender su viabilidad técnica, así como su impacto en la movilidad y eficiencia operativa.

Realizar una revisión exhaustiva del impacto ambiental y social de las energías renovables en Colombia para comprender sus efectos sobre la sostenibilidad del sector transporte

Identificar las barreras y oportunidades para la adopción de energías renovables en el contexto colombiano.

Proponer estrategias orientadas a fortalecer el uso de energías renovables en el transporte, alineadas con el análisis del contexto colombiano y las políticas actuales de transición energética.

Planteamiento del Problema

Colombia ha mostrado avances importantes en la adopción de energías limpias, impulsados en parte por la Ley 1715 de 2014, que establece el marco legal para la promoción y el uso de fuentes no convencionales de energía renovable. No obstante, dichos avances se han concentrado principalmente en el ámbito de la generación eléctrica, mientras que sectores estratégicos como el transporte continúan enfrentando rezagos significativos en su transición hacia un modelo energético sostenible. En efecto, “la generación de energía eléctrica depende especialmente de las fuentes hídricas, las cuales representan aproximadamente el 68 % de la capacidad instalada del sistema eléctrico nacional” (Corficolombiana, 2021), situación que contrasta con la baja penetración de energías limpias en el consumo energético final del transporte.

En Colombia, “el sector transporte es el mayor consumidor de energía del país, representando cerca del 35 % del consumo energético total y dependiendo en un 96 % de combustibles fósiles como diésel y gasolina” (Fundación para la Conservación y Desarrollo Sostenible, 2023). Esta elevada dependencia fósil se traduce en una presión significativa sobre el sistema energético y en un alto impacto ambiental, dado que el transporte constituye uno de los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). De acuerdo con el Ministerio de Transporte (2024), el sector aporta aproximadamente el 12,5 % de las emisiones nacionales de GEI y concentra la mayor parte de la contaminación atmosférica urbana, especialmente en las principales áreas metropolitanas.

A pesar del potencial que ofrecen alternativas como la electromovilidad, el hidrógeno verde y los biocombustibles, su adopción en Colombia sigue siendo limitada. En 2021, el consumo energético del transporte alcanzó aproximadamente 518 PJ, de los cuales más del 90 %

correspondieron a productos derivados del petróleo, mientras que la participación de la electricidad y los biocombustibles fue marginal (IEA, 2023). Esta situación evidencia un desacople estructural entre el crecimiento de la generación eléctrica renovable y su aprovechamiento efectivo en el sector transporte.

Adicionalmente, persisten barreras económicas, institucionales y normativas que dificultan la integración de energías renovables en el sistema de movilidad, entre las que se destacan la limitada infraestructura de recarga, los altos costos de inversión inicial en tecnologías limpias y la escasa articulación entre políticas energéticas y de transporte (Trujillo, 2023, p. 44). En consecuencia, la transición energética del transporte colombiano no puede abordarse únicamente desde una perspectiva tecnológica, sino que requiere un análisis integral que considere sus implicaciones ambientales, sociales y económicas.

En este contexto, resulta necesario evaluar de manera sistemática el estado actual de las energías renovables en el sector transporte colombiano, identificar las barreras y oportunidades que condicionan su adopción y proponer estrategias que permitan fortalecer su integración, en coherencia con las políticas nacionales de sostenibilidad y transición energética.

Pregunta Problema

¿Cuáles son los obstáculos que restringen la incorporación de energías limpias en el sector transporte en Colombia y qué estrategias pueden potenciar su integración para una movilidad sostenible?

Marco Conceptual

Las fuentes de energía se constituyen como un recurso indispensable para el crecimiento de cualquier país. Usualmente, se clasifican como renovables y no renovables. Aunque el carbón, el petróleo y el gas han sido históricamente las fuentes no renovables más utilizadas, su explotación ha generado impactos ambientales importantes a nivel local y global, lo que impulsa la necesidad de avanzar hacia alternativas más sostenibles.

Fuentes de Energía

Las fuentes de energía constituyen un recurso fundamental para el desarrollo económico y social, al facilitar el funcionamiento de las actividades productivas, los sistemas de transporte y los servicios esenciales. Desde una perspectiva analítica, la elección de una fuente energética no solo define el nivel de eficiencia de un sistema, sino también su impacto ambiental, su sostenibilidad a largo plazo y su dependencia de recursos externos.

En este sentido, el análisis de las fuentes de energía utilizadas en un país refleja su modelo de desarrollo, sus prioridades ambientales y su grado de innovación tecnológica. Como señalan Pereira y Turizo (2020), las fuentes renovables emergen como una alternativa estratégica frente al agotamiento de los combustibles fósiles y a sus efectos ambientales, mientras que las fuentes no renovables han mostrado limitaciones estructurales asociadas a su carácter finito y a sus altas emisiones contaminantes. Esta distinción resulta clave para evaluar el papel que desempeñan las fuentes energéticas en sectores intensivos en consumo, como el transporte.

Tipos de Fuentes de Energía

Energía Renovable

Se caracterizan por su capacidad de regeneración natural y por presentar bajas emisiones de gases de efecto invernadero, lo que las posiciona como un pilar fundamental en las estrategias de mitigación del cambio climático. Desde una perspectiva analítica, su relevancia radica no solo en su disponibilidad, sino en su potencial para reconfigurar los sistemas energéticos hacia modelos más descentralizados, resilientes y sostenibles.

En Colombia, estas fuentes adquieren un carácter estratégico ante la alta dependencia histórica de la energía hidroeléctrica para la generación eléctrica, lo que genera vulnerabilidades frente a fenómenos climáticos como El Niño. De acuerdo con la Unidad de Planeación Minero-Energética (2015), el aprovechamiento de fuentes renovables no convencionales permite diversificar la matriz energética y reducir riesgos sistémicos, lo cual resulta especialmente relevante para alimentar procesos como la electrificación del transporte.

Energías no Renovables

El carbón, el petróleo y el gas natural, han sido tradicionalmente utilizados para impulsar el desarrollo industrial y el transporte. Sin embargo, su uso intensivo ha generado impactos ambientales significativos, particularmente por las emisiones de gases de efecto invernadero y la degradación de ecosistemas.

En Colombia, persiste una alta dependencia de estas fuentes en sectores estratégicos, especialmente en el transporte, donde predominan los motores de combustión interna (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021). Desde un enfoque analítico, esta dependencia constituye una barrera estructural para la sostenibilidad energética, al reproducir patrones de consumo intensivos en carbono y limitar el avance hacia tecnologías más limpias.

Fuentes de Energía Renovables que se Pueden Usar en Colombia

Energía Solar

Representa una de las fuentes renovables con mayor potencial en Colombia, debido a su ubicación geográfica en la zona ecuatorial y a niveles de irradiación superiores al promedio mundial (ICEX, 2022). Desde una perspectiva analítica, su relevancia para el sector transporte se asocia a su capacidad de apoyar esquemas de generación distribuida, infraestructura de recarga para vehículos eléctricos y soluciones energéticas en zonas urbanas y no interconectadas.

No obstante, su variabilidad exige complementar su integración con sistemas de almacenamiento y con una planificación adecuada de la infraestructura energética, aspectos determinantes para su uso efectivo en la movilidad sostenible (Stacey, 2025).

Energía Eólica

Constituye una alternativa estratégica para la transición energética colombiana, especialmente en regiones como La Guajira, donde se registran vientos constantes con velocidades promedio elevadas. Según Diario La República (2024), el país proyecta una expansión significativa de su capacidad eólica, lo que representa una oportunidad para respaldar la demanda eléctrica asociada a la electrificación del transporte.

Desde una mirada analítica, su aprovechamiento implica desafíos relacionados con la gobernanza territorial, la aceptación social y la infraestructura de transmisión, factores que condicionan su aporte real a la sostenibilidad del sistema energético.

Energía Hidroeléctrica

Ha sido históricamente la principal fuente de generación eléctrica en Colombia, representando una alta proporción de la matriz energética nacional (Low Carbon Power, s.f.). Su rol analítico en el contexto del transporte radica en su función como fuente de respaldo para la

electrificación; sin embargo, su elevada dependencia de condiciones hidrológicas la hace vulnerable a la variabilidad climática.

Energía Biomasa

Se deriva de la transformación de materia orgánica y constituye una fuente renovable relevante para la producción de biocombustibles. Desde una perspectiva analítica, su importancia en el transporte colombiano radica en la posibilidad de reducir emisiones en flotas existentes sin requerir un reemplazo inmediato de infraestructura, especialmente en el transporte de carga y en zonas rurales (Rape, 2020).

No obstante, su sostenibilidad depende de una gestión adecuada del uso del suelo y de evitar conflictos con la seguridad alimentaria, por lo que su integración debe evaluarse de manera rigurosa dentro de la transición energética.

Marco Teórico

El panorama energético global se encuentra en una fase de transformación sin precedentes, motivado por la necesidad de luchar contra el cambio climático y garantizar un futuro sostenible. Es así, que la implementación de energías amigables emerge como una estrategia necesaria, demandando un análisis profundo y multidimensional que trascienda la mera descripción de tecnologías y políticas. Para comprender la complejidad de esta transición, es esencial recurrir a un marco teórico sólido y diversificado que se aborda a continuación:

Una de las ideas claves es la teoría de la sostenibilidad, también referida como Desarrollo Sostenible, la cual tiene como objetivo la satisfacción de necesidades actuales sin riesgo de satisfacer las de las nuevas generaciones. Esta idea se centra en tres conceptos clave, como el cuidado del medio ambiente para proteger los recursos naturales y prevenir la contaminación, el enfoque social, orientado a promover la equidad y asegurar que todas las personas puedan acceder a los recursos y oportunidades indispensables para llevar una vida digna, y económica que genere crecimiento y prosperidad para todos.

Aunado a lo anterior, las políticas energéticas orientadas a reducir emisiones deben simultáneamente promover la equidad social y garantizar la viabilidad económica de las soluciones implementadas. En este sentido, Colombia enfrenta el desafío de articular su transición energética con transformaciones estructurales en áreas estratégicas como la movilidad, las cuales han sido identificadas como prioritarias para el desarrollo sostenible (Radar Económico Internacional, 2020).

Complementariamente, este estudio se fundamenta en la teoría del desarrollo energético, estrechamente vinculada a los enfoques de la economía ecológica propuestos por autores como Daly y Cobb, y reformulados por Hickel y Kallis (2019). Estas corrientes critican el paradigma

del crecimiento económico ilimitado y plantean la necesidad de que los sistemas productivos y energéticos operen dentro de los límites biofísicos del planeta.

Desde este marco teórico, la transición energética del transporte no puede evaluarse únicamente en términos de eficiencia económica o reducción de costos, sino en función de su capacidad para disminuir la presión sobre los ecosistemas, redistribuir beneficios y fortalecer la justicia intergeneracional. Así, la electrificación del transporte y el uso de energías renovables adquieren sentido como instrumentos para reconfigurar la relación entre economía, energía y naturaleza.

En relación con la implementación de energías renovables, este proceso conlleva la adopción de tecnologías limpias y la disminución de las emisiones de carbono, como también el nacimiento de empleos verdes y la inclusión social en las comunidades afectadas por la industria energética tradicional, en línea con esta visión, Colombia ha tomado decisiones claras mediante las CDN para el lapso 2020-2030, en las que se incluyen tres elementos esenciales: 1) la reducción de los gases de efecto invernadero, 2) el ajuste ante el cambio climático y 3) las estrategias para llevar a cabo políticas que promuevan el desarrollo con menor huella de carbono (Eirin et al., 2022).

Otro componente central es la teoría de la transición sociotécnica, la cual concibe los cambios en los sistemas energéticos como procesos no lineales que emergen de la interacción entre distintos niveles: el paisaje sociotécnico, los regímenes dominantes y los nichos de innovación. Esta teoría resulta especialmente pertinente para analizar el sector transporte colombiano, donde conviven tecnologías tradicionales basadas en combustibles fósiles con innovaciones como la movilidad eléctrica y los biocombustibles avanzados.

Autores como Köhler et al. (2019) amplían este enfoque al integrar dimensiones de gobernanza, justicia social y cambio climático, resaltando que las transiciones energéticas no son neutras, sino procesos profundamente políticos. En el contexto colombiano, esta perspectiva permite comprender cómo las presiones internacionales, las políticas públicas y los actores locales interactúan para acelerar o ralentizar la adopción de energías renovables en el transporte (Wuppertal Institute, 2023; Ministerio de Minas y Energía, 2025).

Por otro lado, la Teoría de la Innovación Disruptiva, describe explica cómo soluciones inicialmente percibidas como costosas o marginales pueden transformar mercados dominados por tecnologías convencionales. En el sector energético, la energía solar, eólica y la generación distribuida han seguido este patrón, pasando de ser opciones incipientes para convertirse en alternativas competitivas (IRENA, 2021).

Este enfoque dialoga con la transición del transporte hacia vehículos eléctricos e híbridos, cuyas mejoras tecnológicas y reducciones de costos han ampliado progresivamente su adopción. En Colombia, esta dinámica se observa en el crecimiento de proyectos solares y eólicos, especialmente en departamentos como La Guajira y el Valle del Cauca, lo que refuerza su potencial para apoyar la electrificación del transporte (Ollivier et al., 2024).

Añadido a lo anterior, se halla la Teoría de la Resiliencia Climática, la cual adquiere especial relevancia en el sector energético, dado el incremento de fenómenos climáticos extremos que amenazan la estabilidad del suministro eléctrico. Desde esta postura, la resiliencia no se limita a contener impactos adversos, sino que implica la capacidad de reorganización, aprendizaje y adaptación frente a nuevas condiciones, tal como lo plantea Duchek (2020), quien describe la resiliencia organizacional como un proceso que abarca la anticipación de amenazas, el afrontamiento de eventos adversos y la adaptación mediante el aprendizaje y la

reorganización. En el contexto energético, esto se traduce en estrategias como la diversificación de fuentes, la descentralización de la generación, el fortalecimiento de infraestructuras críticas y la preparación de respuestas locales ante crisis como apagones o escasez hídrica.

Este enfoque resulta particularmente pertinente en países como Colombia, cuya alta dependencia de la energía hidroeléctrica lo hace vulnerable a fenómenos como El Niño, que históricamente han generado desabastecimiento eléctrico (Corficolombiana, 2021). Aplicar esta teoría permite, por tanto, no solo evaluar los niveles de vulnerabilidad del sistema energético, sino también diseñar medidas de adaptación sostenibles y robustas ante un escenario climático cada vez más incierto.

Finalmente, el análisis del ciclo de vida (ACV) constituye una herramienta metodológica fundamental para evaluar los impactos ambientales de las tecnologías energéticas a lo largo de toda su cadena de valor. Este enfoque permite comparar alternativas tecnológicas más allá de la fase de uso, incorporando variables como extracción de recursos, producción, operación y disposición final (Sonnemann et al., 2020; Baumann et al., 2021).

Integrado al principio de eficiencia energética promovido por la Unión Europea (2021), el ACV refuerza la necesidad de priorizar soluciones que reduzcan la demanda energética del transporte, optimicen el uso de recursos y minimicen impactos ambientales, consolidando una aproximación integral a la sostenibilidad del sistema de movilidad.

Metodología

Enfoque de la Investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cualitativo, dado que su propósito no es medir variables mediante herramientas estadísticas, sino analizar, interpretar y comprender el impacto de las energías renovables en la sostenibilidad del sector transporte en Colombia a partir de información secundaria. Este enfoque permite realizar una lectura crítica de los fenómenos energéticos, ambientales y sociales asociados a la transición energética del transporte, considerando su complejidad sistémica y su carácter multidimensional.

Asimismo, el estudio adopta un enfoque analítico–descriptivo, en tanto describe el estado actual del uso de energías renovables en el transporte colombiano y, de manera simultánea, analiza las interrelaciones entre tecnología, política pública, sostenibilidad ambiental y contexto territorial.

Vinculación con el objetivo general:

Este enfoque metodológico permite analizar el impacto de las energías renovables en la sostenibilidad del sector transporte, atendiendo dimensiones ambientales, económicas y sociales, tal como se establece en el objetivo general de la investigación.

Tipo de Estudio

El trabajo corresponde a una monografía de tipo documental, basada en la revisión sistemática y análisis crítico de fuentes secundarias. No se realiza trabajo de campo ni experimentación directa; en su lugar, se recurre a literatura académica, informes institucionales, normatividad nacional y estudios técnicos relevantes para el caso colombiano.

Este tipo de estudio resulta pertinente para evaluar procesos de transición energética, ya que permite integrar evidencia diversa y contrastar enfoques teóricos y empíricos provenientes de distintas disciplinas, como la ingeniería, la economía, la planificación energética y las ciencias ambientales.

Procedimiento Metodológico

El procedimiento metodológico se desarrolló en cuatro fases secuenciales, diseñadas para garantizar la trazabilidad entre los objetivos, el análisis realizado y los resultados obtenidos. La Tabla 1 presenta la relación explícita entre las fases metodológicas y los objetivos específicos de la investigación.

Tabla 1

Relación entre fases metodológicas y objetivos específicos

Fase metodológica	Actividad principal	Objetivo(s) específico(s) asociado(s)
Fase 1. Identificación y selección de fuentes	Búsqueda sistemática y recopilación de información	Objetivos específicos 1 y 2
Fase 2. Clasificación temática	Organización y categorización analítica de la información	Objetivos específicos 1 y 2
Fase 3. Análisis crítico y comparado	Contrastación de enfoques, datos y experiencias	Objetivo específico 3
Fase 4. Síntesis y formulación de estrategias	Integración de hallazgos y construcción de propuestas	Objetivo específico 4

Fase 1 - Identificación y selección de fuentes. Se realizó una búsqueda sistemática de información en bases de datos académicas y repositorios institucionales, priorizando los recursos disponibles a través de la Biblioteca Virtual de la UNAD, así como bases como Google Scholar, SciELO, ScienceDirect y SpringerLink. La búsqueda se realizó mediante el uso de palabras clave y combinaciones booleanas, tales como: energías renovables, transporte sostenible, electromovilidad, biocombustibles, transición energética y Colombia.

Adicionalmente, se consultaron informes de organismos nacionales e internacionales (UPME, Ministerio de Minas y Energía, IEA, OCDE, Fedebiocombustibles, entre otros), así como normativa vigente, con el fin de incorporar una visión institucional y de política pública.

Fase 2 - Clasificación temática de la información. Las fuentes recopiladas fueron organizadas mediante un proceso de clasificación temática, siguiendo criterios utilizados en revisiones sistemáticas y estudios de análisis documental, que recomiendan agrupar la información por categorías analíticas coherentes con los objetivos del estudio (Pereira & Turizo, 2020; Sonnemann et al., 2020). Las categorías definidas fueron:

- Tipos de energías renovables y aplicaciones en transporte
- Impactos ambientales y sociales
- Barreras económicas, normativas e institucionales
- Experiencias nacionales e internacionales
- Estrategias y políticas de transición energética

Esta clasificación permitió estructurar el análisis y asegurar coherencia entre el marco analítico y los objetivos planteados.

Fase 3 - Análisis crítico y comparado. En esta fase se llevó a cabo un análisis crítico, comparativo e integrador de la información previamente clasificada, con el propósito de

identificar patrones, relaciones causales, contradicciones y vacíos relevantes en la implementación de energías renovables en el sector transporte colombiano. El análisis no se limitó a una descripción de los hallazgos documentados, sino que buscó interpretar la información a la luz de los marcos conceptuales y teóricos definidos en el documento, así como de los objetivos específicos de la investigación.

Como primera actividad, se realizó una lectura analítica profunda de las fuentes seleccionadas, evaluando tanto sus aportes empíricos como sus enfoques metodológicos y supuestos subyacentes. Esta lectura permitió diferenciar entre evidencia técnica, argumentos normativos, análisis institucionales y estudios de caso, identificando el peso relativo de cada tipo de fuente en la comprensión del impacto de las energías renovables sobre la sostenibilidad del transporte.

Posteriormente, se ejecutó un proceso de comparación transversal, en el cual se contrastaron los resultados reportados por organismos internacionales, entidades gubernamentales, estudios académicos y experiencias territoriales concretas. Esta comparación se orientó a identificar coincidencias y divergencias en aspectos clave como: (i) la eficiencia energética del transporte, (ii) la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, (iii) la articulación entre generación eléctrica renovable y demanda final, y (iv) los efectos sociales y territoriales asociados a la implementación de proyectos energéticos.

Como tercera actividad, se realizó la identificación y sistematización de ineficiencias estructurales, particularmente aquellas relacionadas con el predominio de motores de combustión interna, la baja penetración de tecnologías eléctricas, el crecimiento sostenido del parque automotor y la limitada integración entre la matriz de generación eléctrica y el consumo energético del sector transporte. Este ejercicio permitió reconocer el desacople energético como

un hallazgo central del estudio, elemento que se convierte en eje articulador del análisis desarrollado.

De manera complementaria, se analizaron barreras y oportunidades desde una perspectiva multiescalar, considerando dimensiones tecnológicas, económicas, institucionales, sociales y territoriales. Para ello, se evaluó cómo las condiciones normativas, los marcos de política pública y los arreglos de gobernanza influyen en la viabilidad real de la transición energética del transporte, más allá del potencial técnico disponible. Esta aproximación permitió distinguir barreras de carácter estructural —aquellas que condicionan de manera persistente el sistema— de barreras derivadas o contextuales, facilitando su priorización analítica.

Finalmente, esta fase concluyó con una integración interpretativa de los hallazgos, en la que se articularon los resultados del análisis energético, ambiental, social y normativo. Dicha integración constituyó la base para la formulación de las matrices de síntesis y priorización, así como para la construcción de las estrategias propuestas. En este sentido, el análisis crítico y comparado permitió establecer una relación directa y trazable entre la evidencia documental analizada, los problemas estructurales identificados y las propuestas estratégicas formuladas.

Fase 4 - Síntesis y formulación de estrategias. La fase final del procedimiento metodológico estuvo orientada a la síntesis integradora de los hallazgos obtenidos en las fases precedentes y a la formulación de estrategias orientadas a fortalecer el uso de las energías renovables en el sector transporte colombiano. Esta fase cumplió la función de traducir el análisis técnico, socioambiental y normativo en propuestas estratégicas coherentes, evaluables y alineadas con los objetivos de la investigación.

Como primera actividad, se realizó una integración sistemática de los resultados obtenidos con el fin de identificar relaciones causales entre: (i) el desacople energético entre

oferta renovable y demanda del transporte, (ii) las ineficiencias estructurales del sistema de movilidad, (iii) los impactos ambientales y sociales diferenciales por territorio, y (iv) las barreras institucionales, económicas y de gobernanza que condicionan la transición energética. Esta integración permitió consolidar una visión global del fenómeno, evitando aproximaciones fragmentadas o exclusivamente tecnológicas.

Posteriormente, se desarrolló un ejercicio de jerarquización analítica, en el cual las barreras identificadas fueron priorizadas según su nivel de impacto (alto, medio o derivado) y su carácter estructural o condicionante. Este proceso facilitó distinguir los elementos que constituyen cuellos de botella sistémicos —como el desacople entre generación renovable y consumo del transporte, la limitada infraestructura de recarga y la fragmentación institucional— de aquellos que, si bien relevantes, dependen de la resolución de problemas estructurales más amplios. Dicho ejercicio se materializó en matrices de síntesis que permitieron visualizar de manera integrada problemas, oportunidades y puntos de intervención estratégica.

Como tercera actividad, se procedió a la formulación de estrategias, entendidas no como acciones aisladas, sino como líneas de intervención sistémicas derivadas directamente del diagnóstico. Cada estrategia fue concebida para responder simultáneamente a los objetivos específicos del estudio, a los hallazgos empíricos documentados y a las condiciones reales del contexto colombiano. En este sentido, las estrategias propuestas incorporan dimensiones energéticas, tecnológicas, económicas, institucionales, sociales y territoriales, garantizando coherencia con los principios del desarrollo sostenible y de la transición energética justa.

De manera complementaria, se diseñó una articulación explícita entre estrategias, problemas estructurales e impactos esperados, con el propósito de reforzar la trazabilidad analítica entre diagnóstico y propuesta. Este ejercicio permitió formular una matriz estrategia-

problema–impacto, que clarifica el alcance de cada estrategia y evita propuestas genéricas o desvinculadas de la evidencia analizada. Asimismo, se definieron indicadores de seguimiento asociados a cada estrategia, con el fin de dotarlas de un carácter evaluable y proyectarlas más allá del análisis conceptual.

Finalmente, esta fase concluyó con la estructuración de un esquema de implementación gradual, organizado en horizontes de corto, mediano y largo plazo, que reconoce las limitaciones técnicas, institucionales y territoriales del país. Este enfoque de implementación progresiva refuerza la viabilidad de las estrategias propuestas y permite visualizar la transición energética del transporte como un proceso acumulativo, adaptativo y dinámico, más que como una transformación inmediata o lineal.

Criterios de Selección de la Información

Las fuentes documentales fueron seleccionadas con base en los siguientes criterios:

- Pertinencia temática con los objetivos de la investigación
- Rigor académico y técnico
- Actualidad de la información (principalmente 2015–2025)
- Relevancia para el contexto colombiano
- Reconocimiento institucional o académico de las entidades emisoras

Alcance y Limitaciones del Estudio

El estudio se limita al análisis documental del sector transporte en Colombia y no contempla mediciones cuantitativas directas, modelaciones energéticas ni estudios de percepción social. No obstante, esta limitación se compensa con un análisis integral y estratégico que permite comprender el estado actual, los desafíos estructurales y las oportunidades de la transición energética en el transporte.

Capítulos de la Monografía

Análisis de los Tipos de Energías Renovables Implementadas en Colombia y su Aplicación en el Sector Transporte

En Colombia, las actividades asociadas al transporte generan una carga considerable de gases de efecto invernadero (GEI), posicionándolo como el segundo sector más contaminante con una participación aproximada del 12,5% de las emisiones nacionales. Esta cifra resulta preocupante si se considera que el 96% de la matriz energética del transporte aún está en manos de los combustibles fósiles, lo que evidencia una contradicción entre el crecimiento del sector y los compromisos ambientales asumidos por el país (Grupo Banco Mundial, 2023, pp. 4-6). En este contexto, las energías renovables se perfilan como una alternativa estratégica para disminuir la huella de carbono del transporte y avanzar hacia un modelo de movilidad más eficiente y sostenible.

En consonancia con la necesidad de reducir la huella ambiental del transporte, Colombia ha fortalecido su marco normativo orientado a la transición energética, mediante instrumentos como la Ley 1964 de 2019, que suscita el uso de vehículos eléctricos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019); la Ley 2099 de 2021, que impulsa la incorporación de energías renovables (Función Pública, 2021); y el documento CONPES 4075, que establece lineamientos estratégicos para dicha transición (Departamento Nacional de Planeación, 2022). No obstante, la implementación de estas políticas ha sido segregada y desigual en el sector transporte, lo cual ha restringido su efectividad en la incorporación de energías limpias.

Pese a ello, el país dispone de un alto potencial en energías renovables no convencionales (ERNC) que aún no ha sido aprovechado de manera significativa. Regiones como La Guajira ofrece irradiación solar entre 4 y 6,5 kWh/m²/día, vientos terrestres de 8 a 12 m/s a 80 m de

altura y vientos marinos de más de 15 m/s, lo que permite estimar un potencial eólico on-shore (en tierra firme) de ~ 25 GW. Además, los análisis sobre la matriz energética nacional identifican un potencial de generación basada en biomasa de hasta 15 GW y para sistemas hidroeléctricos de alrededor de 56 GW, reflejando cifras que representan recursos energéticos diversos más allá del viento y solar (Sagastume et al., 2025).

En este contexto, resulta pertinente analizar de manera integral cómo la incorporación de energías renovables no convencionales (ERNC) puede reconfigurar el sistema de movilidad en Colombia, considerando no solo la viabilidad técnica de las soluciones implementadas, sino también su incidencia real en la sostenibilidad ambiental, económica y social del sector transporte. Por lo cual, un estudio de esta naturaleza permitirá comprender el alcance transformador de las ERNC en la reducción de emisiones, la optimización de recursos y la promoción de un modelo de transporte coherente con los objetivos de transición energética del país.

Así mismo, aunque Colombia cuenta con un alto potencial en energías renovables, este aún no ha sido plenamente articulado con los programas de electrificación del transporte. Según la International Energy Agency (IEA), la demanda energética del sector transporte aumentó de manera constante hasta 2019, cuando alcanzó los 474 PJ, descendió a 409 PJ en 2020 por la pandemia de COVID-19 y volvió a subir hasta los 518 PJ en 2021. La mayor parte de esta demanda se cubre con derivados del petróleo, principalmente gasolina (49 %) y diésel (41 %), mientras que los biocarburantes representaron 6,2 % y el gas natural 4 % del consumo total de combustible del transporte en 2021 (IEA, 2023a, pp. 54-55).

A pesar de que la energía renovable representó el 29 % del consumo final de energía del país en 2021, su participación en el transporte es todavía mínima, evidenciando la falta de

integración entre el potencial renovable y la electrificación del transporte. No obstante, aún con la visión del Plan Nacional de Desarrollo de desplegar 2 GW de energías renovables para 2026 y al incremento de la participación de fuentes no convencionales hasta el 12 % de la matriz energética, no se han desarrollado planes regionales sólidos que conecten la capacidad instalada de generación renovable con una infraestructura nacional de transporte sostenible, limitando así el aprovechamiento efectivo de estas fuentes en el marco de la transición energética (IEA, 2023a, p. 73).

En conjunto, el análisis de los tipos de energías renovables implementadas en Colombia y su aplicación en el sector transporte evidencia que el desafío central no radica en la disponibilidad de recursos energéticos, sino en su integración efectiva al consumo final. A pesar de que el país presenta una matriz de generación eléctrica con alta participación de fuentes renovables, persiste un desacople estructural frente a la demanda energética del transporte, caracterizada por una dependencia casi absoluta de los combustibles fósiles. Este desfase constituye el principal cuello de botella de la transición energética del sector, al limitar el aprovechamiento real del potencial renovable existente y consolidar un modelo de movilidad intensivo en carbono e ineficiente desde el punto de vista energético.

Marco Científico Global

La transición hacia energías renovables en el transporte colombiano ha sido documentada por parte de organismos internacionales cuyos informes destacan el potencial del país, pero también las brechas significativas en su implementación:

En primer lugar, los datos aportados por la Estrategia Nacional de Transporte Sostenible y el Ministerio de Transporte (ministro de Minas y Energía, 2024, p. 75), revelan que este sector no solo es responsable del 12.5% de las emisiones nacionales de GEI, sino que, además, fue

responsable del 44,8% de las emisiones de CO₂ generadas para el año 2023. Dicha situación hace necesario establecer estrategias para el uso de energías renovables (IEA, 2023a). A esto se suma su marcada dependencia del transporte por carretera, que en 2018 concentró el 98,32% de las emisiones del sector. De manera paralela, el consumo energético del transporte terrestre aumentó de 309,422 TJ en 2006 a 543,846 TJ en 2021, de los cuales 392,670 TJ correspondieron al transporte de pasajeros, equivalente al 29,65% del consumo energético nacional en ese año.

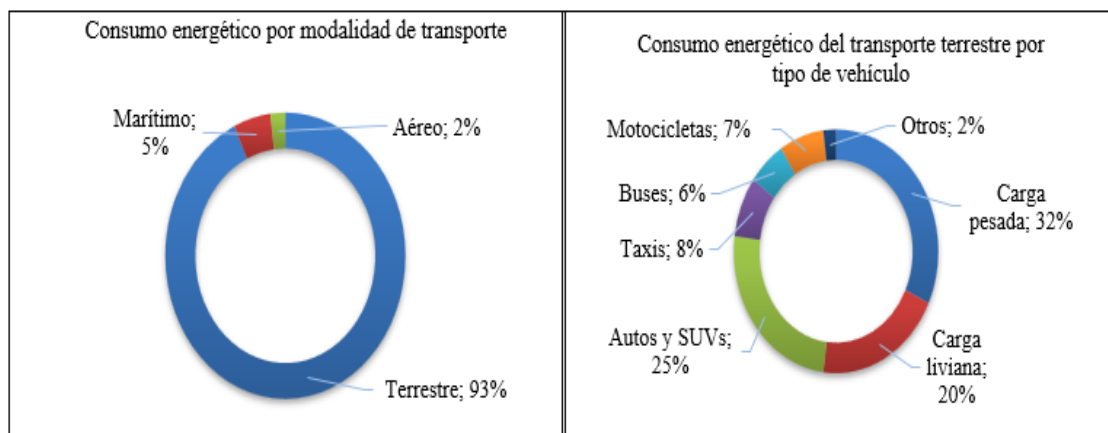
Por último, conforme a estadísticas dadas por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), alcanzó 646,977 TJ en 2023, manteniéndose como el principal consumidor del país, aunque con una reducción de -0,5 % respecto a 2022 (UPME, 2025).

Este panorama se refuerza con los datos más recientes del Ministerio de Minas y Energía (2024), que al desagregar el consumo energético del sector transporte por tipo de vehículo, muestran que el transporte terrestre representó el 94 % del total, confirmando su rol dominante. Dentro de este grupo, el transporte de carga pesada sobresale como el mayor consumidor energético, con una participación del 32 %.; en contraste, el transporte marítimo representó apenas el 5 %, y el transporte aéreo el 2 % restante (Figura 1). El transporte terrestre concentra casi la totalidad del consumo energético, lo que evidencia su alto impacto ambiental y su papel prioritario en cualquier estrategia de transición energética.

Con el fin de contextualizar la magnitud del consumo energético del sector transporte y su distribución por modalidad, la Figura 1 presenta la participación relativa del transporte terrestre, marítimo y aéreo en el consumo total de energía en Colombia.

Figura 1

Consumo de energía por tipo de transporte (%)



Fuente. Correlación entre la lectura y fuente bibliográfica del “*BALANCE ENERGÉTICO NACIONAL 2023*” por Ministerio de Minas y Energía, 2024, p. 33

El peso que tiene el transporte de carga pesada dentro de este grupo resalta la necesidad de enfocar las políticas de electrificación y sostenibilidad en este segmento, dada su alta demanda energética. En la Figura 1 se evidencia, además, que segmentos como taxis, buses y “otros” suman un 16 %, lo cual sugiere oportunidades de electrificación urbana más inmediata, dada su concentración en áreas metropolitanas.

Dinámica del Parque Automotor y su Relación con la Demanda Energética

El análisis del parque automotor en Colombia resulta fundamental para comprender la evolución del sector transporte y su impacto en la demanda energética nacional. En las últimas décadas, el aumento constante del número de vehículos ha incrementado el consumo de combustibles fósiles, especialmente en los entornos urbanos. Esta expansión vehicular plantea importantes desafíos para la sostenibilidad ambiental y la transición hacia fuentes de energía renovable. La alta participación de motocicletas y vehículos particulares refuerza una dependencia estructural de energéticos contaminantes, por lo cual, analizar esta tendencia

permite identificar los retos asociados al consumo actual y proyectar escenarios más sostenibles en alineación con el marco estratégico de la política energética.

Con base en la clasificación del informe del Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT, 2024), que el parque automotor registrado en Colombia asciende a 19.861.831 vehículos, de ese total, 7.309.991 unidades ($\approx 37\%$) corresponden a “vehículos” —es decir automóviles, camionetas, buses, camiones y similares—, de las cuales 6.173.242 son particulares, 1.046.217 son de uso público, y 90.532 pertenecen a otros servicios. A tal efecto, este dato contrasta con el predominio de las motocicletas, pues suman 12.332.882 unidades ($\approx 62\%$ del total) (RUNT, 2024).

Según el balance del sector generado por el RUNT (2025), esta tendencia de expansión no solo se mantuvo, sino que se acentuó, dado que el parque automotor colombiano cerró 2024 con 19.972.482 vehículos activos, siendo las motocicletas el tipo predominante con 12.417.740 unidades registradas, lo que confirma su papel central en la motorización del país. Asimismo, los vehículos alcanzaron los 7.334.873 registros, mientras que, en términos de flota, la maquinaria, los remolques y los semirremolques concentraron 219.869 unidades.

Este crecimiento del parque automotor tiene implicaciones directas sobre la demanda energética del transporte. Según la UPME (2025), la Proyección de Demanda de Combustibles Líquidos 2024–2040 evidencia que el consumo de gasolina, diésel y otros combustibles dependerá en gran medida del comportamiento del transporte carretero. Esto implica que, si no se introducen transformaciones tecnológicas significativas o políticas públicas orientadas a mejorar la eficiencia energética y a promover tecnologías más limpias, la demanda continuará en ascenso. En otras palabras, el sector transporte podría consolidarse como uno de los principales impulsores del incremento en el uso de combustibles fósiles, perpetuando las presiones sobre la

seguridad energética y las metas climáticas del país. De allí surge la importancia de implementar medidas que permitan desacoplar el crecimiento del parque automotor del aumento proporcional en el consumo energético.

Por otra parte, el Plan Energético Nacional (PEN) 2020–2050 plantea escenarios de largo plazo donde la diversificación de la matriz energética, el impulso a la eficiencia y la incorporación de tecnologías limpias se vuelven pilares esenciales para cumplir los compromisos ambientales y fortalecer la sostenibilidad del sistema energético colombiano. Dicho plan no solo reconoce los retos asociados al incremento en la demanda del transporte, sino que también propone rutas de acción para integrar energías renovables, promover la electrificación del transporte y reducir progresivamente la dependencia de derivados del petróleo. En este marco, el PEN destaca la necesidad de una transición ordenada que articule innovación, infraestructura y regulación para garantizar que el país avance hacia un modelo energético más resiliente y bajo en carbono.

En cuanto a políticas institucionales, Colombia cuenta con la Política Nacional de Movilidad Urbana y Regional (CONPES 3991, 2020), la cual establece lineamientos clave sobre transporte público, gestión de emisiones, reducción de la contaminación, seguridad vial y mecanismos de financiamiento. Estos elementos tienen un papel determinante en la disminución del consumo energético del transporte, en la medida en que orientan a las ciudades y regiones hacia sistemas más integrados, eficientes y sostenibles. Además, la política contempla instrumentos que pueden facilitar la adopción de tecnologías de bajas emisiones, mejorar la calidad del aire y promover alternativas de movilidad que reduzcan la dependencia del vehículo particular y, con ello, la presión sobre los combustibles fósiles. En conjunto, esta política se articula con los planes energéticos de largo plazo y con la agenda nacional de descarbonización,

configurándose como una pieza fundamental en la transición hacia un sistema de transporte más moderno, equitativo y ambientalmente responsable.

Ineficiencias Estructurales en el Uso Energético del Transporte Actual

El sector transporte en Colombia presenta profundas ineficiencias estructurales en el uso de energía, tanto por el tipo de tecnologías predominantes como por el modelo de movilidad vigente. A pesar de los esfuerzos normativos y avances puntuales en materia de transición energética, el sistema de transporte continúa articulado en torno a una matriz fósil, lo que limita su eficiencia operativa y su sostenibilidad ambiental (IEA, 2023a; UPME, 2025).

En primer lugar, el parque automotor colombiano está dominado por vehículos con motores de combustión interna, que operan principalmente con gasolina y diésel, los cuales presentan rendimientos energéticos significativamente bajos frente a tecnologías eléctricas. Según cifras del informe de la Federación Nacional de Comerciantes (FENALCO) y la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI), basadas en los registros del Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT), la flota de vehículos eléctricos correspondía al 4,7 % del total de inscripciones vehiculares nuevas en julio de 2024, mientras que los vehículos híbridos alcanzaron una participación del 21 %. Asimismo, entre enero y julio de 2024 se registraron 3.178 vehículos eléctricos y 20.640 híbridos, lo que representa crecimientos del 73,6 % y 41,6 %, respectivamente, frente al mismo periodo de 2023 (Fenalco & Andi, 2024; ANDEMOS, 2025).

Estas cifras evidencian un progreso revelador en la adopción de tecnologías más sostenibles en el parque automotor del país. No obstante, estos avances aún contrastan con la baja penetración acumulada de tecnologías limpias en el parque automotor total del país. Esta desproporción pone en evidencia una alta dependencia de tecnologías basadas en combustibles

fósiles, lo que se materializa en un elevado consumo energético por unidad de transporte movilizadora y en mayores emisiones contaminantes.

A partir del análisis del parque automotor y de la matriz energética del transporte, se identifican diversas ineficiencias estructurales que limitan la sostenibilidad del sistema. En este contexto, la Tabla 2 sintetiza las principales ineficiencias en términos tecnológicos, energéticos e infraestructurales, así como sus consecuencias sobre la sostenibilidad del sector.

Tabla 2

Ineficiencias estructurales del sector transporte colombiano

Dimensión analizada	Situación actual en Colombia	Evidencia del análisis desarrollado	Consecuencia para la sostenibilidad
		Flota vehicular	
Tecnología vehicular predominante	Predominio de motores de combustión interna	basada mayoritariamente en diésel y gasolina; baja penetración de vehículos eléctricos e híbridos	Altas pérdidas energéticas (superiores al 50 %) y elevadas emisiones de GEI
		Consumo	
Matriz energética del transporte	Dependencia fósil cercana al 96 %	energético del transporte cubierto casi en su totalidad por derivados del petróleo	Reproducción de un modelo de movilidad intensivo en carbono

Dimensión analizada	Situación actual en Colombia	Evidencia del análisis desarrollado	Consecuencia para la sostenibilidad
Eficiencia energética del sistema	Baja eficiencia del uso final de la energía	Conversión ineficiente frente a tecnologías de tracción eléctrica	Mayor consumo energético por unidad transportada
Crecimiento del parque automotor	Expansión sostenida de vehículos particulares y motocicletas	Incremento de la demanda energética y de la congestión urbana	Presión creciente sobre el consumo de combustibles fósiles
Electrificación del transporte	Bajo nivel de adopción	Participación marginal de la electricidad en el consumo energético del transporte	Subutilización del potencial de generación eléctrica renovable
Infraestructura energética	Infraestructura de recarga insuficiente y concentrada	Déficit de puntos de recarga y cobertura territorial limitada	Barrera estructural para la masificación de vehículos eléctricos

Fuente: Elaboración a partir del análisis del Balance Energético Nacional, RUNT, UPME e IEA.

Desacople entre Generación Eléctrica Renovable y Demanda Final

La comprensión de la matriz energética nacional es fundamental para evaluar la viabilidad y coherencia de la transición hacia un sistema sostenible. Aunque la estructura de generación eléctrica presenta una alta participación de fuentes renovables, especialmente hidroeléctricas, persiste una fuerte dependencia de combustibles fósiles en la demanda energética final, con especial incidencia en los sectores transporte, industrial y residencial (UPME, 2024, pp.6-9-10). Esta disonancia evidencia un desfase estructural entre la oferta energética limpia y los patrones de consumo, lo cual constituye un obstáculo relevante frente a los compromisos climáticos asumidos por el país.

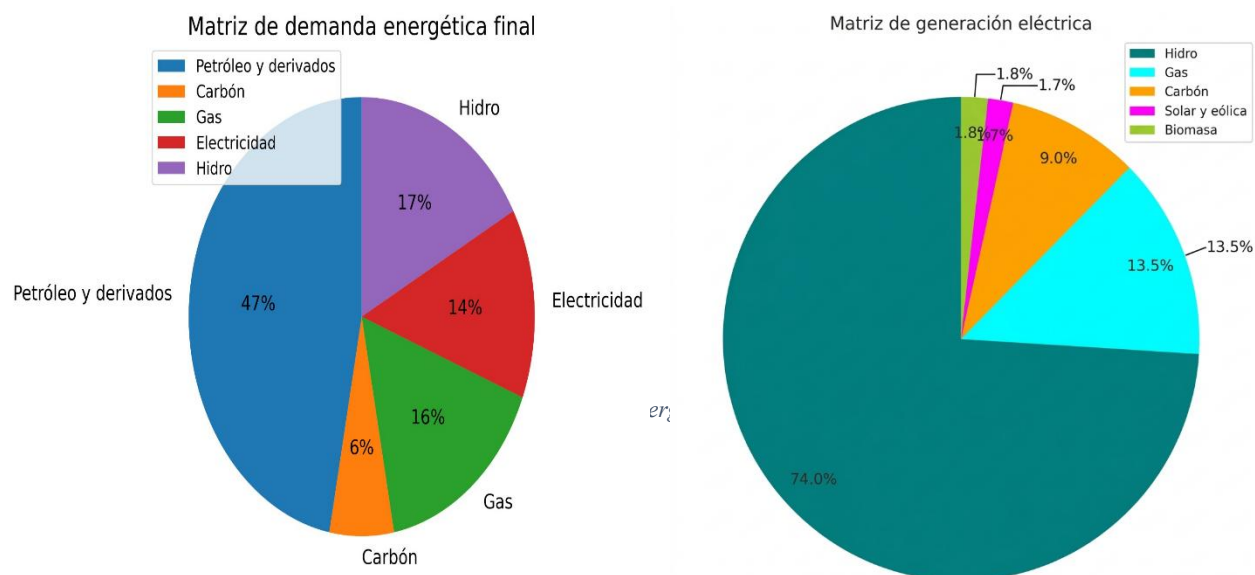
Las ineficiencias estructurales del transporte colombiano, asociadas al predominio de motores de combustión interna y al crecimiento del parque automotor, se amplifican por el desacople entre la generación eléctrica renovable y la demanda energética final. Aunque la oferta eléctrica limpia ha evolucionado positivamente, su limitada articulación con estrategias de electrificación del transporte impide una reducción sustancial del consumo fósil. Este doble fenómeno —ineficiencia tecnológica y desacople energético— explica por qué los avances en materia de generación renovable no se traducen aún en mejoras significativas en la sostenibilidad del sistema de movilidad.

De acuerdo con la UPME (2025), el análisis comparativo entre la matriz de generación eléctrica y la matriz de demanda energética final revela una dualidad crítica. Mientras que la generación eléctrica está compuesta en un 74 % por fuentes hidroeléctricas, es decir, mayoritariamente renovables, la demanda final de energía continúa siendo dominada por derivados del petróleo (47 %), gas natural (16 %) y carbón (6 %). Esta divergencia se refleja gráficamente en la Figura 2, donde se observa que, pese al crecimiento de fuentes no

convencionales como la solar y la eólica —que pasaron del 0,43 % en 2010 al 3 % en 2023—, su impacto sobre el consumo final aún es marginal. Esta situación evidencia un desacople funcional entre la oferta de energía eléctrica renovable y los patrones de consumo energético en sectores como el transporte, el cual representa el mayor consumidor de derivados fósiles en el país.

Figura 2

Comparación entre la matriz de demanda energética final y la matriz de generación eléctrica en Colombia (2024)



Fuente. Correlación entre la lectura y fuente bibliográfica recopilada de Unidad de “Plan Energético Nacional 2024-2054 Tomo I “por Planeación Minero-Energética, 2025.

En consecuencia, la brecha identificada se intensifica por la vulnerabilidad climática del sistema eléctrico colombiano. La generación hidroeléctrica —que en 2023 alcanzó una capacidad de 13 GW— continúa siendo la principal fuente de energía, pero su alta dependencia de las condiciones hídricas la expone a reducciones durante fenómenos como El Niño. En tales escenarios, teniendo en cuenta a la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) el país ha

tenido que recurrir de manera temporal a los combustibles fósiles, cuya participación representó el 23% en 2023 (UPME, 2024).

Este patrón no solo incrementa las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también profundiza la exposición a la volatilidad de los precios internacionales de carbón, gas y derivados del petróleo. Sin embargo, tal como advierte la International Energy Agency (IEA, 2023a), la penetración de energías renovables no convencionales sigue siendo insuficiente para garantizar la resiliencia del sistema, lo que hace necesario acelerar su despliegue mediante políticas de electrificación de sectores intensivos en fósiles, como el transporte, y con incentivos regulatorios claros. En esa misma línea, el Energy Policy Review: Colombia 2023 subraya que la transición energética del país se encuentra en un punto de inflexión y requiere una diversificación más amplia hacia tecnologías limpias —incluyendo solar, eólica y geotérmica— a fin de alcanzar los objetivos de mitigación de emisiones establecidos por la E2050 y las NDC (IEA, 2023b).

Por el contrario, según la IEA (2023), la demanda energética del transporte alcanzó un máximo de 474 PJ en 2019, en 2020 se redujo a 409 PJ por los efectos de la pandemia y en 2021 repuntó hasta 518 PJ, consolidando la fuerte dependencia de los productos petroleros, que representaron el 94% del uso total. Dicha concentración no solo restringe las opciones ante la fluctuación de los precios globales, sino que también limita alcanzar los objetivos de descarbonización establecidos en las NDC.

Finalmente, pese a que la cantidad de biocombustibles aumentó de 20 PJ en 2011 a 32 PJ en 2021 —con una mayor proporción de biodiésel (74%) en comparación con el bioetanol (26%)—, su participación continúa siendo mínima. Posteriormente, la IEA (2023) advierte que esta tendencia amenaza la consistencia de los objetivos de descarbonización, mientras que la

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD) subraya que el bajo nivel de inversión tecnológica y la limitada infraestructura de carga frenan la expansión de alternativas limpias (OECD, 2022).

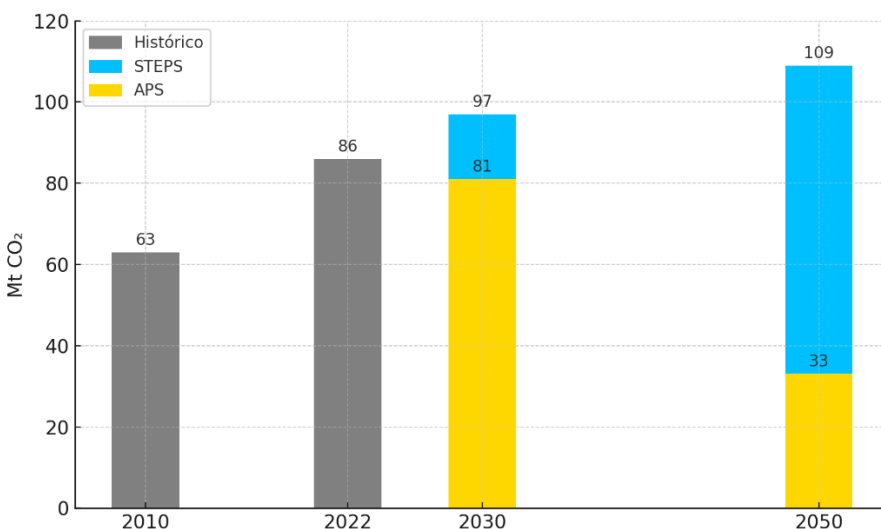
Con relación a las políticas públicas y los desafíos de implementación, el Gobierno colombiano ha adoptado medidas para fomentar la transición energética en el transporte. La Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica consolidó los lineamientos para promover la electrificación del parque automotor, en coherencia con la Ley 1964 de 2019, que impulsa la introducción de vehículos eléctricos (EV) y establece incentivos regulatorios para su adopción. Posteriormente, el Decreto 2051 de 2019 reforzó este marco al fijar arancel del 0% para la importación de EVs, lo cual, junto con disposiciones de la Resolución 40223 de 2020 (UPME, 2020) sobre infraestructura de carga, ha contribuido a dinamizar el mercado (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

No obstante, estos avances contrastan con las limitaciones en el cumplimiento de las metas en vista de que la propia Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica planteó alcanzar 600.000 unidades para 2030, un objetivo que se ha visto restringido por los altos costos iniciales y la limitada infraestructura de carga (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019, p. 21). Este desfase pone de relieve que los incentivos fiscales y regulatorios, aunque necesarios, resultan insatisfactorios si no se acompañan de políticas integrales que fortalezcan la red de carga y reduzcan las barreras económicas de acceso.

En el transporte público, Bogotá ha marcado un referente nacional en la adopción de tecnologías limpias, al incorporar 1,485 buses eléctricos en el sistema Transmilenio en 2021, lo que la posiciona como una de las ciudades con la mayor flota de este tipo en América Latina (Ministerio de Transporte, 2021) a este esfuerzo se sumaron Medellín con 69 unidades y Cali con

35. Sin embargo, aunque la incorporación de buses eléctricos marca un avance hacia la movilidad sostenible, este esfuerzo aún se enfrenta a la fuerte presencia de tecnologías convencionales. En 2019, Transmilenio reportó la entrada en operación de 481 buses a gas natural con estándar Euro VI, parte de una flota total de 741 unidades destinadas a la renovación de las fases I y II del sistema, lo cual demuestra que la transición energética avanza de forma gradual y aún con predominio de combustibles fósiles más limpios (TransMilenio S.A., 2019).

En relación con las emisiones, el informe Colombia Energy Profile indica que el país enfrenta un reto significativo en la reducción de carbono en el transporte terrestre, el cual constituye aproximadamente el 35% de las emisiones del sector energético, lo que equivale a 30 millones de toneladas de CO₂ en 2022. Por lo tanto, como se muestra en la figura 3, si se mantienen las políticas actuales —Escenario de Políticas Declaradas (STEPS en inglés)—, estas podrían aumentar a 97 millones de toneladas en 2030, mientras que el Escenario de Políticas Anunciadas (APS) permitiría una disminución del 26,7 %, llegando a 63 millones de toneladas (IEA, 2023a).

Figura 3*Emisiones de CO₂*

Fuente. Elaborado con información recopilada de “*Colombia energy profile*”, (IEA, 2023a. p. 3)

Nota. STEPS corresponde a Stated Policies Scenario, escenario que refleja las políticas energéticas vigentes o en desarrollo actuales. APS corresponde a Announced Pledges Scenario, escenario que proyecta lo que ocurriría si se cumplen en su totalidad los compromisos climáticos y energéticos anunciados por los gobiernos.

En este contexto, según el Consejo Internacional de Transporte Limpio (International Council on Clean Transportation, por sus siglas en inglés, ICCT), el hecho de que Bogotá disponga de una de las mayores flotas de autobuses eléctricos fuera de China refuerza su posición clave en la descarbonización del transporte urbano. El ICCT, documenta que para septiembre de 2022 Colombia 1.589 buses eléctricos; esta flota eléctrica demuestra que la transición del transporte público hacia sistemas eléctricos se perfila como una estrategia eficaz para disminuir las emisiones en entornos urbanos.

No obstante, de acuerdo con ICCT (2023), para el 2022, Colombia superó los 1.589 buses eléctricos en operación en sus sistemas masivos de transporte, con Bogotá concentrando la mayor parte de esa flota, lo que posicionó al país como el segundo mercado mundial de buses eléctricos fuera de China. En ese contexto, Bogotá asume un rol estratégico en la transición energética del transporte urbano al actuar como ciudad mentora en la iniciativa internacional TUMI E-Bus Mission, desde donde comparte su experiencia de electrificación del transporte público con otras ciudades de América Latina y el mundo (ICCT, 2023, p. 2).

De otra parte, la IEA (2023) subraya que Colombia se mantiene como el sexto exportador mundial de carbón, lo cual refleja la tensión estructural entre su matriz energética tradicional y las metas de transición hacia fuentes limpias. Esta dualidad también ha sido señalada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019), según el cual, en 2018 el sector transporte representó el 40,06% de la energía final, con un 96,2% proveniente de derivados del petróleo, a ello se suma que dicho sector es responsable del 53,86% de las pérdidas de energía en el país y de los costos asociados cercanos a los 3.426 millones de dólares anuales, lo que confirma el peso de la dependencia fósil y la urgencia de avanzar hacia tecnologías más limpias y eficientes.

En la misma línea, la CEPAL, (2022) advierte que la simultaneidad entre energías tradicionales y renovables representa uno de los mayores desafíos para garantizar seguridad energética y avanzar hacia la descarbonización regional. Respecto a los combustibles alternativos, de acuerdo con ICA (2022) aunque Colombia ha promovido mezclas obligatorias de etanol y biodiésel, la variabilidad en los porcentajes de mezcla y la dependencia de materias primas como caña de azúcar y palma han limitado su consolidación como solución robusta.

Por último, las proyecciones de la IEA ofrecen dos escenarios contrastantes: el escenario de políticas declaradas (STEPS) proyecta una participación de electricidad inferior al 10 % en el transporte para 2050; en contraste, el escenario de compromisos anunciados (APS) estima que con políticas más ambiciosas la electricidad podría cubrir hasta el 40 % del consumo del transporte terrestre, reduciendo al mismo tiempo el uso de petróleo en cerca del 55 %; si bien es cierto aunque teóricas, estas proyecciones permiten dimensionar tanto el potencial como las limitaciones actuales de las energías limpias en el sector transporte colombiano

En línea con estas proyecciones, la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) advierte que el cumplimiento de los escenarios más ambiciosos de transición energética en Colombia depende de la creación de condiciones habilitantes, entre ellas la disponibilidad de infraestructura, el acceso a financiamiento, la estabilidad normativa y el fortalecimiento de incentivos regulatorios, elementos que el Plan Energético Nacional (PEN) identifica como habilitadores críticos para materializar el potencial de las energías limpias en el sector transporte (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2025, p. 66).

En términos generales, el documento concluye que la inexistencia de una política de diversificación económica expone al país a vulnerabilidades fiscales y comerciales, además de ralentizar la transición energética, dado que los incentivos dirigidos a resguardar sectores fósiles pueden retrasar la transformación de la matriz energética y desincentivar la inversión en soluciones tecnológicas limpias (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2025, p. 61).

Factores Determinantes del Impacto de las Energías Renovables en la Sostenibilidad del Transporte

En Colombia, la electrificación del transporte enfrenta un desafío crítico asociado a la disponibilidad y cobertura de la infraestructura de carga eléctrica. Según la UPME (2024) el país

superaba las 100 estaciones públicas de recarga para ese año, localizadas principalmente en grandes ciudades como Bogotá, Medellín, Cali y algunas capitales del Eje Cafetero. Aunque estas cifras muestran un crecimiento frente a años anteriores, resultan insuficientes si se comparan con el parque automotor eléctrico nacional, que ya superaba las 8.000 unidades (UPME, 2024). Así, la falta de proporcionalidad entre vehículos y puntos de carga genera un déficit estimado cercano al 40%, lo que restringe la posibilidad de canalizar eficazmente la energía renovable disponible hacia el consumo final del sector transporte.

Adicionalmente, en virtud de los datos del Ministerio de Minas y Energía (2025), la distribución de las electrolineras refleja un patrón geográfico desigual, pues mientras los núcleos urbanos concentran la infraestructura, amplias zonas intermunicipales y rurales permanecen sin acceso. Esto genera un desacople territorial, ya que la energía renovable que se produce a nivel nacional no está siendo distribuida de manera equitativa para su aprovechamiento en todo el sistema de transporte. Como consecuencia, los usuarios de EVs enfrentan barreras de acceso a la recarga, lo cual limita la expansión del parque automotor eléctrico en regiones fuera del núcleo urbano.

Otro aspecto relevante es la limitada integración de fuentes renovables en la red de carga. Aunque existen algunas electrolineras con paneles solares, su presencia sigue siendo incipiente, dado que la mayoría de los cargadores depende del Sistema Interconectado Nacional, cuya alta participación hidroeléctrica lo vuelve vulnerable a los periodos secos de El Niño (Ministerio de Minas y Energía, 2025). En este sentido, se requiere fortalecer la conexión con renovables distribuidas y ampliar la cobertura territorial. Según la Organización Latinoamericana de Energía Colombia se ubica entre los cinco países de la región con más estaciones de carga; sin embargo, estas se concentran en áreas urbanas y resultan insuficientes frente al aumento del parque

eléctrico, que supera las 8.000 unidades, especialmente en transporte interurbano y de carga pesada (OLADE, 2024, p. 14).

Por otro lado, en 2024 la Federación Nacional de Biocombustibles fortaleció su compromiso con la sostenibilidad mediante la creación del Comité de Sostenibilidad, integrado por los principales productores nacionales de bioetanol y biodiésel, dicho comité evidenció avances significativos en la reducción de la huella de carbono frente al análisis de ciclo de vida del consorcio CUE en 2012. En tal sentido, según Fedebiocombustibles (2024), el empleo de biocombustibles evitó la emisión de 3,6 millones de toneladas de GEI y la liberación de 897 toneladas de material particulado, cifras que equivalen al 82 % de la mitigación atribuible al sector transporte en ese periodo, lo cual confirma su aporte a la descarbonización y a la mejora de la calidad del aire urbana (Fedebiocombustibles, 2024, pp. 25–26).

Estos resultados mantienen una tendencia similar a la reportada por estudios técnico-científicos en países de América Latina que han encontrado que la producción y uso de ethanol y biodiesel pueden disminuir las emisiones globales de calentamiento hasta en un **84 %** comparado con gasolina y diésel tradicionales, lo que evidencia su potencial para apoyar la descarbonización del transporte y la mitigación del cambio climático a nivel regional. (Fedebiocombustibles, 2023; Canabarro et al., 2023).

La literatura especializada y las cifras sectoriales publicadas para 2023 indican que el uso de biocombustibles evitó aproximadamente 3,2 millones de toneladas de CO₂ equivalente en Colombia, una reducción comparable a retirar de circulación cerca de un millón de vehículos convencionales, con efectos positivos sobre la calidad del aire urbano (Fedebiocombustibles, 2024; Portafolio, 2024). Esta magnitud de mitigación es consistente con la evidencia científica que muestra reducciones significativas de emisiones cuando se sustituyen combustibles fósiles

por biodiésel de palma, etanol de caña, biometano y SAF en el transporte colombiano, tanto en escenarios parciales como de sustitución amplia (Algarra Rincón et al., 2026).

De manera ilustrativa, el impacto positivo de los biocombustibles se explica tanto por las mezclas reglamentarias —E10 para el bioetanol y B10 para el biodiésel— como por iniciativas voluntarias impulsadas por el propio sector del transporte. En particular, varias flotas de carga pesada han avanzado hacia mezclas superiores al 10 %, como el B20, con resultados ambiental y técnicamente favorables. Un ejemplo destacado corresponde a los volqueteros de Bogotá y Cundinamarca, quienes desde 2024 cuentan con una estación de servicio operada por Primax Colombia, donde se distribuye diésel con un 20 % de biodiésel de palma. Gracias a esta práctica, se estima una reducción anual de más de 3.000 toneladas de CO₂ equivalente, además de mejoras en el rendimiento de los motores y mayor vida útil debido a la alta lubricidad del biocombustible (Fedebiocombustibles, 2024).

De manera complementaria, Fedebiocombustibles informa que el mismo modelo se aplica en Medellín, con reducciones cercanas a 4.000 toneladas de CO₂ al año, equivalentes a la siembra de más de 360.000 árboles. Tales resultados evidencian el potencial real de los biocombustibles avanzados para acelerar la descarbonización del transporte colombiano, al tiempo que se fortalecen beneficios ambientales, se han registrado mejoras mecánicas como mayor vida útil del motor y reducción en los intervalos de mantenimiento, lo cual puede traducirse en ahorros operativos y mayor eficiencia energética. No obstante, para que esta contribución sea sostenible en el largo plazo, será necesario avanzar hacia biocombustibles de segunda generación, que no compitan con la producción alimentaria ni generen presiones sobre el uso del suelo, se perfila como un paso necesario para consolidar una transición energética sostenible.

Según Alfonso Ávila (2022), el transporte terrestre se consolida como uno de los mayores aportantes a la contaminación atmosférica en Colombia, principalmente por su elevada dependencia de combustibles de origen fósil. Entre los contaminantes asociados a esta actividad destaca el monóxido de carbono (CO), gas que se produce como resultado de procesos de combustión incompleta en energéticos carbonados como la gasolina, el gas natural y el carbón. De acuerdo con información reportada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, para el año 2014 el sector transporte fue responsable del 27,2 % del total de emisiones nacionales de CO. Al interior de este sector, las fuentes móviles vinculadas al transporte por carretera concentraron el 89,3 % de dichas emisiones, mientras que la aviación civil aportó el 9,1 %, evidenciando el peso dominante del transporte terrestre en la generación de este contaminante (IDEAM, 2020).

La evidencia cuantitativa presentada por la autora muestra que el transporte por carretera fue el principal emisor de contaminantes criterio en 2014, con valores que alcanzaron 697 366 toneladas de CO, 10 963 toneladas de PM_{2.5} y 250 451 toneladas de NO₂, compuestos estrechamente vinculados con la combustión vehicular y con un impacto significativo en la degradación de la calidad del aire urbano. En particular, el transporte terrestre fue responsable del 72,6 % de las emisiones de PM_{2.5} y del 89,3 % de las emisiones de CO dentro del conjunto de fuentes móviles, reafirmando que este subsector es un factor determinante de la contaminación atmosférica nacional (Alfonso Ávila, 2023).

En la misma línea, el CREE, a partir del Inventario Nacional de Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero, identifica que el transporte aporta el 38,2 % de las emisiones del sector energía; en consecuencia, en el cumplimiento de las metas climáticas establecidas para 2030, el país deberá reducir 24,26 millones de toneladas de CO₂ equivalente. Esta información

subraya la urgencia de implementar estrategias de mitigación sostenidas en la transición energética, la movilidad eléctrica y el uso de biocombustibles, que permitan desacoplar el crecimiento del sector transporte de su huella ambiental (CREE, 2022).

Así, los biocombustibles estarían mitigando aproximadamente el 84% de las emisiones sectoriales. No obstante, el acumulado de 34 millones de toneladas mitigadas desde 2003 representa las emisiones anuales de aproximadamente 18 millones de vehículos livianos, calculado con el factor oficial de 1.89 ton CO₂ por vehículo-año establecido en la Guía Colombiana para la elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Este panorama positivo se ve reforzado por los hallazgos divulgados recientemente por la Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, en la que se resalta que, Colombia se posiciona entre los países con menor intensidad de carbono en la producción de biocombustibles, destacándose el etanol de caña de azúcar, con una disminución del 74 % de las emisiones de GEI, mientras que el biodiésel de palma logra una mitigación mínima del 83 %, cifras que superan ampliamente los estándares de sostenibilidad registrados en Estados Unidos y en diversas naciones europeas (Tecnicaña,2024).

A esto se suma un marco regulatorio robusto que impulsa de manera sostenida la transición energética en el transporte mediante la mezcla obligatoria de biocombustibles, actualmente establecida en E10 para etanol y B10 para biodiésel, lo cual garantiza una sustitución parcial de combustibles fósiles en todo el territorio nacional (Portafolio, 2024). En 2023, la producción nacional superó las 700.000 toneladas de biodiésel B10 y alcanzó 81 millones de galones de etanol E10, volúmenes que permitieron evitar la emisión de aproximadamente 3,2 millones de toneladas de CO₂ equivalente y que aportaron cerca del 2,8 %

del PIB manufacturero, reflejando el peso estratégico del sector de biocombustibles en la economía y en el cumplimiento de los compromisos climáticos del país (La República, 2024; Portafolio, 2024).

Políticas Públicas y Marco Normativo para la Sostenibilidad del Transporte

El desarrollo normativo en Colombia ha buscado orientar la transición energética del transporte con miras a la consolidación de un modelo sostenible, promoviendo tanto la integración de fuentes renovables como la adopción de tecnologías limpias. Durante la última década, se han promulgado decretos, leyes y resoluciones que, de forma conjunta, conforman un marco ambicioso, aunque su cumplimiento ha sido parcial y está marcado por una implementación fragmentada. La Tabla 3 resume los hitos legislativos más relevantes de la última década, evidenciando una tendencia recurrente, si bien las normas plantean metas ambiciosas de descarbonización y electrificación, su cumplimiento avanza lentamente. Este contraste permite dimensionar la brecha existente entre la formulación de políticas y su aplicación territorial efectiva.

Tabla 3

Principales instrumentos normativos

Norma	Año	Análisis
Ley 1715 – FNCER	2014	Impulsa la generación eléctrica, pero su impacto en el transporte es marginal
Ley 1964 – Vehículos eléctricos	2019	Ha promovido la adquisición, pero las metas de flota aún no se cumplen

Decreto 2051 – Incentivos a EVs	2019	Eliminación efectiva de barreras, pero limitada penetración de mercado
Ley 2099 – Transición energética	2021	Buena formulación, pero débil ejecución en transporte
Resolución CREG 171 – Tarifas carga EV	2021	Norma vigente, con implementación progresiva
Plan de Movilidad Eléctrica – UPME	2019	Aplicación concentrada en ciudades principales, limitada cobertura nacional
CONPES 4075 – Política de transición energética	2022	Directrices ambiciosas, pero sin carácter vinculante ni metas cuantificadas
Resolución 40117 – RETIE (versión 2024)	2024	Regula aspectos técnicos avanzados, pero su aplicación depende de la capacidad institucional de inspección
NTC 2050 – Código Eléctrico Colombiano (Segunda actualización ICONTEC)	2024	Norma técnica vigente; su impacto depende de la aplicación territorial y de la actualización de la infraestructura.

La Ley 1715 de 2014 sentó las bases para la diversificación de la matriz energética nacional al introducir incentivos fiscales y disposiciones regulatorias orientadas al aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER). Esta ley promueve el desarrollo y uso de energías renovables en el sistema energético colombiano y ha impulsado de manera significativa la generación eléctrica limpia. No obstante, su impacto en el

sector transporte ha sido limitado, dado que no incorporó instrumentos específicos para estimular la adopción de tecnologías sostenibles en dicha actividad. Como resultado, el avance en sostenibilidad y eficiencia energética dentro del transporte sigue siendo reducido, pese a que constituye una de las metas prioritarias de las políticas públicas actuales (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2024).

La Ley 1964 de 2019 introdujo medidas directas para promover el uso de vehículos eléctricos en Colombia, al crear incentivos fiscales (por ejemplo, tope del 1 % en el impuesto vehicular para eléctricos), beneficios de circulación y lineamientos para la infraestructura (p. ej., parqueaderos preferenciales), todo con el fin de acelerar la adopción de tecnologías de cero emisiones (Ley 1964 de 2019; Decreto 191 de 2021). Además, la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica fijó la meta de 600.000 vehículos eléctricos a 2030, articulando acciones regulatorias y de mercado para habilitar infraestructura de carga y estándares técnicos (Minambiente–UPME–Mintransporte, 2019/2020; El Tiempo, 2019). No obstante, el avance hacia esa meta ha sido más lento de lo previsto por factores como el alto costo de adquisición, brechas en la infraestructura de carga y la concentración de estaciones en grandes centros urbanos—hoy mayoritariamente en Bogotá, Antioquia y Valle del Cauca—lo que limita el acceso en regiones intermedias y rurales (Minenergía, 2025).

Por otra parte, el Decreto 2051 de 2019 y la Ley 2099 de 2021 se enfocaron en eliminar barreras arancelarias y en fomentar tarifas diferenciadas para la carga eléctrica (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2024). En este sentido, el Decreto 2051 de 2019 tiene como objetivo eliminar aranceles a la importación de vehículos eléctricos e híbridos, mientras que la Ley 2099 de 2021 busca modernizar el marco energético nacional, fortalecer las FNCER y promover su uso en sectores como el transporte. Aunque estas medidas han alcanzado un nivel

regulatorio avanzado la infraestructura de recarga aún no es suficiente y, en varios casos, se hace inaccesible para el usuario promedio.

El Plan de Movilidad Eléctrica de la UPME, lanzado en 2019 como la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (ENME), busca acelerar la adopción de EVs en flotas públicas y privadas, así como impulsar la eficiencia energética teniendo como propósito promover la adopción de flotas eléctricas, electrolinerías y eficiencia energética en el transporte. Aunque ha sido un documento de referencia estratégico, su resultado operativo ha sido parcial: mientras en algunas ciudades se han instalado electrolinerías y flotas eléctricas, en otras regiones apenas comienzan procesos pilotos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

Por otro lado, resoluciones técnicas han jugado un rol clave en concretar aspectos operativos esenciales. La Resolución CREG 171 de 2021 permitió la medición diferenciada y la exención del 20 % de contribución en la tarifa eléctrica para los consumos destinados a la carga de vehículos eléctricos, destinada a establecer tarifas diferenciadas y medición separada para usuarios de vehículos eléctricos. Esta disposición ha tenido éxito técnico, aunque su implementación aún depende del interés de comercializadores y usuarios (Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2021).

Por su parte, el CONPES 4075 formulado en 2022 constituye el documento técnico más completo, incorporando objetivos de electrificación del transporte y promoción de energías limpias cuyo propósito central es definir lineamientos estratégicos para una transición energética justa e incluyente, incluyendo el transporte. No obstante, carece de carácter vinculante y mecanismos de evaluación, lo que ha limitado su eficacia real y ha generado variaciones significativas en su implementación a nivel territorial (Departamento Nacional de Planeación, 2022).

Por último, aunque existen avances normativos como el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), formalizado en su versión vigente mediante la Resolución 40117 de 2024 del Ministerio de Minas y Energía, y la Norma Técnica Colombiana NTC 2050 (ICONTEC, 2024), ambos instrumentos conservan un enfoque centrado en la seguridad y confiabilidad técnica más que en la integración con las metas de sostenibilidad del transporte. En el caso del RETIE, establece los requisitos técnicos orientados a la protección integral de la vida humana, los ecosistemas y el medio ambiente durante el uso de la energía eléctrica. Por su parte, la NTC 2050 incorpora criterios de eficiencia y adaptación a tecnologías emergentes como la movilidad eléctrica y las fuentes renovables distribuidas, aportando al fortalecimiento del marco técnico de la transición energética.

Estado Actual del Impacto Ambiental y Social en el Sector Transporte

En las últimas dos décadas las políticas energéticas nacionales, formadas con la Ley 1715 de 2014 y los lineamientos del Plan Energético Nacional 2020–2050 del Ministerio de Minas y Energía, han promovido la incorporación de fuentes renovables no convencionales (solar, eólica y biomasa) con el fin de diversificar la generación y avanzar hacia una economía baja en carbono. Sin embargo, el despliegue de estas tecnologías presenta impactos ambientales y sociales que deben analizarse con rigor a partir de fuentes oficiales y literatura técnica verificable. Acorde a ello, en esta sección se examina el impacto ambiental y social en la sostenibilidad del sector transporte.

Hay que mencionar, además que la revisión articula tres líneas de trabajo: (i) análisis tecnológico-ambiental (solar, eólica, hidro y bioenergía), (ii) evaluación social y de gobernanza, (iii) la sistematización de información sobre el desempeño ambiental y operativo de los biocombustibles, cuya evidencia reciente permite valorar su contribución a la reducción de

emisiones y a la sostenibilidad del transporte y por último (iv) estudio de casos que exponen repercusiones concretas en el territorio y en la capacidad de las renovables para alimentar una transición del transporte sostenible

Análisis Tecnológico-Ambiental

En su estudio, Cuervo (2024) realiza un análisis cartográfico cruzando la ubicación de los proyectos eólicos terrestres en La Guajira con mapas oficiales de biodiversidad, áreas protegidas (RUNAP) y reservas de la biósfera. A partir de esa articulación, demuestra que existe una superposición significativa entre los proyectos eólicos y territorios ecológicos y ambientalmente sensibles; es decir, zonas vulnerables desde el punto de vista del capital natural —suelo, vegetación, biodiversidad y hábitats— que las comunidades Wayúu emplean tradicionalmente para su subsistencia.

Por tanto, esta coincidencia espacial permite argumentar con rigor que la mera planificación de esos proyectos podría representar un riesgo estructural para el capital natural, ganadería ovina/caprina, agricultura, recolección, uso ancestral del territorio, prácticas culturales y sociales vinculadas a la territorialidad; recursos de los que depende la subsistencia tradicional, bienestar y organización social.

Para ilustrar esta relación, las cifras proporcionadas por Cuervo (2024) respaldan la relación entre los proyectos eólicos y los impactos negativos sobre los medios de vida de la comunidad Wayúu. Por ejemplo, de los 57 proyectos de energía renovable en La Guajira, al menos 33 ya habían presentado conflictos con comunidades indígenas en 2023, a pesar de no estar construidos aún. Además, estos proyectos abarcan aproximadamente 3.760 km², lo que correspondería al 9,17 % del territorio de La Guajira, incluyendo ecosistemas frágiles y zonas de

alto valor ambiental como biomas de zonas secas tropicales y biomas de alta salinidad del Pacífico (p. 30).

Asimismo, se señala que más del 75 % del territorio de La Guajira ha sido clasificado en categorías de alta o muy alta desertificación, con más de 183 km de línea costera afectados por procesos de degradación del suelo, lo cual incrementa la vulnerabilidad ambiental y pone en riesgo los medios de vida tradicionales y la cosmovisión cultural de la comunidad (p. 15).

Al cierre de 2024 en Colombia, la capacidad instalada de energía solar y eólica representó aproximadamente 9 % de la matriz eléctrica total, un avance notable frente al 1,5 % registrado en 2022, impulsado principalmente por el crecimiento de la capacidad solar. Según SEI (2025), aunque no existía capacidad eólica en operación comercial en ese momento, 31,9 MW eólicos y 80,4 MW solares estaban en fase de pruebas, mientras que 32 proyectos solares con 5.022 MW y nueve proyectos eólicos con 1.571 MW se encontraban en construcción.

El Instituto SEI reporta que cerca de 1,3 GW de proyectos eólicos en La Guajira —entre ellos Windpeshi (205 MW), Tumawind (208 MW) y Chemesky (99 MW)— han sido suspendidos de manera indefinida por Enel Colombia, pese a encontrarse en distintas etapas de avance, incluidas algunas ya en fase de obra. Las causas principales se relacionan con conflictos sociales, barreras para la inversión y dificultades técnicas que han impedido el desarrollo normal de estos proyectos. A su vez, Celsia evalúa alternativas para los proyectos Acacia (80 MW) y Camelias (250 MW), mientras que EDP Renewables decidió cancelar sus inversiones pendientes asociadas a los proyectos Alpha (212 MW) y Beta (280 MW). Este conjunto de suspensiones, replanteamientos y cancelaciones evidencia una brecha estructural entre el alto potencial eólico del país y la capacidad real de generación renovable actualmente disponible, lo que limita el

respaldo energético necesario para sostener procesos estratégicos como la electrificación del transporte (SEI, 2025, p. 2).

Cabe agregar que el despliegue de infraestructuras asociadas a la generación renovable — incluidas estaciones colectoras, líneas de transmisión y redes de distribución— en el departamento de La Guajira ha provocado impactos relevantes sobre los ecosistemas locales. De acuerdo con la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME, 2024), dichas intervenciones han impactado sobre la biodiversidad regional a través de múltiples mecanismos. Entre los más significativos se identifican la reducción de la cobertura vegetal, la fragmentación de los hábitats, la interrupción de la conectividad ecológica, el incremento localizado de la temperatura ambiente —particularmente en horario nocturno—, la degradación de la calidad del aire y la intensificación de procesos erosivos (UPME, 2024)

Como resultado, estos impactos evidencian que el despliegue de la infraestructura energética no solo genera transformaciones visibles en el paisaje, sino que también provoca alteraciones significativas en el equilibrio ecológico de áreas ambientalmente sensibles. Asimismo, la ampliación de las redes de transmisión necesarias para transportar la energía eólica hacia el Sistema Interconectado Nacional ha exigido intervenciones en zonas áridas, cuyos ecosistemas presentan una baja capacidad de resiliencia frente a modificaciones del suelo y la vegetación, lo que amplifica la vulnerabilidad de estos entornos ante los impactos derivados de los proyectos energéticos (UPME, 2024).

Asimismo, los sobrecostos generados por la implementación de medidas adicionales de mitigación ambiental —estimados en parte dentro del aumento del 20% del presupuesto inicial— evidencian que la sostenibilidad técnica de estos proyectos depende estrechamente de una adecuada planificación ambiental (UPME, 2024).

Con el fin de evaluar el impacto ambiental del sector transporte de manera integral, se definieron indicadores que permiten analizar tanto las emisiones como la eficiencia energética y la dependencia fósil. En este sentido, la Tabla 4 presenta los principales indicadores ambientales relevantes para la transición energética del transporte en Colombia.

Tabla 4

Indicadores ambientales clave del sector transporte relevantes para la transición energética

Indicador ambiental	Situación del sector transporte en Colombia	Relación con energías renovables	Implicación para la sostenibilidad
Emisiones de CO ₂	Uno de los principales aportantes de GEI del sector energético	Sustitución de combustibles fósiles por electricidad y biocombustibles reduce emisiones directas	Contribución directa a metas climáticas nacionales
	Alta concentración en zonas urbanas y corredores viales	Electrificación reduce emisiones locales de contaminantes	Mejora en salud pública y calidad del aire
Intensidad energética	Alta energía consumida por unidad transportada	Tecnologías eléctricas presentan mayor eficiencia	Reducción del consumo energético total

Indicador ambiental	Situación del sector transporte en Colombia	Relación con energías renovables	Implicación para la sostenibilidad
Dependencia fósil	Aproximadamente 96 % del consumo energético del transporte	Integración de renovables reduce dependencia externa	Mayor seguridad energética
Huella de carbono del ciclo de vida	Elevada en motores de combustión	ACV muestra menores emisiones en EVs cuando se alimentan con renovables	Evaluación ambiental integral

Fuente: Correlación con análisis del Capítulo, IEA, UPME e IDEAM.

En este sentido, el impacto ambiental del sector transporte no se limita únicamente al volumen de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que se expresa también en elevados niveles de contaminantes locales, alta intensidad energética y una huella de carbono significativa a lo largo del ciclo de vida de las tecnologías convencionales. La integración de energías renovables en el transporte permite incidir de manera simultánea sobre estos indicadores, reforzando el carácter estratégico de la transición energética más allá de la simple sustitución tecnológica.

Impactos Sociales y de Gobernanza: Aspectos Clave

La dimensión social de las energías renovables en Colombia se ha convertido en un determinante crítico del ritmo de expansión renovable y, por tanto, de la disponibilidad de

energía limpia para la electrificación del transporte. Tanto la IEA (2023) como el Ministerio de Minas y Energía (2020) en el PEN 2020-2050 sostienen que la transición energética del transporte depende de la estabilidad del sistema eléctrico y de la entrada oportuna de nueva capacidad renovable. No obstante, cuando esta capacidad se retrasa por conflictividad social, la matriz sigue dependiendo de energía térmica, lo que limita la descarbonización del sector transporte.

De hecho, los retrasos en proyectos eólicos del Caribe son una de las principales expresiones de este fenómeno. Acorde a la OECD, el conflicto social es un factor que dificulta la expansión de renovables y por tanto puede impactar el abastecimiento limpio para transporte, de manera consistente, la investigación de Rutas del Conflicto del Instituto de Estudios para el Desarrollo y la Paz (Indepaz, 2023), documenta que, de los aproximadamente 50 proyectos eólicos terrestres proyectados en La Guajira para alcanzar cerca de 9 GW de capacidad, al menos 21 han presentado conflictos con las comunidades en sus zonas de influencia.

En conjunto se mencionan reiteradamente los parques Alpha, Apotolorru, Casa Eléctrica y Windpeshi, cuyas obras han enfrentado demoras superiores a tres años derivadas de aspectos relacionados con la consulta previa, la falta de acuerdos entre empresas comunidades indígenas, y entidades públicas, lo que ha generado retrasos significativos en su avance.

Durante el período comprendido entre enero de 2022 y febrero de 2024, los conflictos sociales vinculados al sector minero-energético, —que incluyen proyectos de energía eólica y otras fuentes renovables— se manifestaron principalmente a través de bloqueos viales (59 %), seguidos por acciones de concentración social (23 %) y marchas o movilizaciones (10 %) (Defensoría del Pueblo, 2024). Estas situaciones han generado retrasos significativos en la operación de proyectos energéticos, debido a la interrupción de vías y accesos, lo que influye

directamente la conectividad con infraestructuras críticas, como estaciones de transmisión de energía.

En este sentido, casos específicos como el proyecto Planta de Generación Solar Pubenza PSR 2 (50 MW), adjudicado en la subasta de energía de 2021 por EDF Renewables compañía de origen francés para Girardot (Cundinamarca) con una capacidad prevista de 50 MW evidenció barreras de gobernanza que afectan la entrada de nueva capacidad renovable ya que la compañía decidió retirarse del desarrollo del proyecto en 2023 ante “retrasos significativos en la obtención de permisos y licencias ambientales” (Energía Estratégica, 2023), además de cambios regulatorios y fiscales incluyendo efectos de reformas tributarias y el contexto económico (tasas de interés y volatilidad cambiaria), afectaron su viabilidad técnica y económica.

Otras versiones disponibles en su comunicado confirman que la reforma tributaria redujo la rentabilidad esperada de los proyectos al modificar los incentivos contemplados en la Ley 1715 para la promoción de energías renovables. A ello se sumó un escenario macroeconómico adverso, caracterizado por incrementos sostenidos en las tasas de interés y una marcada inestabilidad en la tasa de cambio, factores que complejizaron aún más la viabilidad financiera de las iniciativas, lo que llevó a su retirada y a la incapacidad de avanzar en su desarrollo durante el periodo previsto (EDF Renewables, 2023).

De acuerdo con la Defensoría del Pueblo, los conflictos sociales en este sector se asocian principalmente con temas laborales y de contratación (33 %), preocupaciones ambientales (32 %) y regulaciones aplicables a las actividades energéticas (11%), destacándose una participación significativa de comunidades locales e indígenas (41 %) y trabajadores o sindicatos (17 %) (Defensoría del Pueblo, 2024, pp. 89-92). En consecuencia, estas situaciones no solo reflejan demandas legítimas de las comunidades, sino que retrasan la puesta en funcionamiento de

proyectos de generación con fuentes renovables, limitando indirectamente la disponibilidad de electricidad limpia necesaria para aplicaciones como buses eléctricos, estaciones de carga rápida y transporte urbano sostenible.

Al mismo tiempo, el Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy (2023) argumenta que, aunque las posibilidades de crecimiento de las centrales eólicas y solares se distribuyen en diversas regiones —incluidas La Guajira, el departamento del Cesar y las cordilleras andinas—, el recurso eólico más elevado se concentra en La Guajira, donde las condiciones de velocidad del viento resultan superiores a las de otras zonas del país y el potencial técnico estimado es particularmente alto.

No obstante, organizaciones locales han reportado procesos de consulta previa fragmentados, querellas por la posesión y uso de la tierra, escasos beneficios redistribuidos a las comunidades y desacuerdos entre normas estatales y comunidades, lo que ha dificultado la implementación efectiva de proyectos eólicos (Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy (2023, pp. 22-23).

Desde una perspectiva geográfica y de mercado, la expansión de energías renovables en Colombia muestra que Cundinamarca y Tolima concentran la mayor parte de las nuevas adiciones solares previstas para 2025—46% y 27% del portafolio, respectivamente—debido en buena medida a su proximidad al centro de carga de Bogotá y a menores barreras de ejecución frente a los proyectos eólicos de La Guajira; este patrón ha favorecido el avance de la fotovoltaica en corredores como Girardot y municipios aledaños (Forbes Colombia, 2025; La República, 2025; XM, 2025; SEI, 2025).

El mismo análisis sectorial evidencia clústeres de biomasa a lo largo del valle del río Magdalena—incluyendo departamentos como Santander, Boyacá y Tolima—donde la vocación

agroindustrial y el potencial de residuos habilitan cogeneración con subproductos agrícolas (p. ej., cascarilla de arroz), con resultados técnico-económicos favorables en estudios y proyectos recientes; esto confirma que el despliegue de estas tecnologías se vincula a dinámicas productivas locales y puede generar beneficios socioeconómicos diferenciados (UPME, 2011; UPME, Atlas Biomasa; Nuncira, 2023; Portafolio, 2025).

Los proyectos podrían ocasionar impactos ecológicos y alterar el turismo tradicional, transformando espacios estratégicos del territorio Wayúu en enclaves industriales (Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, 2023, pp. 22-23).

En consecuencia, las restricciones que afectan el ritmo de incorporación de nueva capacidad renovable reducen la disponibilidad futura de electricidad limpia y por ello condicionan la posibilidad de que la electrificación del transporte se consolide como una alternativa sostenible a largo plazo.

Por otra parte, en el departamento del Valle del Cauca se han desarrollado proyectos de energía renovable con impactos ambientales y sociales significativos que condicionan la expansión de energías limpias; por ejemplo, el Parque Solar Granja Palmaseca inaugurado en octubre de 2024, constituye una de las iniciativas solares más relevantes del suroccidente colombiano. Con una capacidad instalada de alrededor de 30 MW mediante 78 000 paneles solares abastece a más de 30 000 hogares con energía renovable y evita la emisión de cerca de 19 000 toneladas de CO₂ al año, generando además más de 560 empleos directos durante su construcción y promoviendo la formación de trabajadores locales en tecnologías solares (Presidencia de Colombia, 2024).

El Valle del Cauca, presenta una diversificación de fuentes renovables que incluye múltiples instalaciones fotovoltaicas desarrolladas por empresas como Celsia, con plantas solares

en municipios como Yumbo, Palmira, Buga, Tuluá y La Victoria, entre otros, que suman decenas de megavatios de capacidad instalada y contribuyen a disminuir la subordinación energética a fuentes fósiles en el sistema eléctrico nacional (Monsalve & Andrade, 2025).

Más allá de los aspectos tecnológicos y ambientales, la transición energética del transporte está condicionada por factores institucionales y de gobernanza. En este contexto, la Tabla 5 resume los principales desafíos de gobernanza que afectan la implementación de energías renovables en el sector transporte colombiano.

Tabla 5

Principales desafíos de gobernanza en la transición energética del transporte

Dimensión de gobernanza	Situación identificada	Impacto sobre el sector transporte
Coordinación institucional	Fragmentación entre sectores energía, transporte y ambiente	Implementación desarticulada de políticas
Gobernanza territorial	Conflictos por uso del suelo y licencias	Retrasos en proyectos renovables
Capacidad institucional	Diferencias entre niveles de gobierno	Limitada ejecución local
Participación social	Procesos limitados de concertación	Conflictos y pérdida de legitimidad

Fuente: Elaboración a partir del análisis del Capítulo, con base en UPME, Ministerio de Minas y Energía, OECD y Wuppertal Institute

Panorama Actual y Contribución Estratégica de los Biocombustibles

En 2024 la Federación Nacional de Biocombustibles fortaleció su compromiso con la sostenibilidad mediante la creación del Comité de Sostenibilidad, integrado por los principales productores nacionales de bioetanol y biodiésel, dicho comité evidenció avances significativos en la reducción de la huella de carbono frente al análisis de ciclo de vida del consorcio CUE en 2012. Según el Informe de Sostenibilidad 2024, el uso de biocombustibles evitó la emisión de 3,6 millones de toneladas de GEI y 897 toneladas de material particulado, equivalentes al 82 % de la mitigación del sector transporte (Fedebiocombustibles, 2024, pp. 25–26).

Estos resultados confirman su aporte al avance en la reducción de emisiones de carbono y al fortalecimiento de las condiciones de calidad atmosférica, en coherencia con el informe de 2023, donde se reportó una mitigación del 84 % frente al año anterior (Fedebiocombustibles, 2023). Este dato concuerda con las cifras reportadas durante 2023, en las que el uso de biodiésel y bioetanol evitó la emisión de aproximadamente 3,2 millones de toneladas de CO₂eq en el sector transporte, lo cual representa una mitigación del 84 % de las emisiones sectoriales en comparación con el año anterior (Fedebiocombustibles, 2023).

Diversos estudios han evaluado la sostenibilidad de la producción de bioetanol y biodiésel en América Latina mediante Evaluaciones de Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment, LCA), incluyendo investigaciones específicas para Colombia. La evidencia coincide en que, frente a combustibles fósiles como la gasolina y el diésel, los biocombustibles pueden generar reducciones significativas de gases de efecto invernadero, alcanzando valores de hasta 84 % en comparación con los combustibles derivados del petróleo (Canabarro et al., 2023). Estos resultados se ven reforzados por estudios adicionales: por ejemplo, evaluaciones de LCA de bioetanol colombiano producido a partir de caña y yuca muestran reducciones de huella de

carbón respecto a la gasolina y una eficiencia energética favorable con ratios de conversión superiores a 1 (Botero Agudelo et al., 2011). Asimismo, análisis realizados para la producción de bioetanol E100 en Colombia mediante Open LCA resaltan beneficios ambientales netos frente a alternativas fósiles (Buitrago Tello & Belalcázar, 2014). En conjunto, estos estudios demuestran que los biocombustibles en la región —incluyendo el caso colombiano— presentan un balance energético positivo, reducen de manera sustancial las emisiones de GEI y constituyen una opción robusta para apoyar los procesos de descarbonización del transporte en economías en desarrollo.

De manera ilustrativa, el impacto positivo de los biocombustibles se explica tanto por las mezclas reglamentarias —E10 para el bioetanol y B10 para el biodiésel— como por iniciativas voluntarias impulsadas por el propio sector del transporte. En particular, varias flotas de carga pesada han avanzado hacia mezclas superiores al 10 %, como el B20, con resultados ambiental y técnicamente favorables. Un ejemplo destacado corresponde a los volqueteros de Bogotá y Cundinamarca, quienes desde 2024 cuentan con una estación de servicio operada por Primax Colombia, donde se distribuye diésel con un 20 % de biodiésel de palma. Gracias a esta práctica, se estima una reducción anual de más de 3.000 toneladas de CO₂ equivalente, además de mejoras en el rendimiento de los motores y mayor vida útil debido a la alta lubricidad del biocombustible (Fedebiocombustibles, 2024).

El mismo modelo se aplica en Medellín, con reducciones cercanas a 4.000 toneladas de CO₂ al año, equivalentes a la siembra de más de 360.000 árboles. Tales resultados evidencian el potencial real de los biocombustibles avanzados para acelerar la descarbonización del transporte colombiano, al tiempo que se fortalecen beneficios ambientales, se han registrado mejoras mecánicas como mayor vida útil del motor y reducción en los intervalos de mantenimiento, lo cual puede traducirse en ahorros operativos y mayor eficiencia energética.

A nivel técnico, un estudio reciente que estimó las emisiones del transporte terrestre en Colombia entre 2010 y 2021 confirma que el parque automotor no solo genera CO₂ y otros gases de efecto invernadero, sino también precursores de ozono —como el monóxido de carbono (CO) y los óxidos de nitrógeno (NO_x)—, así como aerosoles, entre ellos el material particulado fino (PM_{2.5}), todos estrechamente asociados a la combustión de combustibles derivados del petróleo (Mantilla-Romo et al., 2023).

Se estima que aproximadamente el 84 % de las emisiones sectoriales de transporte se ha visto compensado por el uso de biocombustibles, y el acumulado de 34 millones de toneladas mitigadas desde 2003 equivale aproximadamente a las emisiones anuales de 18 millones de vehículos livianos de acuerdo con estimaciones realizadas aplicando el factor oficial de 1,89 toneladas de CO₂ por vehículo-año, definido en la Guía Colombiana para la Elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Este panorama positivo se ve reforzado por los hallazgos divulgados recientemente por la Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, en los que se destaca que la producción de biocombustibles en Colombia presenta actualmente uno de los desempeños ambientales más favorables a escala global. De acuerdo con esto, el etanol obtenido a partir de caña de azúcar en el país logra una disminución aproximada del 74 % en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), mientras que el biodiésel de palma logra una mitigación mínima del 83 %, cifras que superan ampliamente los estándares de sostenibilidad registrados en Estados Unidos y en diversas naciones europeas .

Este liderazgo ambiental se explica por varios factores técnicos distintivos del modelo colombiano, en primer lugar, la producción de etanol se basa en esquemas de cogeneración con bagazo que permite generar energía sin emisiones adicionales; en segundo lugar, el cultivo de

palma para biodiésel se realiza en zonas con alta capacidad de captura de carbono, lo que mejora el balance neto de emisiones del proceso. A esto se suma un marco regulatorio que fomenta la mezcla obligatoria de biocombustibles en proporciones E10 (etanol) y B10 (biodiésel), consolidando una reducción sustantiva de emisiones en el sector transporte. También en 2023, Colombia produjo más de 700.000 toneladas de B10 y 81 millones de galones de E10, lo que permitió reducir 3,2 millones de toneladas de CO₂eq y aportó el 2,8 % al PIB manufacturero (TECNICAÑA, 2024).

Estudio de Casos Relevantes

Los estudios de caso sobre grandes proyectos hidroeléctricos documentados ampliamente por la literatura en Colombia y la región permiten comprender con mayor precisión la magnitud de los impactos ambientales y sociales asociados a la expansión de infraestructuras consideradas como energías renovables. En este sentido, la Tabla 6 presenta un bosquejo general de dichos impactos a partir de experiencias representativas, con el fin de ofrecer una visión comparativa inicial. Posteriormente, se desarrolla una interpretación detallada que profundiza tanto las particularidades de cada caso como sus implicaciones para las comunidades y los ecosistemas, y su relevancia para el análisis de sostenibilidad en el sector energético.

Para ilustrar los impactos ambientales y sociales asociados a proyectos de energías renovables en distintos territorios del país, se presentan a continuación algunos estudios de caso relevantes. La Tabla 6 sintetiza los principales impactos sociales y ambientales identificados en proyectos representativos de generación renovable.

Tabla 6*Casos representativos de proyectos de energías renovables*

Proyecto	Impactos sociales	Impactos ambientales
Represa del Quimbo (Huila)	Reubicación de las comunidades y cambio de actividades económicas. Desacuerdos entre comunidades	Alteración de ecosistemas acuáticos. Pérdida de biodiversidad. Cambios en ciclos hidrológicos y sedimentación.
Hidroituango y Porvenir II (Antioquia)	Reubicación de las comunidades. Afectación en el acceso a recursos tradicionales. Desacuerdos sociales derivados de la redistribución territorial.	Posible alteración en la calidad del agua. Afectación a especies endémicas. Cambios en el régimen de los ríos y sedimentos. Riesgos posibles de deslizamientos e inundaciones en caso de fallas estructurales.
Parque eólico Guajira 1	Desacuerdos por compensaciones, limitada información y procesos de consulta participativa.	Impactos ambientales relevantes en su fase constructiva, especialmente sobre suelos, cobertura vegetal y ecosistemas del bosque seco,

	Desacuerdos sociales entre comunidades.	además de riesgos para la fauna y alteraciones por la instalación de caminos y redes eléctricas.
Parque eólico	Desacuerdos	Transformaciones
Windpeshi	comunitarios y sobre la distribución de beneficios.	territoriales por la instalación de torres, accesos y redes eléctricas en zonas de pastoreo, con posibles afectaciones a ecosistemas de desierto y bosque seco tropical.

Fuente. Elaboración a partir de información recopilada de (Fescol, 2023); (INDEPAZ, 2022); Valencia y Lozano (2025); Enel Colombia (2023); Ecopetrol (2025)

Como señala el Foro Nacional Ambiental (FNA) y la Friedrich-Ebert-Stiftung (Fescol), en la represa El Quimbo en el departamento del Huila se ha identificado una superficie afectada que alcanza 8.568 hectáreas, dentro de las cuales la alteración de ecosistemas implicó impactos a especies endémicas como la palma *Aiphanes argos*, ya catalogada en peligro de extinción. La transformación ecológica se reflejó también en la modificación de la calidad del agua, en procesos de sedimentación y en la interrupción de ciclos biológicos de especies migratorias, particularmente peces cuyas dinámicas reproductivas dependen directamente del régimen natural del río (FNA & Fescol, 2023).

Al mismo tiempo las afectaciones sociales incidieron, puesto que desde los estudios de 1992 se estimaba la reubicación de 1.537 personas dedicadas principalmente a la pesca y la

agricultura, cuyas actividades tradicionales fueron modificadas, quedando en un proceso de transición el restablecimiento de medios de subsistencia equitativos. La situación limitó la participación de las comunidades, incidiendo además en la capacidad para enfrentar los cambios derivados de la intervención ambiental (FNA & Fescol, 2023).

De forma análoga una situación similar se evidenció en Hidroituango, el proyecto hidroeléctrico más grande del país, ubicado en Antioquia, allí los impactos ambientales han sido ampliamente documentados, la tala de bosques superó las 4.000, dentro de una zona donde habitan más de 160 especies de aves y mamíferos, varias de ellas amenazadas, mientras que la remoción de ecosistemas de bosque ripario y tropical seco representó una pérdida irreversible de hábitats, cuya regeneración tomaría siglos en regenerar. A esto se suma la afectación directa sobre el río Cauca, cuyos cambios en caudal y dinámica ecológica no solo repercutieron en la pérdida de biodiversidad, sino también en el colapso de modos de vida ancestrales basados en la pesca, la agricultura ribereña y la minería artesanal (FNA & Fescol, 2023).

En términos sociales, las investigaciones han estimado que entre 28.664 y 32.000 personas en el área de influencia han enfrentado necesidades básicas insatisfechas derivadas del proyecto, mientras que más de 100.000 habitantes podrían haber sufrido cambios en sus actividades económicas y en su anclaje territorial (FNA & Fescol, 2023, como se citó en Observatorio para la Protección de los Defensores de Derechos Humanos, 2017).

De manera similar, en el proyecto Porvenir II, también en Antioquia, las comunidades fueron reubicadas, quedando en un proceso de transición, además de procesos de reasentamiento que desconocen prácticas culturales locales y profundizan las desigualdades sociales ya existentes (INDEPAZ, 2022).

Por otra parte, se destaca la relevancia de avanzar hacia procesos de compensación que sean suficientes y diferenciados, orientados no solo a los impactos individuales, sino también a la protección de la naturaleza como bien colectivo y del territorio como espacio de reproducción social y cultural. En este sentido, se subraya la importancia de establecer acuerdos o contratos macro con las comunidades, en los cuales se reconozca la propiedad colectiva, la igualdad entre las partes (INDEPAZ, 2022; Corte Constitucional, Sentencia T-730 de 2016).

Para el Proyecto Guajira 1, este precedente adquiere mayor relevancia si se considera la dimensión de expansión proyectada a causa de que están planificados 36 parques adicionales, con al menos 1 500 torres y una capacidad combinada estimada de 5 754 MW lo que aumenta la posibilidad de ocurrencia de impactos sociales, culturales, territoriales y de gobernanza (INDEPAZ, 2022).

Estos casos señalan que la construcción de grandes represas —aunque clasificadas como energías renovables dentro de la matriz eléctrica— pueden generar impactos ambientales que incluyen pérdida de biodiversidad, fragmentación de ecosistemas, emisiones de gases de efecto invernadero, alteración de ciclos hidrológicos y afectación de especies vulnerables. Al mismo tiempo, los impactos sociales pueden generar, situaciones de reubicación, modificación de las actividades económicas en las poblaciones, cambios culturales, e incluso poner en riesgo la seguridad alimentaria en los territorios.

Esta evidencia respalda el argumento de que las energías renovables no son homogéneas en términos de sostenibilidad y que, en el caso colombiano, ciertos modelos —como las grandes hidroeléctricas— pueden generar impactos ambientales y sociales significativos. De allí que una revisión exhaustiva del impacto ambiental y social sea indispensable para evaluar de forma realista la contribución de cada fuente a la sostenibilidad del sector transporte, especialmente en

un país que aspira a electrificar su movilidad con energías verdaderamente limpias, seguras y socialmente justas.

Desde su concepción, Windpeshi se perfiló como un proyecto eólico de 205 MW en el departamento de La Guajira, con el objetivo de aportar energía renovable al sistema eléctrico nacional. Sin embargo, el área planificada para el proyecto alberga una biodiversidad considerable, lo que la convierte en un ecosistema vulnerable, en total se identificaron 129 taxones —111 de fauna y 18 de flora— en la zona; de modo que intervenir el territorio podría afectar especies dependientes de hábitats específicos, como reptiles o anfibios, especialmente sensibles a cambios en humedad, temperatura o cobertura vegetal (Valencia & Lozano, 2025).

Por ende, si se produce fragmentación de hábitats o pérdida de vegetación, no solo estaría en riesgo la biodiversidad, sino también la estabilidad ecológica del entorno, con consecuencias negativas en cascada sobre los ecosistemas locales (Valencia & Lozano, 2025, cómo se citó en Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [ANLA], 2021). En mayo de 2023 la empresa promotora, Enel Colombia, anunció la suspensión indefinida de la construcción del parque considerando desacuerdos con la comunidad e interrupciones en las jornadas de obra, situaciones que dificultaron mantener el ritmo de trabajo (Enel, 2023).

Ese giro no solo revela las dificultades técnicas y financieras detrás del proyecto, sino también señala la necesidad de considerar aspectos sociales y de participación de las comunidades locales hacia la toma de decisiones. El proyecto, ha sido asumido por otra empresa, por lo cual, se espera que, una vez reactivado, genere unos 1.006 GWh/año, lo que cubriría entre el 8 % y 9 % de la demanda del grupo (Ecopetrol, 2025).

Barreras y Oportunidades Para la Adopción de Energías Renovables en el Sector

Transporte

La adopción de energías renovables en el sector transporte colombiano se encuentra condicionada por un conjunto de barreras que limitan la materialización efectiva de la transición energética. Aunque el país ha logrado avances significativos en la diversificación de su matriz de generación eléctrica, estos progresos no se reflejan de manera equivalente en el consumo energético del transporte, el cual continúa caracterizándose por una alta dependencia de los combustibles fósiles (UPME, 2024; IEA, 2023). Este contraste evidencia que las barreras existentes no responden a la ausencia de recursos energéticos o tecnologías, sino a problemáticas estructurales que afectan la articulación entre oferta y demanda energética.

Barreras Energéticas y Estructurales (Impacto Alto)

La principal barrera identificada corresponde al desacople energético entre la generación de energía renovable y el consumo final del sector transporte. A pesar de que la generación eléctrica nacional presenta una elevada participación de fuentes limpias, el transporte depende en más del 96 % de derivados del petróleo, lo que limita de forma sustantiva la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la mejora de la eficiencia energética (IEA, 2023). Este desacople constituye una barrera estructural de alto impacto, ya que impide que el potencial renovable del sistema eléctrico se traduzca en beneficios ambientales directos en el sistema de movilidad.

De esta barrera se deriva una oportunidad estratégica central: la electrificación progresiva del transporte, especialmente en los sistemas urbanos y de transporte público, que permitiría acoplar la demanda energética del sector con la matriz de generación renovable existente y reducir de manera efectiva la intensidad de carbono del transporte.

Barreras Tecnológicas e Infraestructura (Impacto Alto)

En continuidad con el desacople energético, se identifican barreras asociadas a la infraestructura tecnológica, particularmente la limitada disponibilidad y cobertura territorial de infraestructura de recarga. Esta restricción afecta la viabilidad operativa de los vehículos eléctricos, concentra su adopción en grandes centros urbanos y reduce el alcance territorial de la transición energética (UPME, 2024). La insuficiencia de infraestructura no solo limita el uso de tecnologías limpias, sino que refuerza el desacople entre el sector eléctrico y el transporte.

Sin embargo, esta barrera abre una oportunidad clara para la planificación estratégica de infraestructura de carga, alineada con patrones reales de movilidad y con enfoques territoriales diferenciados, lo que permitiría ampliar la adopción de soluciones de transporte eléctrico y fortalecer la integración energética.

Barreras Institucionales, Normativas y de Gobernanza (Impacto Alto)

Las barreras institucionales y normativas, abordadas de forma conjunta, constituyen otro eje estructural de alto impacto. La fragmentación entre los sectores de energía, transporte y ambiente ha dificultado la formulación e implementación de políticas integradas, generando debilidades en la planificación, ejecución y seguimiento de estrategias de movilidad sostenible (Ministerio de Minas y Energía, 2025; OCDE, 2022). Esta falta de articulación institucional amplifica las barreras energéticas y tecnológicas, al impedir una coordinación efectiva entre generación, infraestructura y demanda.

Desde esta barrera se desprende la oportunidad de avanzar hacia esquemas de gobernanza intersectorial y multinivel, que integren de manera coherente las políticas públicas y fortalezcan la capacidad de los distintos niveles de gobierno para implementar estrategias de transición energética en el transporte.

Barreras Económicas (Impacto Medio)

En un nivel de impacto intermedio se ubican las barreras económicas, relacionadas principalmente con los altos costos iniciales de las tecnologías limpias y de la infraestructura asociada. Aunque los costos han disminuido progresivamente a nivel global, en el contexto colombiano estas barreras económicas continúan limitando la adopción masiva, especialmente en sectores con menores capacidades financieras (IEA, 2023).

No obstante, estas restricciones económicas evidencian oportunidades asociadas al diseño de incentivos financieros, mecanismos de apoyo público y economías de escala, que pueden facilitar el acceso progresivo a tecnologías limpias y acelerar su adopción sin comprometer la sostenibilidad fiscal.

Barreras Territoriales y Sociales (Impacto Derivado)

Finalmente, se identifican barreras de carácter territorial y social, relacionadas con los conflictos por el uso del suelo y la aceptación social de proyectos energéticos. En regiones con alto potencial renovable, la falta de mecanismos de participación temprana y concertación ha generado tensiones con comunidades locales, afectando la legitimidad y continuidad de los proyectos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023). Si bien estas barreras presentan un impacto más localizado, pueden retrasar significativamente iniciativas estratégicas.

Estas barreras ponen de manifiesto la oportunidad de fortalecer procesos de gobernanza territorial y participación social, orientados a integrar las necesidades de las comunidades con los objetivos de transición energética.

En conjunto, las barreras para la adopción de energías renovables en el sector transporte colombiano presentan una jerarquía clara de impacto, donde los desafíos energéticos, de infraestructura y de gobernanza constituyen los principales cuellos de botella estructurales. No

obstante, estas mismas barreras revelan oportunidades estratégicas que, si se abordan de manera articulada, pueden acelerar la transición hacia un sistema de movilidad más sostenible, eficiente y coherente con los objetivos nacionales de descarbonización, lo que sirve de base para el desarrollo de las estrategias analizadas en el capítulo siguiente.

Con el fin de sintetizar y priorizar las barreras analizadas, la Tabla 7 presenta una visión integrada que permite identificar su nivel de impacto, su carácter estructural y las oportunidades estratégicas que se derivan de cada una.

Con el objetivo de integrar y jerarquizar las barreras analizadas, se elaboró una síntesis que permite identificar su nivel de impacto y las oportunidades estratégicas asociadas. La Tabla 7 presenta la priorización de las barreras para la adopción de energías renovables en el sector transporte colombiano.

Tabla 7

Síntesis y priorización de barreras para la adopción de energías renovables en el sector transporte colombiano

Orden del análisis	Tipo de barrera	Nivel de impacto	Naturaleza de la barrera	Problema central identificado	Oportunidad estratégica derivada
1	Energética	Alto	Estructural	Desacople entre generación renovable y consumo energético del transporte	Electrificación progresiva del transporte y acoplamiento sector eléctrico–movilidad

Orden del análisis	Tipo de barrera	Nivel de impacto	Naturaleza de la barrera	Problema central identificado	Oportunidad estratégica derivada
2	Tecnológica / Infraestructura	Alto	Estructural	Infraestructura de recarga insuficiente y concentrada territorialmente	Planeación estratégica y expansión de infraestructura de carga
3	Institucional / Normativa / Gobernanza	Alto	Estructural	Fragmentación entre políticas de energía, transporte y ambiente	Gobernanza intersectorial y multinivel
4	Económica	Medio	Condicionante	Altos costos iniciales de tecnologías limpias	Incentivos financieros y economías de escala
5	Territorial	Derivado	Dependiente	Conflictos por uso del suelo en proyectos energéticos	Planeación territorial integrada
6	Social	Derivado	Dependiente	Limitada aceptación social y participación comunitaria	Gobernanza territorial y participación social

Fuente: Elaboración a partir del análisis del Capítulo.

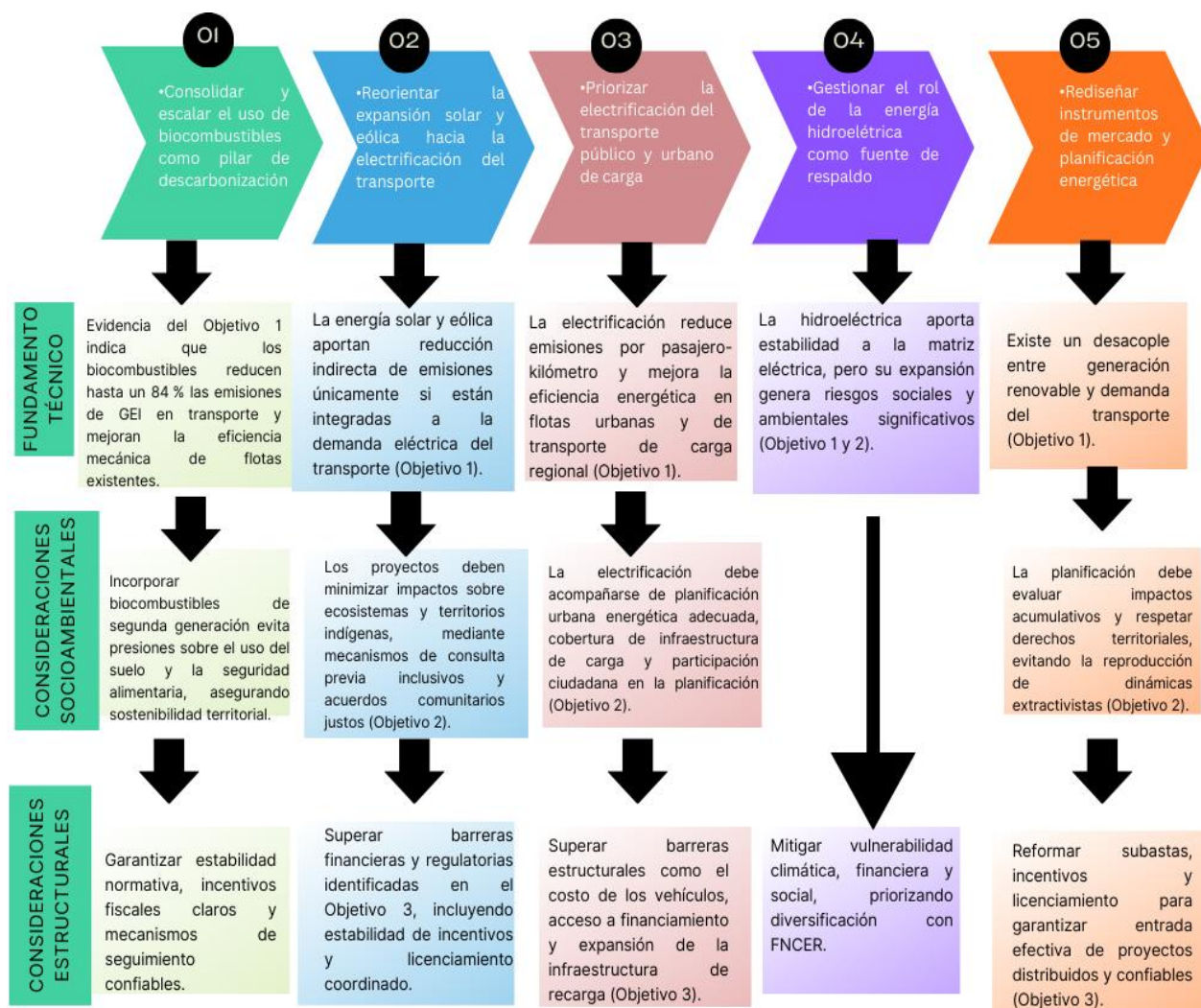
Esta síntesis evidencia que las barreras de mayor impacto corresponden a factores estructurales relacionados con la articulación energética, la infraestructura y la gobernanza, las cuales constituyen los principales puntos de intervención estratégica abordados en el capítulo siguiente.

Propuesta de Estrategias Orientadas a Fortalecer el Uso de Energías Renovables

La formulación de estrategias que se presenta en la figura 4 no se deriva de manera aislada del análisis de barreras, sino que constituye una traducción estratégica de los hallazgos técnicos, socioambientales y normativos identificados a lo largo de los tres objetivos específicos. En consecuencia, cada estrategia responde simultáneamente a: (i) la evidencia empírica sobre el aporte real de las energías renovables a la sostenibilidad del transporte (Objetivo específico 1); (ii) los impactos ambientales, sociales y territoriales asociados a su despliegue (Objetivo específico 2); y (iii) las condiciones económicas, institucionales y normativas que condicionan su implementación efectiva (Objetivo específico 3).

Figura 4

Estrategias orientadas al fortalecimiento de energías renovables



Estrategia 1: Consolidar y Escalar el Uso de Biocombustibles Como Pilar de Descarbonización

Esta estrategia se fundamenta en la capacidad técnica de los biocombustibles para reducir emisiones y mejorar la eficiencia mecánica de las flotas actuales sin requerir una transformación total de la infraestructura logística. Al transitar hacia biocombustibles de segunda generación, el estudio aborda factores socioambientales críticos como la seguridad alimentaria y la

sostenibilidad del uso del suelo en regiones agroindustriales. Normativamente, se propone garantizar la estabilidad mediante incentivos fiscales y marcos claros que fomenten alianzas con productores locales, asegurando que la inversión en almacenamiento y distribución sea financieramente viable y territorialmente equilibrada.

En particular, la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) documenta que el programa RenovaBio en Brasil constituye un marco de política pública diseñado para promover el uso de biocombustibles mediante un enfoque basado en desempeño ambiental. Según documentos oficiales de la política —creada por la Ley 13.576 de 2017— este esquema reconoce explícitamente la contribución de los biocombustibles a la seguridad energética y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), estableciendo mecanismos de certificación y mercado que valoran externalidades ambientales y promueven la sostenibilidad en la producción agrícola y energética.

De acuerdo con OLADE (2024), el diseño del programa se fundamenta en la medición de la intensidad de carbono de los biocombustibles ($\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$), calculada a partir de metodologías de análisis de ciclo de vida, y en la generación de Créditos de Descarbonización (CBIOs) como instrumentos transables. Este sistema establece metas anuales de descarbonización para los distribuidores de combustibles y asigna incentivos diferenciados a los productores en función de su desempeño ambiental, premiando reducciones de emisiones más ambiciosas frente a enfoques regulatorios de carácter uniforme adoptados en otros contextos, como Estados Unidos o la Unión Europea (pp. 31-32).

Por tanto, su diseño institucional resulta congruente con la estrategia aquí planteada, en la medida en que evidencia la importancia de la estabilidad normativa y de incentivos fiscales de

largo plazo para garantizar la viabilidad de inversiones en almacenamiento y distribución de combustibles renovables

De forma complementaria, el análisis comparado de Canabarro et al. (2023) la evaluación de sostenibilidad de biocombustibles líquidos basada en el análisis de ciclo de vida aplicadas a contextos latinoamericanos en países como Argentina, Brasil, Colombia y Guatemala evidencia que la expansión del etanol y el biodiésel puede contribuir de manera consistente a la descarbonización del transporte sin comprometer la eficiencia energética del sistema. El estudio de Canabarro cuantifica reducciones del potencial de calentamiento global frente a combustibles fósiles que oscilan entre 66 % y 81 % para etanol, y entre 68 % y 84 % para biodiésel, con los valores más altos registrados en Colombia. Estos resultados confirman que los biocombustibles presentan reducciones de emisiones netas sustantivas cuando se comparan con gasolina y diésel bajo metodologías homogéneas de ciclo de vida.

Desde una perspectiva energética, los autores reportan relaciones energy ratio positivas que varían entre 2,5 y 9,3 MJ de producción renovable producida por cada MJ de insumo fósil incorporado al proceso, así como balances netos favorables en todas las rutas analizadas. De allí que los indicadores respaldan técnicamente la viabilidad de los biocombustibles como vector de transición, al demostrar que no sólo reducen emisiones de GEI, sino que también generan excedentes energéticos significativos a lo largo de su cadena productiva, condición clave para su escalamiento sin dependencia creciente de insumos fósiles (Canabarro et al., 2023).

Estrategia 2: Reorientar la Expansión Solar y Eólica Hacia la Electrificación del Transporte

La propuesta señala el hallazgo de que la generación eólica y solar permite una reducción indirecta de GEI al limpiar la matriz eléctrica que alimenta la movilidad. No obstante, reconoce que su éxito depende de minimizar las afectaciones en ecosistemas y territorios étnicos mediante

mecanismos de consulta previa y participación ciudadana. Desde la perspectiva normativa, la estrategia se enfoca en superar las barreras financieras y la fragmentación administrativa en el licenciamiento, garantizando que la expansión energética sea coherente con la demanda creciente del sector transporte.

Un estudio publicado por Ma. et al. (2025) evidencia que la incorporación de sistemas fotovoltaicos integrados a estaciones de recarga para flotas de autobuses eléctricos urbanos en China ha permitido reducir simultáneamente las emisiones de carbono y los costos operativos del sistema de transporte. Los resultados muestran reducciones de emisiones de hasta aproximadamente el 41,46 %, asociadas no solo a la sustitución de electricidad de origen fósil, sino también a la mitigación de picos de demanda eléctrica. Adicionalmente, estos esquemas favorecen el desplazamiento del consumo hacia franjas horarias con mayor disponibilidad solar, lo que reduce presiones sobre la red y limita la necesidad de inversiones adicionales en infraestructura de transmisión y distribución (Ma et al., 2025).

Desde un enfoque sistémico Pranawengkapti et al. (2025) coinciden en que la integración del transporte eléctrico en los sistemas eléctricos en el sector coupling, no debe concebirse únicamente como un aumento de la demanda, sino como una fuente estratégica de flexibilidad operativa que facilita la incorporación de fuentes renovables variables, particularmente la solar y la eólica. En este marco, los vehículos eléctricos —a través de esquemas de carga controlada, carga bidireccional (V2G) y su articulación con microrredes— permiten mitigar restricciones estructurales asociadas a la intermitencia, los picos de demanda y los vertimientos de generación renovable en períodos de baja absorción del sistema (Pranawengkapti et al., 2025).

En tal sentido, cuando la electrificación del transporte se modula con mecanismos de gestión inteligente de la demanda, es posible alinear los perfiles de carga vehicular con los

períodos de alta generación solar y eólica, reduciendo tensiones en la red eléctrica y optimizando el aprovechamiento de la capacidad instalada renovable (Pranawengkapti et al., 2025). Vale mencionar que, en contextos con un crecimiento acelerado de los vehículos eléctricos, sin planificación coordinada, se podría generar sobrecargas en la infraestructura eléctrica existente y comprometer la estabilidad del sistema.

A este respecto, la electrificación del transporte público urbano exhibe ventajas comparativas claras en comparación con otros segmentos de movilidad, debido a su elevada intensidad energética por kilómetro recorrido, su operación predecible y concentrada, y la disponibilidad de puntos de estacionamiento centralizados que proporcionan la ejecución de infraestructura de carga controlada y tecnologías V2G. Medios de transporte representativos, como las flotas de autobuses eléctricos, taxis y servicios de movilidad compartida pueden operar como activos energéticos distribuidos, capaces no solo de consumir electricidad renovable, sino también de contribuir servicios de flexibilidad al sistema eléctrico durante períodos críticos (Pranawengkapti et al., 2025).

Estrategia 3: Priorizar la Electrificación del Transporte Público y Urbano de Carga

Esta acción responde a la alta eficiencia energética demostrada por la tracción eléctrica en ciclos urbanos. Para que esta transición sea socialmente sostenible, se plantea acompañarla de una planificación urbana energética que garantice infraestructura de recarga suficiente y accesible. En el ámbito económico y normativo, se sugieren instrumentos para mitigar el alto costo de adquisición de vehículos eléctricos y facilitar el acceso a financiamiento, integrando fuentes renovables distribuidas que aseguren la resiliencia del suministro eléctrico en las ciudades.

La electrificación de flotas de buses y otros servicios públicos puede contribuir de manera significativa a la reducción de emisiones y a la mejora de la eficiencia energética en entornos urbanos, especialmente cuando se acompaña de una infraestructura de recarga adecuada y de un suministro eléctrico con alta participación de fuentes renovables. La literatura internacional muestra que los autobuses eléctricos eliminan las emisiones locales de contaminantes atmosféricos como NO₂ y material particulado fino, reducen de forma sustancial el consumo energético por kilómetro recorrido frente a tecnologías diésel y disminuyen la contaminación acústica en áreas urbanas densamente pobladas (UNEP, 2018; ITDP, 2023). Asimismo, estudios de evaluación de ciclo de vida y revisiones sistemáticas evidencian que los beneficios climáticos de los buses eléctricos se maximizan cuando la matriz eléctrica presenta una alta proporción de energías limpias, consolidándolos como una estrategia clave para la descarbonización del transporte urbano (Ribeiro et al., 2024; IEA, 2023).

En esta línea, Sistig et al. (2025) evalúan la electrificación de flotas de autobuses desde una perspectiva operativa y de desempeño energético, incorporando el análisis del costo total de propiedad (TCO), la demanda de vehículos y conductores, la reorganización de horarios, la asignación de rutas y la programación de recarga. Su estudio —basado en veinte redes de transporte representativas— demuestra que la transición hacia autobuses eléctricos exige ajustes operativos, como la reconfiguración de itinerarios y la integración de recargas de alta potencia, pero confirma que estos desafíos son técnica y económicamente manejables.

Los resultados muestran que las redes electrificadas pueden operar de manera eficiente mediante ajustes moderados en la programación (p. ej., ampliación del número de vehículos en un 13 % y de deberes de conducción en un 6 %), mientras que la recarga rápida ofrece ventajas operativas superiores a las obtenidas simplemente aumentando la capacidad de las baterías. En

conclusión, la evidencia indica que la adopción de flotas eléctricas en el transporte público es viable, siempre que exista planificación integrada entre infraestructura, operación y políticas de apoyo, lo cual refuerza su papel como estrategia clave para la descarbonización del transporte urbano.

De manera complementaria, Heide et al. (2025), menciona que los frameworks integrados de planificación desarrollados para sistemas de transporte como el de Berlín evidencian que una transición eficiente requiere la incorporación de simulaciones de consumo, la asignación estratégica de infraestructura de recarga en cocheras y la implementación de esquemas de recarga inteligente. En conjunto, estos elementos confirman el carácter imperativo de articular la planificación urbana y energética con el despliegue progresivo de flotas eléctricas.

Así mismo, modelos de optimización de carga de autobuses eléctricos en Bruselas evidencian que estrategias avanzadas de programación integrada —que combinan infraestructura de recarga en depósito, generación fotovoltaica, almacenamiento energético, tarifas horarias dinámicas y gestión de picos de demanda— pueden reducir significativamente los costos operativos totales y mejorar la administración de la demanda energética. Por ejemplo, Caustur et al. (2025) encontraron que la incorporación de tarifas por potencia, PV y ESS permitió reducir los costos netos hasta en un 56 %, y hasta un 58 % cuando todas las extensiones del modelo se aplican simultáneamente, demostrando el alto valor de la optimización inteligente del proceso de (des)carga de buses eléctricos. Asimismo, Verbrugge et al. (2022) demostraron que algoritmos de optimización en tiempo real pueden reducir los costos de recarga hasta un 10 % bajo esquemas de precios dinámicos.

Alternativas como la señalada no solo validan la viabilidad técnica y económica de electrificar flotas urbanas, sino que también confirman que, con la debida planificación

energética integrada, el modelo es replicable más allá de grandes capitales asiáticas o latinoamericanas. En particular, estudios recientes como el de Sistig et al. (2025) muestran que la electrificación completa de redes de autobuses en contextos europeos —incluyendo ajustes operativos, de rutas y programación de recarga— es factible incluso considerando incrementos moderados en costos y necesidades adicionales de vehículos y personal, lo que reafirma la generalización de estos enfoques en distintos sistemas de transporte urbano.

Finalmente, estudios de optimización aplicados a redes reales de autobuses eléctricos procedentes de Durham (Canadá) y Canberra (Australia) señalan que la coordinación entre infraestructura de recarga, disponibilidad solar y programación horaria reduce la dependencia de la red eléctrica convencional y atenúa los costos asociados al consumo en periodos de alta demanda (Marussich et al., 2025). A partir de modelos de programación lineal construidos con datos empíricos de irradiancia, tarifas eléctricas y restricciones operativas, los autores constatan que la recarga alineada con las ventanas de mayor generación fotovoltaica mejora el desempeño energético de flotas urbanas cercanas a 100 autobuses eléctricos por ciudad (Marussich et al., 2025).

Paralelamente, los resultados cuantitativos registran reducciones de costos operativos del 16,48 % en Durham y del 32,00 % en Canberra, diferencias vinculadas a la variabilidad del recurso solar y a las estructuras tarifarias locales (Marussich et al., 2025). Asimismo, los escenarios óptimos delimitan rangos técnicos de dimensionamiento —áreas fotovoltaicas entre 1.500 y 1.800 m² y capacidades de almacenamiento entre 600 y 900 kWh— que maximizan el aprovechamiento de energía renovable sin inducir ineficiencias económicas u operativas, reforzando la pertinencia de acompañar la electrificación del transporte público con

infraestructura de recarga estratégicamente planificada y fuentes renovables distribuidas (Marussich et al., 2025).

Estrategia 4: Gestionar el Rol de la Energía Hidroeléctrica Como Fuente de Respaldo

La estrategia reconoce que la hidroelectricidad es la columna vertebral de la firmeza del sistema eléctrico nacional. Sin embargo, para mitigar los riesgos ambientales y sociales asociados a grandes represas, se propone modernizar la infraestructura existente y diversificar el respaldo mediante energía solar, eólica y bioenergía. Este enfoque técnico resulta esencial para reducir la vulnerabilidad climática ante fenómenos como El Niño, dado que el cambio climático está incrementando la variabilidad hidrológica y afectando la disponibilidad de agua para generación eléctrica en América Latina (IEA, 2021).

De hecho, la información reportada a nivel internacional señala que la hidroelectricidad cumple un papel central como fuente de respaldo operativo en sistemas eléctricos con alta penetración de energías renovables variables, al aportar flexibilidad, estabilidad y capacidad de respuesta ante variaciones en la generación solar y eólica (IEA, 2021). Primeramente, la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2021) documenta que en países como Noruega y Canadá la generación hidroeléctrica con embalses actúa como un componente de almacenamiento natural capaz de compensar variaciones horarias y estacionales de la energía solar y eólica, atenuando la necesidad de recurrir a generación térmica fósil. El informe de la IEA resalta que esta flexibilidad resulta crítica en escenarios de electrificación del transporte, en tanto permite sostener el suministro eléctrico sin trasladar emisiones al sistema energético (IEA, 2021).

De forma complementaria, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2023), a través de su análisis técnico sobre la transición energética en América Latina y el Caribe, constata que en Brasil la capacidad de regulación de los embalses hidroeléctricos ha sido concluyente para

integrar la rápida expansión de energía eólica y solar sin involucrar la estabilidad del sistema eléctrico. El BID resalta que esta función de respaldo ha reconocido desplazar generación fósil marginal en sectores intensivos en consumo eléctrico, incluido el transporte electrificado, fortaleciendo la seguridad energética en escenarios de alta variabilidad renovable.

Por último, en el contexto europeo, la IEA (2023) destaca que la creciente interdependencia entre sistemas con alta penetración de generación eólica y solar (por ejemplo, en Alemania) y aquellos con capacidad hidroeléctrica regulable (por ejemplo, en lugares como Suiza) ha fortalecido la flexibilidad del sistema eléctrico regional, al permitir una mejor gestión de excedentes renovables y una reducción del recurso a fuentes fósiles de respaldo. Este esquema de complementariedad resulta especialmente relevante en escenarios de aumento de la demanda eléctrica asociados a la electrificación del transporte, en la medida en que contribuye a mantener la seguridad del suministro sin comprometer los objetivos de descarbonización.

Estrategia 5: Rediseñar Instrumentos de Mercado y Planificación Energética

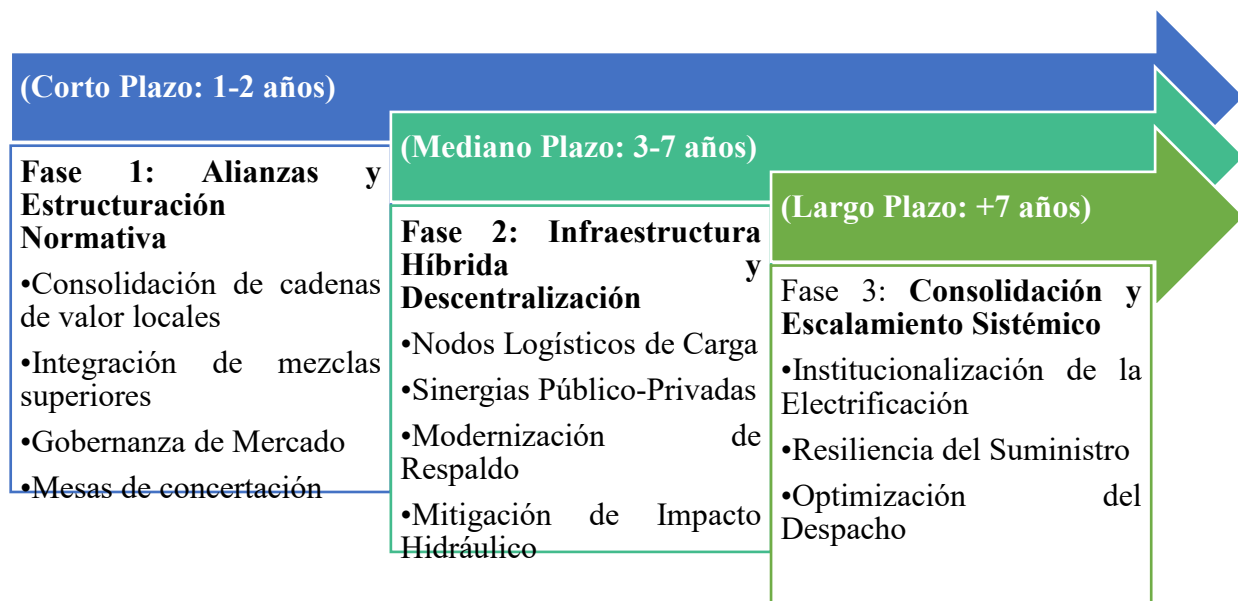
Esta estrategia aborda el desajuste estructural entre la oferta de generación y la demanda específica del transporte, propone una reforma en las subastas e incentivos para permitir la participación de proyectos de energía distribuida, incorporando criterios que consideren los impactos acumulativos en los territorios. Al fortalecer la gobernanza compartida entre el sector público, privado y las comunidades locales, se asegura que el diseño de mercado actúe como un catalizador de la transición.

Bajo este enfoque, la necesidad de una reconfiguración regulatoria se sustenta en la tipología de regiones energéticas propuesta por Martínez et al. (2025). De acuerdo con esta investigación, los territorios con alta dependencia de combustibles fósiles requieren activar redes y arreglos comunitarios, junto con prácticas de innovación social, para salir del estancamiento de

carbono. En consecuencia, la transición hacia una fase de aceleración solo se vuelve viable cuando los actores locales evolucionan hacia “regiones de aprendizaje”, donde la cooperación y una misión colectiva permiten desviarse de las trayectorias fósiles y habilitan la adopción de nuevos instrumentos de mercado y planificación.

En esta misma línea, Ru et al. (2025) muestran que la integración de tecnologías Vehículo-Red (V2G) ha pasado de la etapa experimental a constituir un pilar de flexibilidad operativa: la infraestructura de carga, lejos de ser un activo pasivo, puede y debe participar en el mercado eléctrico como proveedor de servicios auxiliares y de regulación de frecuencia. Con ello, se mejora la estabilidad del sistema frente a la intermitencia de las fuentes renovables y se habilita una coordinación más eficiente entre demanda, oferta distribuida y señales de precio, acelerando la transición sin comprometer la seguridad operativa.

Para dotar a las estrategias de una dimensión operativa y evitar que permanezcan en un plano estrictamente conceptual, en la figura 5 se propone un esquema de implementación estructurado en tres horizontes temporales. La figura 5 señala las acciones necesarias para materializar el cambio sistémico, asegurando una transición gradual que responda a las capacidades técnicas, financieras y territoriales del país.

Figura 5*Roadmap de Implementación Táctica*

Fuente. Elaborada con información recopilada de *U.S. Department of Energy (DOE). Energy Transitions Playbook (fases secuenciales de implementación)*.

<https://www.eere.energy.gov/etiplaybook/> (consulta: mar-2026).

Fase 1: Estabilización y Alianzas Estratégicas (Corto Plazo)

Esta fase inicial se enfoca en la creación de las condiciones habilitantes para la transición, partiendo del diagnóstico compartido por autores como Cerdá et al. (2022) y González et al. (2023), quienes identifican la fragmentación institucional y las barreras económicas como obstáculos primarios. En consecuencia, la gestión de cadenas de suministro con productores locales busca activar el potencial de la biomasa residual, un recurso cuyo valor estratégico para la economía circular y el transporte regional ha sido señalado en la literatura revisada (Cerdá et al., 2022; González et al., 2023).

De manera complementaria, la optimización de flotas mediante mezclas superiores de biocombustibles es una estrategia de descarbonización inmediata que encuentra su soporte en los análisis de ciclo de vida presentados por Canabarro et al. (2023) y en los informes sectoriales que destacan la viabilidad técnica y los beneficios operativos de estas mezclas, representando una transición incremental sin ruptura tecnológica (Canabarro et al., 2023; Fedebiocombustibles, 2024).

Por otro lado, la propuesta de reformar la gobernanza de mercado incorporando criterios de confiabilidad responde directamente al análisis de Rangel et al. (2024), quienes identifican las limitaciones de las subastas actuales para integrar tecnologías que aporten valor sistémico más allá del precio marginal. Por lo tanto, el rediseño de los mecanismos de mercado y de los esquemas de remuneración por confiabilidad (Rangel et al., 2024) es un requerimiento para alinear la planificación energética con las necesidades de un transporte electrificado y flexible (Rangel et al., 2024). Asimismo, el establecimiento de mesas de concertación puede facilitar el establecimiento de acuerdos entre los actores involucrados (Indepaz, 2022; Foro Nacional Ambiental, 2023).

En síntesis, esta acción busca institucionalizar un modelo de gobernanza que priorice el aprendizaje colectivo y la legitimidad social como base para la acción, evitando así los bloqueos que retrasan los proyectos (Martínez et al., 2025).

Fase 2: Infraestructura Híbrida y Descentralización (Mediano Plazo)

Una vez sentadas estas bases normativas y de consenso, la transición avanza en esta fase hacia la intervención física, guiada por el principio de sector coupling o acoplamiento sectorial (Pranawengkapti et al., 2025). El despliegue de nodos energéticos distribuidos cerca de los centros de demanda del transporte opera este principio, formándose con estudios de optimización

que demuestran la eficiencia de integrar generación renovable local con infraestructura de carga. Este enfoque, a su vez, refuerza la premisa de que la electrificación del transporte, lejos de ser una carga pasiva, puede convertirse en un elemento de flexibilidad para la red (Caustur et al., 2025).

Además, las alianzas público-privadas en el territorio permiten materializar beneficios compartidos e incentivar la participación social, incorporando aprendizajes de proyectos pasados, impulsando la gestión territorial y promoviendo la relación con las comunidades. En materia de confiabilidad, la construcción de una resiliencia híbrida —que diversifica las fuentes de respaldo más allá de la hidroeléctrica— se fundamenta tanto en el marco conceptual de resiliencia organizacional y adaptativa propuesto por Duchek (2020) como en los diagnósticos recientes sobre la vulnerabilidad del sistema energético nacional elaborados por UPME (2025) y Corficolombiana (2021). Estas referencias coinciden en que la transición requiere mecanismos capaces de responder a variabilidad climática, gestionar riesgos sistémicos y sostener la expansión de la electrificación sin comprometer la estabilidad operativa. (Corficolombiana, 2021; Duchek, 2020; UPME, 2025).

Por consiguiente, esta estrategia busca reducir la dependencia de un solo recurso, tal como lo sugiere la literatura sobre transiciones energéticas seguras. Finalmente, la priorización de tecnologías con menor huella territorial y social para nuevas obras de generación es una respuesta directa a las lecciones de los estudios de caso de grandes proyectos hidroeléctricos y eólicos (FNA & Fescol, 2023; INDEPAZ, 2022; Valencia & Lozano, 2025), cuyos profundos impactos socioambientales han sido ampliamente documentados. Es decir, se trata de elegir trayectorias tecnológicas que, desde su diseño, eviten replicar situaciones de impacto social y ambiental

Fase 3: Consolidación y Normalización del Ecosistema (Largo Plazo)

Tras la implementación de las anteriores fases, en esta última etapa, se busca la consolidación del nuevo paradigma, donde la movilidad sostenible se institucionaliza como norma. En primer lugar, la creación de incentivos integrales para la electrificación masiva representa la materialización de los lineamientos establecidos en los instrumentos de política nacional analizados (como, por ejemplo, la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica y el CONPES 4075). De esta manera, la institucionalización busca superar definitivamente las barreras de acceso que actualmente limitan la adopción, tal como lo señalan los análisis del mercado vehicular (ANDEMOS, 2025; OLADE, 2024).

En paralelo, alcanzar una resiliencia basada en el suministro distribuido significa, en esta etapa, haber cerrado operativamente la brecha entre la generación renovable y la demanda del sector transporte, un desacople estructural identificado como crítico en el análisis de la matriz energética nacional. Para lograrlo, la optimización dinámica del sistema, con criterios de flexibilidad avanzada, será posible gracias a la integración de tecnologías habilitadoras como la de Vehículo-a-Red (V2G) (U.S. Department of Energy, 2025; Ru et al., 2025).

En definitiva, su adopción permitiría gestionar la flota eléctrica como un activo de red, optimizando el uso del vasto potencial eólico y solar nacional descrito en estudios de potencial energético. De este modo, el sistema alcanzaría un estado de madurez en el que la sinergia entre generación renovable, almacenamiento y demanda flexible del transporte se gestiona de manera eficiente y automatizada, consolidando un modelo de movilidad bajo en carbono que es, al mismo tiempo, un pilar de un sistema energético nacional más seguro, descentralizado y resiliente (Du et al., 2025; IEA, 2026).

Con el fin de fortalecer la coherencia entre el diagnóstico de barreras y las propuestas formuladas, se presenta a continuación una matriz que articula las estrategias orientadas al fortalecimiento del uso de energías renovables con los problemas estructurales identificados y los impactos esperados en la transición energética del sector transporte.

Para fortalecer la trazabilidad entre el diagnóstico de barreras y las propuestas estratégicas, se elaboró una matriz que articula los problemas estructurales con las estrategias formuladas y sus impactos esperados. La Tabla 8 presenta dicha relación de manera integrada.

Tabla 8

Matriz estrategia–problema–impacto esperado para la transición energética del transporte en Colombia

Estrategia	Problema estructural que aborda	Dimensión de intervención	Impacto esperado en la transición energética del transporte
Estrategia 1. Consolidar y escalar el uso de biocombustibles como pilar de descarbonización	Alta dependencia de combustibles fósiles, especialmente en transporte pesado y de carga	Energética – Productiva	Reducción progresiva de emisiones en segmentos difíciles de electrificar y aprovechamiento de capacidades agroindustriales existentes
Estrategia 2. Reorientar la	Desacople entre la expansión de energías	Energética – Tecnológica	Mayor acoplamiento entre

Estrategia	Problema estructural que aborda	Dimensión de intervención	Impacto esperado en la transición energética del transporte
expansión solar y eólica hacia la electrificación del transporte	renovables y el consumo energético del transporte		generación renovable y demanda final del transporte, reduciendo la intensidad de carbono del sector
Estrategia 3. Priorizar la electrificación del transporte público y urbano de carga	Baja eficiencia energética del sistema de movilidad y dependencia del diésel en entornos urbanos	Tecnológica – Urbana	Disminución significativa de emisiones locales, mejora de la calidad del aire y aumento de la eficiencia energética del transporte urbano
Estrategia 4. Gestionar el rol de la energía hidroeléctrica como fuente de respaldo	Vulnerabilidad del sistema eléctrico y necesidad de respaldo para la electrificación del transporte	Energética – Sistémica	Mayor estabilidad del suministro eléctrico para el transporte electrificado y reducción de riesgos asociados a la variabilidad renovable
Estrategia 5. Rediseñar	Fragmentación institucional, barreras	Institucional – Económica	Fortalecimiento de la gobernanza energética,

Estrategia	Problema estructural que aborda	Dimensión de intervención	Impacto esperado en la transición energética del transporte
instrumentos de mercado y planificación energética	económicas y débil articulación entre políticas sectoriales		mayor coherencia regulatoria y aceleración de la adopción de tecnologías limpias

Fuente: Elaboración a partir de las estrategias formuladas en la Figura 4.

La identificación explícita de los impactos esperados permite, a su vez, definir indicadores de seguimiento que faciliten la evaluación del avance y efectividad de las estrategias propuestas, reforzando la trazabilidad entre diagnóstico, intervención y resultados.

Con el fin de fortalecer la trazabilidad y el carácter evaluable de las estrategias propuestas, en la tabla 9 se definen indicadores de seguimiento asociados a cada una de las líneas estratégicas, los cuales permiten orientar el monitoreo de su implementación y contribuir a la evaluación de su impacto en la transición energética del sector transporte.

Tabla 9

Indicadores de seguimiento para las estrategias de fortalecimiento del uso de energías renovables en el transporte

Estrategia)	Indicador de seguimiento	Unidad de medida	Propósito del indicador
Estrategia 1. Consolidar y escalar el uso de biocombustibles como pilar de descarbonización	Participación de biocombustibles en el consumo energético del transporte	% del consumo total	Evaluar el grado de sustitución de combustibles fósiles en segmentos difíciles de electrificar
Estrategia 2. Reorientar la expansión solar y eólica hacia la electrificación del transporte	Proporción de generación renovable destinada al suministro eléctrico del transporte	% de la generación renovable	Medir el acoplamiento efectivo entre expansión renovable y demanda del sector transporte
Estrategia 3. Priorizar la electrificación del transporte público y urbano de carga	Participación de vehículos eléctricos en flotas públicas y de carga urbana	% del total de flota	Evaluar el avance de la electrificación en los segmentos de mayor impacto ambiental urbano
Estrategia 4. Gestionar el rol de la energía hidroeléctrica como fuente de respaldo	Capacidad hidroeléctrica disponible como respaldo del sistema eléctrico	MW disponibles	Medir la resiliencia y estabilidad del suministro para el transporte electrificado

Estrategia)	Indicador de seguimiento	Unidad de medida	Propósito del indicador
Estrategia 5. Rediseñar instrumentos de mercado y planificación energética	Existencia y alcance de instrumentos económicos y de planificación integrados	Número de instrumentos	Evaluar el fortalecimiento institucional y la coherencia regulatoria de la transición

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de los capítulos.

La definición de estos indicadores permite proyectar las estrategias más allá del análisis conceptual, facilitando su seguimiento en el mediano y largo plazo y reforzando el vínculo entre diagnóstico, intervención estratégica e impacto esperado en el sector transporte colombiano.

Conclusiones

El presente estudio tuvo como objetivo general analizar el impacto de las energías renovables en la sostenibilidad del sector transporte en Colombia. A partir de la revisión documental realizada, se concluye que la problemática del transporte no se restringe únicamente al nivel de emisiones, sino que responde a un desacople estructural entre una matriz de generación eléctrica mayoritariamente limpia, con alrededor del 74 % de origen hidroeléctrico, y un consumo energético del transporte que alcanza aproximadamente 518 PJ, con una dependencia del 96 % de combustibles fósiles. Este desequilibrio limita el aprovechamiento efectivo del potencial renovable del país y perpetúa un modelo de movilidad intensivo en carbono e ineficiente desde el punto de vista energético.

En relación con los objetivos específicos orientados a analizar los tipos de energías renovables disponibles y evaluar su impacto ambiental y social, se concluye que Colombia cuenta con un amplio potencial en fuentes como la hidroeléctrica, la solar, la eólica y los biocombustibles; sin embargo, su aplicación en el transporte ha sido desigual y limitada. El parque automotor nacional continúa dominado por tecnologías de combustión interna, en un contexto donde las motocicletas representan cerca del 62 % del total de vehículos y el transporte de carga concentra alrededor del 32 % del consumo energético. Esta configuración profundiza la ineficiencia del sistema, dado que más del 50 % de la energía se pierde en forma de calor, lo que incrementa las emisiones, deteriora la calidad del aire urbano y afecta la salud y la calidad de vida de la población.

Respecto al objetivo específico de identificar barreras y oportunidades para la adopción de energías renovables en el sector transporte, el análisis evidencia que los principales obstáculos son de carácter estructural. Entre ellos se destacan el desacople energético entre generación y

demanda, la limitada infraestructura de recarga, la fragmentación institucional y las barreras económicas para la adopción de tecnologías limpias. No obstante, estas limitaciones también revelan oportunidades estratégicas para fortalecer la electrificación del transporte, consolidar el uso de biocombustibles en segmentos de difícil electrificación, mejorar la gobernanza intersectorial y articular de manera más coherente la planificación energética y del transporte.

Finalmente, en coherencia con el objetivo específico orientado a proponer estrategias, se concluye que la transición energética del transporte colombiano requiere enfoques diferenciados y territoriales. La descarbonización del transporte de carga y de los corredores logísticos en regiones como Meta, Santander y Huila depende en gran medida del fortalecimiento de los biocombustibles, mientras que en áreas metropolitanas como Bogotá, Medellín y el Valle del Cauca las estrategias deben priorizar la electrificación del transporte público y urbano. Adicionalmente, la gestión del rol de la energía hidroeléctrica como fuente de respaldo y el rediseño de instrumentos de mercado y planificación resultan fundamentales para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico y transformar el potencial renovable del país en beneficios reales para una movilidad sostenible y alineada con los compromisos de descarbonización.

Referencias Bibliográficas

- Agudelo, F., & Naranjo, E. (2017). Implementación de Energías Alternativas en Puerto Carreño, Vichada. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13758/18256626.pdf?sequence=1&isAlloved=y>
- Asociación Nacional de Movilidad Sostenible (ANDEMOS). (2025). Informes del mercado de vehículos eléctricos e híbridos en Colombia. <https://www.andemos.org/>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (2024) Ley 2099 de 2021 – Transición Energética, Dinamización del Mercado Energético, Reactivación Económica del País.
<https://www.anla.gov.co/07rediseureka2024/normativa/leyes/ley-2099-de-2021-transicion-energetica-dinamizacion-del-mercado-energetico-reactivacion-economica-del-pais>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (2024) Ley 1715 de 2014 – Integración de las Energías Renovables No Convencionales al Sistema Energético Nacional
<https://www.anla.gov.co/07rediseureka2024/normativa/leyes/ley-1715-de-2014-integracion-de-las-energias-renovables-no-convencionales-al-sistema-energetico-nacional>
- Baumann, H., Böckin, D., Goffetti, G., Tillman, A.-M., & Zobel, T. (2021). Evaluación del ciclo de vida del modelo de negocio: un método para analizar el desempeño ambiental de las empresas. *Producción y Consumo Sostenibles*, 32, 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.04.005>
- BID (2023) La generación hidroeléctrica y la transición energética de América Latina y el Caribe.
<https://www.iadb.org/es/blog/energia/la-generacion-hidroelectrica-y-la-transicion-energetica-de-america-latina-y-el-caribe>

- Botero Agudelo, J., Castaño Peláez, H., & Naranjo Merino, C. (2011). Life Cycle Assessment for bioethanol produced from cassava in Colombia. *Producción + Limpia*, 6(2), 69–77.
- Buitrago Tello, R., & Belalcázar, L. C. (2014). Life cycle assessment for the production of bioethanol in Colombia by using OpenLCA. Universidad Nacional de Colombia.
- Canabarro, N. I., Silva-Ortiz, P., Nogueira, L. A. H., Cantarella, H., Maciel-Filho, R., & Souza, G. M. (2023). Sustainability assessment of ethanol and biodiesel production in Argentina, Brazil, Colombia, and Guatemala. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 171, 113019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113019>
- Caustur, L., Hertoghe, P., Ma, T.-Y., & Vandebroek, M. (2025). Integrated charging scheduling for electric buses with time-of-use tariffs, peak power, V2G, battery ageing, and renewables (preprint). arXiv.
- Centro Regional de Estudios de Energía (CREE). (2022). ETR Colombia 2050. https://linktr.ee/transicionenergetica_col
- Cerdá, I., Ribó-Pérez, D., García-Melón, M. et al. Differences in the perception of drivers and barriers to the adoption of decentralised renewable energy technologies: a comparison between Spain and Colombia. *Clean Techn Environ Policy* 27, 8331–8347 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10098-025-03292-9>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2021). Resolución CREG 171 de 2021: Medición diferenciada y tarifas para la recarga de vehículos eléctricos. <https://www.creg.gov.co/documents/20143/0/Resolución+CREG+171+de+2021.pdf>

Comunicaciones Técnicaña. (18 de junio de 2024). Colombia lidera el mundo en biocombustibles con la menor huella de carbono. Técnicaña. <https://tecnicana.org/2024/06/18/sostenibilidad/colombia-lidera-el-mundo-en-biocombustibles-con-la-menor-huella-de-carbono/>

Consejo Internacional de Transporte Limpio (2023) Infraestructura de recarga para buses cero emisiones — Estrategias de Bogotá, Colombia . <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/04/Zero-emission-buses-in-Colombia-Zebra-paper-A4-v479.pdf>

Corficolombiana (2021) Generación eléctrica en Colombia y su transición hacia Fuentes Renovables No Convencionales. <https://investigaciones.corficolombiana.com/documents/38211/0/Generaci%C3%B3n%20el%C3%A9ctrica%20en%20Colombia%20y%20su%20transici%C3%B3n%20hacia%20Fuentes%20Renovables%20No%20Convencionales.pdf/5ffcba57-f7b8-f4b6-35c0-ae9302bd1a0a>

Corte Constitucional de Colombia. (2016). Sentencia T-730/16.

<https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2016/t-730-16.htm>

Cuervo, W (2024) Análisis de los impactos ambientales generados por los proyectos de energía eólica en el departamento de la Guajira, bajo la perspectiva del capital natural como un medio de vida para la comunidad étnica Wayuu. Universidad de Antioquia, Medellín.

<https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/f64eb96e-d3fe-4452-99aa-83dbe9ee62d6/content>

Decreto 191 de 2021. (2021, 23 de febrero). Por el cual se adiciona la parte 6 al Libro 2 del Decreto 1079 de 2015... (parqueaderos preferenciales para vehículos eléctricos). Departamento Administrativo de la Función Pública.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=159195>

Defensoría del Pueblo (2024) Informe Conflictividad social en el sector minero-energético en Colombia.

Defensoría Delegada para la Prevención y Transformación de la Conflictividad Social.

<https://minsus.net/mineria-sustentable/wp-content/uploads/2024/10/conflictividad-social-en-el-sector-minero-energetico-en-colombia.pdf>

Departamento Nacional de Planeación (2022) Documento CONPES.

<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4075.pdf>

Departamento Nacional de Planeación (2024) Hacia una sociedad movida por el sol y el viento: Los retos y avances de la transición energética justa para la superación de las brechas energéticas

<https://www.dnp.gov.co/publicaciones/Planeacion/Paginas/transicion-energetica.aspx>

Departamento Nacional de Planeación. (2020). CONPES 3991: Política nacional de movilidad urbana y regional. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3991.pdf>

Duchek, S. (2020). Organizational resilience: A capability-based conceptualization. *Business Research*, 13(1), 215–246. <https://doi.org/10.1007/s40685-019-0085-7>

Ecopetrol (2025) Ecopetrol S.A. adquiere la compañía Wind Autogeneración S.A.S., propietaria del proyecto eólico Windpeshi en La Guajira.

<https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/ecopetrol-sa-adquiere-la-compania-wind-autogeneracion-sas-propietaria-del-proyecto-eolico-windpeshi-en-la-guajira>

EDF Renewables (2023) EDF Renewables se retira de un proyecto de energía solar en Girardot

<https://img.lalr.co/cms/2023/10/05072848/EDF-Girardot.pdf>

Eirin, M., Messina, D., Contreras, R., & Salgado, R. (2022). “Estudio sobre políticas energéticas para la promoción de las energías renovables en apoyo a la electromovilidad” (Documentos de Proyectos LC/TS.2022/188). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

El Tiempo. (2019, 17 de noviembre). 600.000 vehículos eléctricos, la meta del Gobierno para el 2030.

<https://www.eltiempo.com/economia/sectores/carros-electricos-en-colombia-gobierno-quiere-600-000-para-2030-434466>

Enel (2023) Enel Colombia suspende indefinidamente la construcción del Parque Eólico Windpeshi en La Guajira. <https://www.enel.com.co/es/prensa/news-2023/05/suspension-indefinida-windpeshi.html>

Energía estratégica (2023) Otro revés: EDF Renewables se retira de su proyecto fotovoltaico en Cundinamarca de 50 MW adjudicado en 2021 <https://www.energiaestrategica.com/otro-reves-edf-renewables-se-retira-de-su-proyecto-fotovoltaico-en-cundinamarca-de-50-mw-adjudicado-en-2021/>

Fedebiocombustibles (2023). Los biocombustibles representan el 84% de la reducción total de emisiones contaminantes que provienen del sector del transporte.

<https://fedebiocombustibles.com/los-biocombustibles-representan-el-84-de-la-reduccion-total-de-emisiones/>

Federación Nacional de Biocombustibles (2024). Informe anual 2024.

<https://fedebiocombustibles.com/wp-content/uploads/2025/04/InformeFB-2024.pdf>

Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia. (2024). Volqueteros podrán tanquear en Bogotá el diésel menos contaminante de Colombia. <https://fedebiocombustibles.com/volqueteros-podran-tanquear-en-bogota-el-diesel-menos-contaminante-de-colombia/>

FENALCO, & ANDI. (2024, agosto). Informe de registro de vehículos eléctricos e híbridos – Julio 2024. Datos basados en el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT).

<https://www.fenalco.com.co/blog/gremial-4/informe-vehiculos-electricos-e-hibridos-julio-2024-7393>

- Forbes Colombia. (2025). Estos son los departamentos que lideran la expansión de la energía solar en Colombia en 2025. <https://forbes.co/2025/energia/expansion-energia-solar-colombia>
- Foro Nacional Ambiental. (2023). Las energías renovables en Colombia: problemática social, ambiental y jurídica — perspectiva territorial. Políticas públicas 50. <https://foronacionalambiental.org.co/wp-content/uploads/2023/03/Las-energias-renovables-en-Colombia.pdf>
- Función Pública (2021) Gestor Normativo, Consulta Ley 2099/21 <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>
- Fundación para la Conservación y Desarrollo Sostenible (2023, 24 de noviembre). Pasado, presente y futuro de la transición energética en Colombia: nuevo análisis de la FCDS. <https://fcds.org.co/transicion-energetica-en-colombia-analisis-de-fcds/>
- Grupo Banco Mundial (2023) América Latina y el Caribe. Colombia. Informe sobre clima y desarrollo del País. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099072023124015474/pdf/P1781040f920a400809a2c09e70149f435b.pdf>
- Heide, L., Guo, S. y Göhlich, D. (2025). De la simulación a la implementación: Un modelo de sistemas para el despliegue de flotas de autobuses eléctricos en áreas metropolitanas. World Electric Vehicle Journal , 16 (7), 378.
- Hickel, J., & Kallis, G. (2019, 6 de junio). ¿Es posible el crecimiento verde? Nueva Economía Política, 25(4), 469–486. <https://doi.org/10.1080/13563467.2019.1598964>
- ICEX. (2022). El mercado de las energías renovables en Colombia_2022. <https://www.icex.es/content/dam/es/icex/oficinas/020/documentos/2022/12/estudios-de->

[mercado/EM_El%20mercado%20de%20las%20energ%C3%ADas%20renovables%20en%20Colombia_2022.pdf](#)

ICONTEC (2024) Código Eléctrico Colombiano NTC 2050 Segunda actualización.

https://asieb.com/wp-content/uploads/2024/10/NTC_2050_codigo_electrico_nacional.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales (IDEAM). (2020). Primer inventario indicativo nacional de emisiones de contaminantes criterio y carbono negro 2010-2014.

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023893/023893.htm>

International Energy Agency (IEA). (IEA) (2021), Hydropower Special Market Report, International Energy Agency (IEA). (IEA), Paris <https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report>, Licence: CC BY 4.0

International Energy Agency (IEA). (2023c). Electricity Grids and Secure Energy Transitions.

International Energy Agency (IEA). (IEA).

International Energy Agency (IEA). (2023a). Colombia energy profile.

International Energy Agency (IEA). (IEA) (2023), Colombia 2023, International Energy Agency (IEA). (IEA) Energy Policy Reviews, OECD Publishing, Paris,

International Energy Agency (IEA). (IEA) (2025) Colombia. Total CO2 emissions from energy.

International Energy Agency (IEA). (2023). Greenhouse Gas Emissions from Energy Highlights.

International Energy Agency (IEA). (2026). Electricity 2026: Flexibility.

IRENA. (2021). Renewable Power Generation Costs in 2020.

Köhler, J., Geels, F. W., Kern, F., Markard, J., Onsongo, E., Wieczorek, A., Fichter, K., Popp, J.,

Rogge, K. S., & Schot, J. (2019). An agenda for sustainability transitions research: State of the art and future directions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 31, 1–32.

- La República. (2024). En 2040, los proyectos eólicos costa afuera generarán 5,1 GW, 2 GW más del objetivo. <https://www.larepublica.co/especiales/accelerando-la-transicion-energetica/cuantos-proyectos-de-energia-eolica-hay-en-colombia-3849123>
- La República. (2024, 28 de febrero). Los biocombustibles lograron reducción récord de CO₂ con 3,2 millones de toneladas. <https://www.larepublica.co/economia/los-biocombustibles-lograron-reduccion-record-de-co2-con-3-2-millones-de-toneladas-3810750>
- Ley 1964 de 2019. (2019, 11 de julio). Por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia y se dictan otras disposiciones. Secretaría General del Senado. http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1964_2019.html
- Low Carbon Power. (s.f.). Electricidad en Colombia en 2023/2024 Ranking Global: #74. Consultado el 13 de mayo de 2025, de <https://lowcarbonpower.org/es/region/Colombia>
- Mantilla-Romo, L., Camargo-Caicedo, Y., Bolaño-Díaz, S., Tovar-Bernal, F., & Garrido-Galindo, A. (2023). Estimación de Emisiones del Transporte Carretera en Colombia de 2010 a 2021. *Atmósfera*, 14 (7), 1167. <https://doi.org/10.3390/atmos14071167>
- Marussich, K., Eng, B., Siddaramu, Y., & Shah, R. (2025). Charge schedule optimization and infrastructure planning for solar-integrated electric bus transit systems (arXiv:2504.20790).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019) LEY No1964 11 JUL2019 POR MEDIO DE LA CUAL SE PROMUEVE EL USO DE VEHICULOS ELECTRICOS EN COLOMBIA Y SE DICTAN OTRAS DISPOSICIONES. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/ley-1964-2019.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019) Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica. -- Bogotá, D. C. Colombia: 74 p. ISBN Medio electrónico: 978-958-5551-18-3

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Informe de Gestión.

<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/Informe-de-Gestion-Minambiente-2021-VF-PUBLIC.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Minas y Energía; Ministerio de Transporte; Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2019/2020). Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (ENME). <https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/ENME.pdf> \

<https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/estrategia-nacional-de-movilidad-electrica-enme>

Ministerio de Minas y Energía (2020) Plan Energético Nacional 2020-2050

https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf

Ministerio de Minas y Energía (2024) Potencial energético subnacional y oportunidades de descarbonización en uso de energía final.

<https://www.minenergia.gov.co/documents/12382/Potenciales-TEJ-2024.pdf>

Ministerio de Minas y Energía (2025) Estrategia Nacional para la Infraestructura de Carga para vehículos eléctricos Capítulo 5. Guía completa para la transición de estaciones de servicio a estaciones de energía.

https://minenergia.gov.co/documents/13273/Capitulo_5_Guia_de_transicion_de_estaciones_TEJ_2025.pdf

Ministerio de Minas y Energía. (2025). Hoja de Ruta para la Transición Energética Justa de Colombia.

Bogotá D.C.

https://minenergia.gov.co/documents/13272/Hoja_de_ruta_transicion_energetica_justa_TEJ_2025.pdf

Ministerio de Minas y Energía. (2025, 29 de octubre). Colombia da un paso histórico hacia la movilidad eléctrica: todas las estaciones de carga deberán ser interoperables (nota de prensa: distribución y concentración actual de la infraestructura de carga). <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/colombia-da-un-paso-historico-hacia-la-movilidad-electrica-todas-las-estaciones-de-carga-deberan-ser-interoperables/>

Ministerio de Transporte (2021) En 2022 Colombia tendrá 1.589 buses eléctricos operando en sus sistemas masivos, la mayor flota eléctrica de Latinoamérica. <https://mintransporte.gov.co/publicaciones/10346/en-2022-colombia-tendra-1589-buses-electricos-operando-en-sus-sistemas-masivos-la-mayor-flota-electrica-de-latinoamerica/>

Ministerio de Transporte. (2024). Somos un sector vulnerable al cambio climático, lo que nos obliga a revisar cómo se concibe la infraestructura”: ministra de Transporte en COP16. <https://mintransporte.gov.co/publicaciones/11896/somos-un-sector-vulnerable-al-cambio-climatico-lo-que-nos-obliga-a-revisar-como-se-concibe-la-infraestructura-ministra-de-transporte-en-cop16/#:~:text=La%20ministra%20detall%C3%B3%20que%20el,de%20Efecto%20Invernadero%20%E2%80%93GEI%2D.>

Monsalve, S., Andrade, PP (2025) Escenarios Futuros para el Desarrollo de la Energía fotovoltaica en el Valle del Cauca hacia el año 2034. [Tesis de Grado] Santiago de Cali. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/735e52a8-7d13-4130-9c3d-5e856e91549b/content>

Nuncira Negrete, C. A. (2023). Modelo de gestión del residuo de cascarilla mediante cogeneración en pymes arroceras (Revista Producción + Limpia, SciELO). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552023000100006

Observatorio para la Protección de los Defensores de Derechos Humanos. (2017). [Informe sobre impactos y afectaciones a comunidades en proyectos hidroeléctricos en Colombia].

<https://www.omct.org/>

OECD (2022), Condiciones propicias para el financiamiento y la inversión en bioenergía en Colombia, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/e5c91d04-es>

Ollivier, O., Robles, J., & Flores, M. (2024). La innovación disruptiva de la generación distribuida, un reto para la administración pública en México. PAAKAT: Revista de Tecnología y Sociedad, 14(26). <https://doi.org/10.32870/pk.a14n26.852>

Organización Latinoamericana de Energía (2024) NOTA TÉCNICA N° 1 MOVILIDAD ELÉCTRICA EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE Monitoreando la electromovilidad.

<https://www.olade.org/wp-content/uploads/2024/09/Nota-Tecnica-Movilidad-electrica-en-America-Latina-y-el-Caribe-DEFINITIVA.pdf>

Pereira, M., & Turizo, L. (2020). Medidas para la implementación del uso racional y eficiente de la energía. Caso de las energías renovables en Colombia: Estado del Arte, avances y retos. Revista Jurídica, 17, 43-72.

Portafolio. (2024, 21 de mayo). Uso de los biocombustibles permitió reducir en 84 % las emisiones del sector transporte. <https://www.portafolio.co/sostenibilidad/uso-de-los-biocombustibles-permitio-reducir-en-84-las-emisiones-del-sector-transporte-605191>

Portafolio. (2025, 21 de febrero). Se instaló la primera termoeléctrica a base de cascarilla de arroz (7,1 MW) en Yopal. <https://www.portafolio.co/energia/en-colombia-se-instalo-la-primera-termoelectrica-a-base-de-cascarilla-de-arroz-624357>

Pranawengkapti, K., Shrestha, S., Werland, S. et al. Sector coupling: accelerating renewable energy integration in transport with electric vehicles. *Sustain Earth Reviews* 8, 16 (2025).

<https://doi.org/10.1186/s42055-025-00117-x>

Presidencia de Colombia (2024) Gobierno nacional participa este domingo en la inauguración de planta solar en Palmira <https://www.presidencia.gov.co/prensa/Paginas/Gobierno-nacional-participa-este-domingo-en-la-inauguracion-de-planta-solar-en-Palmira-241020.aspx>

Rangel, R., Arango-Manrique, A., Corredor, L., & Sanjuan, M. (2024). Assessment of Colombian renewable energy auctions policy: Enabler or barrier for concentrating solar power plants. *Energy Policy*, 193, 114300. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114300>

Rape. (2020). Biomasa en la Región Central. <https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/05/Cptl06-BIOMASA-EN-LA-REGIO%CC%81N-CENTRAL.pdf>

Ribeiro, P. J. G., Dias, G., & Mendes, J. F. G. (2024). Public transport decarbonization: An exploratory approach to bus electrification. *World Electric Vehicle Journal*, 15(3), 81.

RUNT (2025) Boletín de Prensa 001 de 2025 Balance del sector tránsito y transporte.

<https://www.runt.gov.co/sites/default/files/Bolet%C3%ADn%20de%20Prensa%20001%20de%202025.pdf>

RUNT (2024) Boletín de Prensa 005 de 2024 El parque automotor de Colombia sigue creciendo: Casi 20 millones de vehículos registrados.

<https://www.runt.gov.co/sites/default/files/Bolet%C3%ADn%20de%20Prensa%20005%20de%202024.pdf>

Rutas del Conflicto (2023) MÁS ALLÁ DE LA ENERGÍA Desafíos para los territorios de viento y agua

<https://rutasdelconflicto.com/especiales/Mas-alla-de-la-energia/#intro>

- Sagastume Gutiérrez, A., Cabello Eras, J. J., & Otero Meza, D. D. (2025). The Energy Transition in Colombia: Government Projections and Realistic Scenarios. *Clean Technologies*, 7(4), 96
- SEI. (2025, 24 de abril). Energía solar, eólica y comunidades energéticas en Colombia: Panorama 2025. <https://www.sei.org/publications/energia-solar-eolica-comunidades-energeticas-colombia-2025/>
- Sistig, HM, Sinhuber, P., Rogge, M. et al. Evaluación de costos y operaciones de la electrificación de la flota de autobuses públicos. *npj. Sustain. Mobil. Transp.* 2 , 15 (2025). <https://doi.org/10.1038/s44333-025-00030-y>
- Sonnemann, G., & Valdivia, S. (2020). Handbook on life cycle sustainability assessment. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781800378650>
- Stacey, D. (2025, 13 de enero). La gran transformación energética de Petro avanza a paso lento. El País América Colombia. <https://elpais.com/america-colombia/2025-01-13/la-gran-transformacion-energetica-de-petro-avanza-a-paso-lento.html>
- Transmilenio S.A (2019) Los nuevos buses de TransMilenio a gas natural comenzaron a salir de Pereira a Bogotá. <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/151281/los-nuevos-buses-de-transmilenio-a-gas-natural-comenzaron-a-salir-de-pereira-a-bogota/>
- Trujillo, I (2023) Movilidad eléctrica: retos y deficiencias enmarcadas desde la infraestructura y marco regulatorio en Colombia. [Trabajo de Grado] Universidad Externado, Bogotá D.C. <https://bdigital.uexternado.edu.co/server/api/core/bitstreams/4b26ef87-9482-4fe1-bd1f-513ef696a0ea/content>
- U.S. Department of Energy (DOE). Energy Transitions Playbook (fases secuenciales de implementación). <https://www.eere.energy.gov/etiplaybook/> (consulta: mar-2026)
- U.S. Department of Energy. (2025). Vehicles-to-Grid integration assessment report.

Unidad de Planeación Minero-Energética (Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME)). (2019)

Establecer Recomendaciones en Materia de Infraestructura de Recarga para la Movilidad

Eléctrica en Colombia para los Diferentes Segmentos: Buses, motos, taxis, BRT. Producto 3.

[Informe técnico].

https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/Consortio_Usaene_sumatoria_producto_3_estaciones_de_cargaVF.pdf

Unidad de Planeación Minero-Energética (Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME)). (2020)

La transformación energética que habilita el desarrollo sostenible.

https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf

Unidad de Planeación Minero-Energética (Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME)). (2025)

BALANCE ENERGÉTICO COLOMBIANO Revisión 2022 - Preliminar 2023 Subdirección de Demanda

https://docs.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Beco/Presentacion_Balance_Energetico_Colombiano_2022-2023.pdf

Unidad de Planeación Minero-Energética (Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME)). (2025)

Plan Energético Nacional 2024-2054 Tomo I.

https://docs.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2024_2054/PDF1_PEN_2024-2054_Tomo_I.pdf

Unidad de Planeación Minero-Energética (Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME)). (2015).

Estudio: Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia (ISBN No. 978-

958-8363-26-4). <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Estudio-Integraci%C3%B3n-de-las-energ%C3%ADas-renovables-no-convencionales-en-Colombia.aspx>

Unidad de Planeación Minero-Energética (Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME)). (2024)

CONTEXTO DE CONFLICTIVIDADES DE LAS ZONAS CARIBE COLOMBIANO

RELACIONADAS CON LAS DINÁMICAS EXTRACTIVISTAS DE LOS RECURSOS

NATURALES EN EL SECTOR MINERO ENERGÉTICO ESTADO DEL ARTE PRIMER

ENTREGABLE CONSULTORÍA ORGANIZACIÓN ARTEMISAS -UNIDAD DE

PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME)

[https://docs.upme.gov.co/Documents/Enfoque-](https://docs.upme.gov.co/Documents/Enfoque-territorial/Contexto_de_conflictividades_de_las_zonas_del_Caribe_Colombiano_relacionadas_con_dinamicas_extractivistas_recurso_naturales.pdf)

[territorial/Contexto_de_conflictividades_de_las_zonas_del_Caribe_Colombiano_relacionadas_con_dinamicas_extractivistas_recurso_naturales.pdf](https://docs.upme.gov.co/Documents/Enfoque-territorial/Contexto_de_conflictividades_de_las_zonas_del_Caribe_Colombiano_relacionadas_con_dinamicas_extractivistas_recurso_naturales.pdf)

Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) (2025) Proyección de Demanda de Combustibles Líquidos 2024 2040.

https://docs.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/UPME_Proyecciones_demanda_combustibles_liquidos_2024-2040_Para_comentarios_4-4-2025.pdf

Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) (2024) COMPENSADORES SÍNCRONOS como

Elemento de Flexibilidad en la Transición Energética Artículo de Discusión Noviembre de 2024

https://docs.upme.gov.co/SalaPrensa/ComunicadosPrensa/Position_paper_comp_sincronos_V4.pdf

Unidad de Planeación Minero-Energética (Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME)). (2011).

Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia.

<https://www1.upme.gov.co/Paginas/Atlas-Biomasa.aspx>

United Nations Environment Programme. (2018). Electric buses: Tackling urban air quality improvement with zero-emission buses.

Unión Europea (2021). Recomendación (UE) 2021/1749 de la Comisión de 28 de septiembre de 2021 sobre el principio de «primero, la eficiencia energética»: de los principios a la práctica — Directrices y ejemplos para su aplicación en la toma de decisiones en el sector de la energía y más allá. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX%3A32021H1749>

Valencia, V., Lozano, J (2025) Energía Sostenible y Derechos Indígenas: Evaluación de los Proyectos Eólicos en Territorio Wayuu.

<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/31858/Monografia%20Trabajo%20Final.pdf?sequence=1>

Verbrugge, B., Rauf, A. M., Rasool, H., Abdel-Monem, M., Geury, T., El Baghdadi, M., & Hegazy, O. (2022). Real-time charging scheduling and optimization of electric buses in a depot. *Energies*, 15(14), 5023.

Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy (2023) Transición Energética Justa en Colombia: Status Quo, Retos y Oportunidades Una evaluación centrada en las regiones carboníferas de los departamentos de Cesar y La Guajira. https://www.jetknowledge.org/wp-content/uploads/2023/10/20231016_AF-Colombia_final_ES_v1.pdf

XM. (2025). Informe del portafolio de proyectos de generación de energía en Colombia. <https://www.xm.com.co/Paginas/Generacion/Proyectos-de-generacion.aspx>