

NEUTRALIDAD DE CARBONO: HIDROCARBUROS EN LEY 2169

Identificación de Alternativas de Acciones Climáticas Direccionadas Hacia el Logro del
Carbono Neutralidad en la Industria de los Hidrocarburos en Conformidad con la Ley 2169
de 2021

Dahiana Giraldo Usma, Camilo Andrés Rodríguez Araque

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Kathy Margarita Daza Brochero

Magister en Gestión en la Industria de los Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

Llegar hasta este punto ha sido un viaje lleno de aprendizajes, desafíos y momentos inolvidables. No hubiéramos podido hacerlo solos, y por eso queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a quienes nos han acompañado en este camino.

En primer lugar, agradecemos a Dios, por darnos la fuerza, la sabiduría y la perseverancia para afrontar cada obstáculo.

A nuestros padres, quienes con su amor incondicional, paciencia y apoyo constante han sido nuestro pilar. Gracias por enseñarnos el valor del esfuerzo, por motivarnos en los días difíciles y por celebrar con nosotros cada pequeño logro. Esta meta también es suya.

A nuestros docentes, quienes, con su dedicación y entrega, nos han inspirado a superarnos cada día. Sus enseñanzas no solo nos han dado conocimientos, sino que también nos han formado como personas con criterio y responsabilidad. Cada clase, cada consejo y cada palabra de aliento han dejado huella en nuestro crecimiento.

Un agradecimiento especial a nuestra directora de tesis, cuya orientación y paciencia nos guiaron en este proceso. Gracias por su confianza en nuestro trabajo, por su exigencia que nos llevó a mejorar y por su apoyo inquebrantable en cada etapa de este proyecto.

A todos los que, de una u otra manera, han sido parte de este viaje, les extendemos nuestra gratitud. Este logro no es solo nuestro, sino de todos aquellos que nos han acompañado con su amor, sabiduría y apoyo incondicional.

Con gratitud y cariño,

Camilo Andrés Rodríguez Araque y Dahiana Giraldo Usma

Tabla de Contenido

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción | 11 |
| 1. Objetivos | 12 |
| 1.1. Objetivo General..... | 12 |
| 1.2. Objetivos Específicos..... | 12 |
| 2. Justificación | 13 |
| 3. Marco Teórico..... | 14 |
| 3.1. Cambio Climático y Carbono Neutralidad | 14 |
| 3.2. Gases Efecto Invernadero | 14 |
| 4. Carbono Neutralidad..... | 16 |
| 4.1.1. Impactos Ambientales..... | 17 |
| 4.1.2. Impactos Económicos | 18 |
| 4.1.3. Impactos Sociales..... | 18 |
| 4.1.4. Estrategias Globales para Alcanzar la Carbono Neutralidad..... | 18 |
| 4.1.5. Barreras para la Carbono Neutralidad..... | 19 |
| 5. Metodología | 20 |
| 5.1.1. Tipo de Investigación..... | 20 |
| 5.1.2. Fuentes de Información..... | 20 |
| 5.2. Técnicas de Análisis | 23 |
| 5.2.1. Revisión Documental..... | 23 |
| 5.2.2. Comparación de estrategias | 24 |
| 5.2.3. Análisis de impacto..... | 24 |
| 5.2.4. Limitaciones y Consideraciones | 25 |
| 6. Emisiones..... | 27 |
| 6.1. Niveles de Emisiones de Carbono en el Sector Hidrocarburos Colombiano..... | 30 |

NEUTRALIDAD DE CARBONO: HIDROCARBUROS EN LEY 2169

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.1.1. Fuentes de Emisiones..... | 35 |
| 6.1.2. Residuos peligrosos | 39 |
| 7. Normatividad Gases Efecto Invernadero | 39 |
| 7.1. Reportes, organismos Internacionales y Acuerdos Globales | 40 |
| 7.2. Acuerdo de París y Metas de Carbono Neutralidad..... | 41 |
| 7.2.1. Objetivos del Acuerdo de París..... | 41 |
| 7.2.2. Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC)..... | 41 |
| 7.2.3. Metas Globales de Carbono Neutralidad | 42 |
| 7.2.4. Mecanismos para Alcanzar la Carbono Neutralidad | 42 |
| 7.2.5. Desafíos en la Implementación del Acuerdo de París | 43 |
| 7.3. Influencia Internacional en Sector Hidrocarburos Colombiano | 44 |
| 7.4. Normativa Colombiana y Metas de Carbono Neutralidad..... | 47 |
| 7.4.1. Ley 2169 de 2021 – Política de Carbono Neutralidad..... | 47 |
| 7.4.2. Marco Legal Colombiano | 49 |
| 7.4.3. Estrategia Climática de Largo Plazo de Colombia (E2050) | 51 |
| 8. Comparación Internacional y Evaluación del Cumplimiento | 59 |
| 8.1. Evaluación del Cumplimiento Normativo del Sector Hidrocarburos | 60 |
| 8.1.1. Cumplimiento del Sector Hidrocarburos en Colombia..... | 60 |
| 8.1.2. Brechas y Desafíos en el Cumplimiento | 61 |
| 8.1.3. Recomendaciones para Mejorar el Cumplimiento..... | 62 |
| 8.1.4. Alineación Normativa Empresas Petroleras | 64 |
| 9. Alternativas | 86 |
| 9.1. Implicaciones Técnicas para el Sector Hidrocarburos..... | 86 |
| 9.1.1. Implementación de Tecnología y Prácticas de Eficiencia Energética en el Sector Hidrocarburos | 87 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.1.2. Relevancia del PAI-PROURE para la Carbono Neutralidad del Sector Hidrocarburos | 88 |
| 9.1.3. Riesgos y Barreras | 88 |
| 9.1.4. Desafíos y Oportunidades | 89 |
| 9.2. Propuestas de Acción y Objetivos Temporales | 94 |
| 9.2.1. Corto Plazo (2025-2030)..... | 94 |
| 9.2.2. Mediano Plazo (2030-2040) | 94 |
| 9.2.3. Largo Plazo (2040-2050) | 95 |
| 9.2.4. Propuesta de Estrategias de Mitigación y Compensación para el Sector Hidrocarburos en Colombia | 95 |
| 9.2.5. Estrategias Prioritarias para la Reducción del Impacto Ambiental en la Industria Petrolera | 96 |
| 9.2.6. Estrategias y Metas para la Reducción de Emisiones | 100 |
| 10. Conclusiones | 102 |
| Referencias Bibliográficas | 104 |

Lista de Tablas

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 <i>GEI Directos - Gg Co2, Equivalente</i> | 32 |
| Tabla 2 <i>Mecanismos para Alcanzar la Carbono Neutralidad</i> | 42 |
| Tabla 3 <i>Empresas Petroleras Operadoras con Contrato ANH</i> | 46 |
| Tabla 4 <i>Metas 2025-2050</i> | 52 |
| Tabla 5 <i>Compromisos NDC Ecopetrol</i> | 59 |
| Tabla 6 <i>Metas de Carbono Neutralidad y Regulaciones Aplicables al Sector Hidrocarburos Colombiano</i> | 63 |
| Tabla 7 <i>Resumen Carbono Neutralidad Ecopetrol</i> | 65 |
| Tabla 8 <i>Resumen Carbono Neutralidad Frontera Energy Colombia Corp., Sucursal Colombia</i> | 65 |
| Tabla 9 <i>Resumen Carbono Neutralidad Gran Tierra Energy Colombia GmbH Sucursal Colombia</i> | 66 |
| Tabla 10 <i>Resumen Carbono Neutralidad Empresa Parex Resources Colombia Ltd. Sucursal</i> | 67 |
| Tabla 11 <i>Resumen Carbono Neutralidad Canacol Energy Colombia SAS</i> | 67 |
| Tabla 12 <i>Resumen Carbono Neutralidad Interoil Colombia Exploration and Production</i> | 68 |
| Tabla 13 <i>Resumen Carbono Neutralidad SierraCol Energy Arauca LLC</i> | 69 |
| Tabla 14 <i>Resumen Carbono Neutralidad Hocol S.A.</i> | 69 |
| Tabla 15 <i>Resumen Carbono Neutralidad Lewis Energy Colombia Inc.</i> | 70 |
| Tabla 16 <i>Resumen Carbono Neutralidad Omega Energy</i> | 71 |
| Tabla 17 <i>Resumen Carbono Neutralidad Wattle Petroleum Company S.A.S y Perenco.</i> | 72 |
| Tabla 18 <i>Resumen Carbono Neutralidad Drummond Energy Inc</i> | 74 |
| Tabla 19 <i>Resumen Carbono Neutralidad Mansarovar Energy</i> | 75 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 20 <i>Resumen Carbono Neutralidad Amerisur Exploración Colombia Limitada y Suelopetrol</i> | 76 |
| Tabla 21 <i>Resumen Carbono Neutralidad Vetra Exploración y Producción Colombia</i> | 77 |
| Tabla 22 <i>Resumen Carbono Neutralidad Hupecol y Greenpower</i> | 78 |
| Tabla 23 <i>Resumen Carbono Neutralidad Tecpetrol</i> | 79 |
| Tabla 24 <i>Resumen General Carbono Neutralidad Empresas</i> | 80 |
| Tabla 25 <i>Propuesta de Mejoramiento Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero 1990-2018</i> | 90 |
| Tabla 26 <i>Aporte importante 2050 Carbono Neutralidad</i> | 91 |
| Tabla 27 <i>Alternativas por Periodo de Implementación</i> | 98 |

Lista de Ilustraciones

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1 <i>Emisiones y absorciones de GEI por módulo, 1990 - 2018 (GgCo2 eq)</i> | 27 |
| Ilustración 2 <i>Desagregación de emisiones según su clasificación IPCC</i> | 28 |
| Ilustración 3 <i>Sentinel - 5P Total Column CO</i> | 29 |
| Ilustración 4 <i>Participación por Módulo y Subcategoría en las Emisiones GEI Año 2018</i> | 31 |
| Ilustración 5 <i>Tendencia de Emisiones de GEI Módulo de Energía por subcategoría, 1990-2018</i> | 33 |
| Ilustración 6 <i>Emisiones Fugitivas Provenientes de la Fabricación de Combustible- Petróleo y Gas Natural (Subcategoría 1B2)</i> | 34 |
| Ilustración 7 <i>Estrategia Energética PROURE</i> | 93 |

Resumen

TÍTULO: IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS DE ACCIONES CLIMÁTICAS DIRECCIONADAS HACIA EL LOGRO DEL CARBONO NEUTRALIDAD EN LA INDUSTRIA DE LOS HIDROCARBUROS EN CONFORMIDAD CON LA LEY 2169 DE 2021*

AUTORES: Dahiana Giraldo Usma, Camilo Andrés Rodríguez Araque **

PALABRAS CLAVE: Carbono Neutralidad, Hidrocarburos, Reducción de Emisiones, mitigación.

DESCRIPCIÓN: El sector de hidrocarburos en Colombia enfrenta el desafío de alinearse con las metas de carbono neutralidad establecidas en el Acuerdo de París y la normativa nacional, particularmente la Ley 2169 de 2021. Esta investigación analiza las implicaciones y requisitos específicos de estas regulaciones para la industria, con énfasis en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Se identifican las principales fuentes y niveles de emisiones en el sector de los hidrocarburos colombiano y su grado de cumplimiento con los compromisos internacionales y nacionales en materia climática. A partir de este diagnóstico, se proponen estrategias de mitigación y compensación viables, estableciendo objetivos a corto (2025), mediano (2030) y largo plazo (2050). La metodología empleada combina un enfoque cualitativo con elementos cuantitativos, mediante el análisis de normativas, informes técnicos y estudios de caso en empresas del sector. Los resultados buscan proporcionar lineamientos prácticos para la transición hacia una operación más sostenible en la industria de los hidrocarburos en Colombia.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Directora Mg Kathy Daza.

Abstract

TITLE: IDENTIFICATION OF ALTERNATIVES FOR CLIMATE ACTIONS DIRECTED TOWARDS ACHIEVING CARBON NEUTRALITY IN THE HYDROCARBON INDUSTRY IN ACCORDANCE WITH LAW 2169 OF 2021

AUTHOR: Dahiana Giraldo Usma, Camilo Andrés Rodríguez Araque **

KEYWORDS: Carbon Neutrality, Hydrocarbons, Emissions Reduction, Mitigation.

DESCRIPCIÓN: The hydrocarbon sector in Colombia faces the challenge of aligning with the carbon neutrality goals established by the Paris Agreement and national regulations, particularly Law 2169 of 2021. This research analyzes the implications and specific requirements of these regulations for the industry, focusing on greenhouse gas (GHG) emissions reduction. The study identifies the main sources and levels of emissions in Colombia's hydrocarbon sector and assesses its compliance with international and national climate commitments. Based on this diagnosis, feasible mitigation and compensation strategies are proposed, setting clear short-term (2025), medium-term (2030), and long-term (2050) goals. The methodology combines a qualitative approach with quantitative elements through the analysis of regulations, technical reports, and case studies of companies in the sector. The results aim to provide practical guidelines for transitioning towards more sustainable operations in Colombia's hydrocarbon industry.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical and Chemical Engineering. School of Petroleum Engineering.
Director: Mg. Kathy Daza.

Introducción

El cambio climático es uno de los desafíos más apremiantes del siglo XXI, y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se ha convertido en un objetivo prioritario para los países comprometidos con la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico responsable. En este contexto, Colombia ha establecido un marco normativo y estratégico para alcanzar la carbono neutralidad a través de la Ley 2169 de 2021 y la Estrategia Colombia E2050, en concordancia con los compromisos adquiridos en el Acuerdo de París. Dentro de este marco, el sector de los hidrocarburos enfrenta un reto significativo debido a su impacto en las emisiones de GEI y su rol en la economía nacional.

La industria de los hidrocarburos en Colombia es una de las principales fuentes de emisiones de GEI, derivadas de actividades como la extracción, refinación, transporte y distribución de petróleo y gas. A pesar de los avances en eficiencia energética y en la implementación de tecnologías menos contaminantes, es necesario adoptar estrategias más efectivas y alineadas con los compromisos climáticos del país. La reducción de emisiones en este sector no solo contribuirá a los objetivos nacionales de carbono neutralidad, sino que también permitirá mejorar su sostenibilidad a largo plazo y su competitividad en un entorno global en transformación.

El propósito de este estudio es analizar el impacto ambiental de la industria de los hidrocarburos en Colombia, identificando las principales fuentes de emisión de GEI y los procesos más críticos dentro de la cadena de valor del sector. A partir de este diagnóstico, se busca proponer al menos diez alternativas de acciones climáticas, considerando su alineación con la normativa vigente y su contribución efectiva a la reducción de emisiones. Este análisis permitirá sentar las bases para la formulación de estrategias concretas que faciliten la transición del sector hacia modelos de producción más sostenibles.

La relevancia de esta investigación radica en la necesidad de generar soluciones prácticas y adaptadas a la realidad del país, que permitan al sector de los hidrocarburos cumplir con los objetivos climáticos sin comprometer su estabilidad económica. A través de un enfoque basado en evidencia y en el análisis de mejores prácticas, se espera aportar insumos valiosos para la formulación de políticas y estrategias empresariales que impulsen la descarbonización del sector, contribuyendo así a los compromisos nacionales e internacionales en materia de cambio climático.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Evaluar el cumplimiento del sector hidrocarburos colombiano con las metas de carbono neutralidad establecidas en el Acuerdo de París y la ley 2169 de 2021, y proponer acciones concretas y prioritarias para reducir las emisiones de carbono en este sector, con objetivos específicos a corto, mediano y largo plazo.

1.2. Objetivos Específicos

Analizar las metas de carbono neutralidad del Acuerdo de París y la normativa colombiana, respecto a implicaciones y requisitos específicos para el sector hidrocarburos en términos de reducción de emisiones.

Identificar las principales fuentes y niveles de emisiones de carbono, y el cumplimiento de la normativa colombiana y acuerdo de París de el sector hidrocarburos colombiano.

Proponer alternativas prioritarias y prácticas para la implementación de estrategias de mitigación y compensación en el sector hidrocarburos, estableciendo metas claras para el corto (2025), mediano (2030) y largo plazo (2050).

2. Justificación

El cambio climático es un desafío global que requiere la implementación de estrategias concretas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y avanzar hacia la carbono neutralidad. Si bien somos un país de baja emisión en relación al mundo, es cierto que pertenecemos a ecosistemas muy importantes para el equilibrio del planeta. En este contexto, la industria de los hidrocarburos en Colombia representa un sector clave debido a su alto nivel de emisiones y su impacto en la economía nacional. La necesidad de compatibilizar el desarrollo económico con la sostenibilidad ambiental hace indispensable la formulación de acciones que permitan la reducción de emisión de GEI. Colombia ha asumido compromisos internacionales mediante la ratificación del Acuerdo de París y la promulgación de la Ley 2169 de 2021, los cuales establecen metas ambiciosas para la mitigación del cambio climático y la estrategia E2050 por el cual Colombia planifica estratégicamente los cambios y transformaciones profundas a nivel sectorial y territorial, necesarios para convertirse en un país resiliente al clima. Sin embargo, el cumplimiento de estos objetivos en el sector de los hidrocarburos aún enfrenta importantes desafíos, como la falta de información detallada sobre sus principales fuentes de emisión y la escasez de propuestas concretas con viabilidad técnica y económica.

Esta investigación es relevante porque busca identificar la alineación del sector de los hidrocarburos y sus empresas de producción respecto a la normativa y proyecciones vigentes a nivel oficial sobre la carbono neutralidad mediante la identificación de los procesos de la producción petrolera y la formulación de al menos diez alternativas de mitigación y adaptación. Al proporcionar un análisis basado en evidencia y alineado con la normativa vigente, este

estudio contribuirá a la toma de decisiones tanto en el ámbito gubernamental como en el empresarial, facilitando la implementación de estrategias efectivas de descarbonización.

Además, el estudio permitirá sentar bases para futuras investigaciones y políticas que fomenten la transición del sector de los hidrocarburos hacia modelos más sostenibles. De esta manera, se espera aportar insumos que beneficien no solo al sector energético, sino también al cumplimiento de los compromisos climáticos de Colombia y a la construcción de un desarrollo económico más equilibrado y resiliente frente al cambio climático.

3. Marco Teórico

3.1. Cambio Climático y Carbono Neutralidad

El cambio climático es una de las principales amenazas ambientales del siglo XXI. Está relacionado con el aumento de la temperatura global debido a la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, producto de actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y procesos industriales.

3.2. Gases Efecto Invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), entre otros, contribuyen al cambio climático porque absorben y reemiten la radiación infrarroja (calor) emitida por la superficie terrestre. Este fenómeno ocurre debido a las propiedades moleculares y vibracionales de estos gases.

Cuando la Tierra absorbe la luz solar, parte de esta energía es reemitida como radiación infrarroja (IR) de baja energía. Los GEI pueden absorber esta radiación debido a sus modos de vibración molecular, los cuales cambian su momento dipolar cuando interactúan con la radiación infrarroja.

Para que una molécula absorba radiación infrarroja, debe cumplir con dos condiciones:

Poseer enlaces polares o asimétricos: La vibración molecular debe inducir un cambio en el momento dipolar.

Coincidencia con la longitud de onda de la radiación infrarroja: La frecuencia de vibración de la molécula debe coincidir con la radiación IR emitida por la Tierra (rango de 4 a 100 μm).

Los gases monoatómicos como el argón (Ar) y el nitrógeno molecular (N_2) no absorben infrarrojo porque no tienen un cambio en su momento dipolar al vibrar.

Los gases poliatómicos como CO_2 , CH_4 , N_2O y H_2O tienen modos de vibración que interactúan con la radiación infrarroja.

El Dióxido de carbono (CO_2) con modos de vibración activos en IR de flexión (15 μm) -> Alta absorción y vibración asimétrica de estiramiento (4.3 μm) → Absorbe IR eficazmente y vibración simétrica de estiramiento (no absorbe IR porque no cambia el momento dipolar).

El CO_2 es un fuerte absorbente de infrarrojos en el rango de 4 a 15 μm , lo que lo convierte en un GEI clave.

El Metano (CH_4) con modos de vibración activos en IR de flexión (7.7 μm) y vibración de estiramiento asimétrica (3.3 μm). Aunque el metano está en menor concentración que el CO_2 , es 25 veces más potente en la absorción de infrarrojos debido a su capacidad de absorción en rangos clave.

El Óxido nítrico (N_2O) con modos de vibración activos en IR de flexión (17 μm) y vibración de estiramiento asimétrica (7.8 μm). Aunque su concentración en la atmósfera es baja, su fuerte absorción lo hace un gas de efecto invernadero relevante.

El Vapor de agua (H_2O) con modos de vibración activos en IR de flexión (6.3 μm), vibración de estiramiento asimétrica (2.7 μm) y vibración de estiramiento simétrica (no activa en IR). El vapor de agua es el gas de efecto invernadero más abundante, con gran capacidad de absorción en el infrarrojo.

Los anteriores gases afectan el cambio climático debido a la captura de calor, absorben la radiación infrarroja emitida por la Tierra y la reemiten en todas direcciones, atrapando calor en la atmósfera.

Persistencia en la atmósfera

$\text{CO}_2 \rightarrow 100 - 1000$ años

$\text{CH}_4 \rightarrow \sim 12$ años (pero con mayor poder de calentamiento)

$\text{N}_2\text{O} \rightarrow \sim 114$ años

$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \sim 14$ días

Retroalimentación positiva: El aumento de temperatura incrementa la evaporación de agua, lo que refuerza el efecto invernadero. El vapor de agua no impulsa el cambio climático por sí solo, pero amplifica el calentamiento global debido a su capacidad de absorción de infrarrojos. Su tiempo de residencia es corto, pero su concentración en la atmósfera depende del aumento de temperatura causado por otros GEI como el CO_2 y el CH_4 .

4. Carbono Neutralidad

La carbono neutralidad, se refiere al equilibrio entre las emisiones de GEI y su captura o compensación. Alcanzar este estado implica la implementación de estrategias de mitigación como la eficiencia energética, el uso de energías renovables y la captura y almacenamiento de carbono (CAC). En el contexto global, el Acuerdo de París establece la necesidad de reducir emisiones para mantener el incremento de la temperatura por debajo de 2°C respecto a niveles preindustriales.

La carbono neutralidad implica reducir al máximo las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y compensar aquellas que no pueden ser eliminadas, logrando un balance neto de emisiones igual a cero.

En el sector hidrocarburos, esto se traduce en la necesidad de reducir emisiones en:

Exploración y producción. Reducción del venteo y quema de gas, optimización del uso de energía en perforación, reducción de emisiones fugitivas.

Transporte y refinación. Incremento en eficiencia energética, reducción de emisiones fugitivas, integración de energías renovables.

Consumo final. Uso de tecnologías de captura de carbono, sustitución por combustibles menos intensivos en carbono.

El concepto de carbono neutralidad se ha convertido en un eje central de las políticas climáticas globales, impulsado por el Acuerdo de París (2015) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). La carbono neutralidad implica alcanzar un balance entre las emisiones generadas y aquellas removidas de la atmósfera mediante estrategias de mitigación y compensación, con el objetivo de limitar el calentamiento global por debajo de 2°C y, preferiblemente, a 1.5°C.

La carbono neutralidad, también conocida como "cero neto de emisiones", se refiere al estado en el que la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos es igual a la cantidad eliminada de la atmósfera a través de sumideros naturales o tecnologías de captura y almacenamiento.

Reducción de emisiones: Implementación de tecnologías limpias, eficiencia energética y transición a energías renovables.

Compensación de emisiones: Uso de mecanismos como reforestación, restauración de ecosistemas y captura tecnológica de carbono.

4.1.1. Impactos Ambientales

El calentamiento global provocado por los GEI ha generado fenómenos climáticos extremos, elevación del nivel del mar y pérdida de biodiversidad. Lograr la carbono neutralidad es crucial para:

Reducir el impacto del cambio climático.

Preservar ecosistemas vulnerables.

Garantizar la sostenibilidad de los recursos naturales.

Proteger las vida de diversas especies.

4.1.2. Impactos Económicos

La transición hacia la carbono neutralidad genera nuevas oportunidades económicas y desafíos en sectores como la energía, transporte e industria. Entre los beneficios económicos destacan:

Reducción de costos energéticos mediante eficiencia y energías renovables.

Generación de empleos en tecnologías limpias y sostenibles.

Acceso a financiamiento verde y mercados de carbono.

4.1.3. Impactos Sociales

El cambio hacia un modelo bajo en carbono también tiene implicaciones sociales importantes:

Mejora de la calidad del aire y reducción de enfermedades respiratorias.

Creación de empleos sostenibles.

Reducción de la vulnerabilidad de comunidades afectadas por el cambio climático.

Genera nuevas formas de relacionamiento con la naturaleza.

4.1.4. Estrategias Globales para Alcanzar la Carbono Neutralidad

El Acuerdo de París establece compromisos diferenciados para cada país a través de sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC). Para cumplir estos compromisos, los países han adoptado estrategias como:

Descarbonización de la matriz energética: Fomento de energías renovables y eliminación progresiva de combustibles fósiles.

Eficiencia energética: Aplicación de tecnologías para optimizar el consumo de energía en industrias y edificaciones.

Regulaciones e incentivos: Implementación de impuestos al carbono y mercados de emisiones para reducir GEI.

Existen diversas soluciones tecnológicas para reducir y capturar emisiones:

Captura y almacenamiento de carbono (CCUS): Tecnología para atrapar CO₂ antes de que llegue a la atmósfera.

Hidrogeno verde: Alternativa de energía limpia producida a partir de electrólisis con energía renovable.

Bioenergía con captura de carbono (BECCS): Uso de biomasa para generar energía con captura simultánea de CO₂.

4.1.5. Barreras para la Carbono Neutralidad

Costos de transición: Implementar tecnologías limpias requiere grandes inversiones iniciales.

Resistencia del sector industrial: Las empresas con modelos basados en combustibles fósiles enfrentan dificultades para cambiar sus procesos.

Limitaciones tecnológicas: Algunas tecnologías de captura de carbono aún están en fase de desarrollo y escalamiento.

Oportunidades para la Implementación: Acceso a financiamiento climático internacional, innovación en energías renovables y eficiencia energética, fortalecimiento de la legislación ambiental y políticas de incentivos.

La carbono neutralidad es un objetivo clave para mitigar el cambio climático y garantizar un futuro sostenible. Si bien existen barreras económicas y tecnológicas, la transición hacia una economía baja en carbono representa una oportunidad para innovar, generar empleo y mejorar la calidad de vida. La combinación de regulaciones adecuadas,

innovaciones tecnológicas y compromisos del sector privado será fundamental para alcanzar este objetivo a nivel global y nacional.

El marco teórico de esta investigación se fundamenta en conceptos clave relacionados con el cambio climático y la transición energética en Colombia en el contexto de la carbono neutralidad y los acuerdos internacionales.

5. Metodología

La presente investigación empleará un enfoque cualitativo con elementos cuantitativos para analizar el impacto ambiental del sector de los hidrocarburos en Colombia y sugerir alternativas de mitigación alineadas con la carbono neutralidad. A continuación, se detallan los aspectos metodológicos clave:

5.1.1. Tipo de Investigación

La investigación es de tipo descriptivo y exploratorio. Se busca caracterizar las principales fuentes de emisión de GEI en el sector de los hidrocarburos de forma directa y evaluar estrategias de mitigación desde una perspectiva técnica y económica.

5.1.2. Fuentes de Información

Se utilizarán las siguientes fuentes de información, incluyendo:

Consulta directa a empresas que tienen adjudicados bloques de producción en contrato con la Agencia Nacional de Hidrocarburos y sus respectivos informes de sostenibilidad actualizados a la fecha.

Informes gubernamentales (Ministerio de Ambiente, UPME, ANH, IDEAM, entre otros).

Informes y publicaciones científicas y académicas sobre mitigación de emisiones en hidrocarburos.

Normativas y políticas nacionales e internacionales en materia de cambio climático.

Para consolidar la información sobre emisiones y cumplimiento normativo, se utilizarán diversas fuentes y metodologías:

Revisión de literatura y bases de datos: Informes técnicos, estudios académicos y reportes de sustentabilidad.

Solicitudes de información mediante derechos de petición: Enviados a entidades gubernamentales (MADS, ANH, IDEAM), empresas petroleras (Ecopetrol, Parex, Frontera Energy) y ONGs ambientales.

Entrevistas y consultas a expertos: Investigadores en cambio climático, reguladores y representantes del sector industrial.

Para evaluar las emisiones de carbono del sector hidrocarburos colombiano y su cumplimiento con los compromisos climáticos, es fundamental preguntar mediante derecho de petición directamente a las empresas en sus informes de sostenibilidad y contrastar con informes generales como de entidades institucionales, Ong's y organizaciones sociales. Este apartado describe las principales fuentes de información utilizadas, la estrategia de recopilación de datos, las limitaciones encontradas y la importancia de la transparencia en la obtención de información ambiental en el sector.

Fuentes Gubernamentales

Las entidades gubernamentales en Colombia desempeñan un papel clave en la recolección y publicación de datos sobre emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la

regulación ambiental en el sector hidrocarburos. Algunas de las fuentes más relevantes incluyen:

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM): Responsable del Inventario Nacional de GEI. Publica reportes periódicos sobre las emisiones del sector.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: Encargado de la formulación de políticas ambientales y normativas sobre mitigación de emisiones.

Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH): Proporciona datos sobre producción de petróleo y gas, licencias de explotación y estándares técnicos.

Superintendencia de Servicios Públicos y MinEnergía: Ofrece reportes sobre eficiencia energética y consumo de combustibles en el sector.

Organizaciones No Gubernamentales (ONG) y Centros de Investigación

Varias ONG y centros académicos realizan monitoreos independientes sobre las emisiones del sector y su impacto ambiental:

WWF Colombia y Greenpeace: Realizan estudios sobre impacto ambiental de la extracción de hidrocarburos.

Instituto de Estudios para el Desarrollo y la Paz (INDEPAZ): Analiza los conflictos ambientales y sociales asociados a la industria petrolera.

Universidades y centros de investigación como la Universidad Nacional y la Universidad de los Andes: Publican estudios científicos sobre mitigación de emisiones y eficiencia energética en la producción de hidrocarburos.

Plataformas de Datos Abiertos y Estudios Independientes

El acceso a bases de datos abiertas permite contrastar y validar información oficial. Algunas fuentes útiles incluyen:

Plataforma de Datos Abiertos del Gobierno de Colombia: Contiene información sobre emisiones industriales y consumo energético.

Global Carbon Atlas: Base de datos global sobre emisiones de CO₂ por país y sector económico.

Satélites de monitoreo ambiental: Herramientas como el sistema **TROPOMI** han sido utilizadas para detectar fugas de metano en infraestructura petrolera.

5.2. Técnicas de Análisis

5.2.1. *Revisión Documental*

Se realizará un análisis comparativo y detallado de la normativa vigente y estudios previos sobre emisiones y estrategias de mitigación.

Para garantizar la validez y confiabilidad de la información utilizada en esta investigación, se implementaron diversas estrategias metodológicas:

Análisis de Datos Secundarios

Se realizó una revisión sistemática de documentos oficiales, informes técnicos, estudios académicos y bases de datos internacionales sobre emisiones del sector hidrocarburos. Se aplicaron criterios de selección basados en:

- **Actualidad de los datos (preferencia por información de los últimos cinco años).**
- **Fiabilidad de la fuente (publicaciones indexadas y reportes de organismos reconocidos).**
- **Consistencia en la metodología de medición de emisiones.**

Solicitudes de Información Pública

Dado que algunos datos sobre emisiones y estrategias de mitigación no son de libre acceso, se realizaron **derechos de petición** a empresas petroleras (Anexo) Datos desglosados de emisiones por tipo de hidrocarburo y proceso.

- Informes sobre cumplimiento de normativas ambientales.

Reportes de fiscalización de emisiones fugitivas de metano en campos petroleros.

Monitoreo de Datos Satelitales y Modelos de Estimación (En revisión)

Para contrastar la información oficial con estimaciones independientes, se analizaron datos satelitales de emisiones de metano publicados por **TROPOMI (Sentinel-5P)**: Utilizado para detección de emisiones de gases efecto invernadero.

5.2.2. Comparación de estrategias

Se analizarán diferentes alternativas de reducción de GEI en términos de tendencias y sugerencias realizadas por informes académicos y científicos en alineación con la normativa colombiana.

5.2.3. Análisis de impacto

Se estimará el potencial de reducción de emisiones de cada estrategia identificada, con base en datos existentes y proyecciones de descarbonización.

Criterios de Selección de Alternativas: Para la identificación de al menos diez estrategias de mitigación, se considerarán los siguientes criterios:

Reducción de emisiones lograda.

Capacidad técnica y disponibilidad de tecnología.

Beneficios económicos y ambientales.

Compatibilidad con la regulación colombiana.

5.2.4.Limitaciones y Consideraciones

Dependencia de información, lo que puede generar restricciones en la precisión de datos.

Falta de acceso a datos específicos de empresas privadas del sector.

Cambios en la regulación o políticas climáticas que puedan modificar el panorama futuro.

A pesar del acceso a múltiples fuentes de información, la investigación enfrentó desafíos como:

Falta de transparencia en datos empresariales: Muchas petroleras no publican información detallada sobre sus emisiones o estrategias de mitigación.

Discrepancias en metodologías: Diferentes organismos utilizan metodologías de medición y factores de emisión distintos, dificultando la comparación directa de datos.

Brechas en la información satelital: Si bien los satélites permiten detectar emisiones de metano, su resolución no siempre permite identificar fuentes específicas con precisión.

Para mitigar estas limitaciones, se empleó un enfoque de triangulación de datos, combinando múltiples fuentes y metodologías para mejorar la precisión del análisis.

La recopilación de datos sobre emisiones de carbono en el sector hidrocarburos colombiano requiere una combinación de fuentes oficiales, monitoreo independiente y metodologías de validación rigurosas.

El acceso a información transparente y de calidad es esencial para evaluar el cumplimiento de los compromisos climáticos del país y diseñar estrategias efectivas de reducción de emisiones. Se recomienda fortalecer los sistemas de reporte ambiental, fomentar el acceso público a información de empresas y mejorar la capacidad de monitoreo de emisiones fugitivas mediante tecnologías avanzadas.

El uso de datos abiertos y la cooperación entre entidades gubernamentales, académicas y organizaciones internacionales serán clave para garantizar la precisión y credibilidad de los estudios sobre la huella de carbono del sector hidrocarburos en Colombia.

Las emisiones del sector hidrocarburos representan un desafío significativo para el cumplimiento de las metas de carbono neutralidad en Colombia.

Existe una brecha entre las regulaciones existentes y su implementación efectiva en la industria.

La información sobre emisiones aún presenta vacíos, lo que hace necesario fortalecer los mecanismos de monitoreo y transparencia.

Es prioritario establecer medidas de reducción de emisiones de metano y mejorar la eficiencia energética en las operaciones petroleras y gasíferas.

Este análisis servirá como base para la formulación de estrategias concretas de mitigación en los próximos capítulos de la investigación.

6. Emisiones

Para el año 2018 se reportan un total de 302.974 Gg CO2 eq de GEI, de los cuales: el 70,2% corresponde a CO2, el 24,3% a CH4, el 4,4% a N2O, el 1,1% a HFC - PFC y el 0,1% a SF6. Por su parte, las absorciones de CO2 corresponden a -23.776 Gg CO2 eq. Como resultado, las emisiones netas (balance neto) para el 2018 se estiman en 279.198 Gg CO2 eq. (IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. 2022).

El sector energía genera el 28,4 % de los GEI reportados y para el año 2018 emitió 92,940 Gg CO2 eq

Ilustración 1 Emisiones y absorciones de GEI por módulo, 1990 - 2018 (GgCo2 eq)

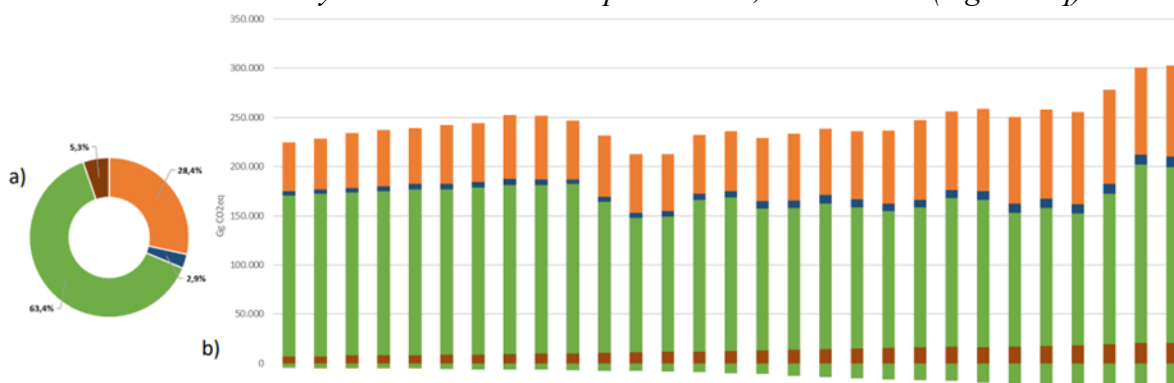


Tabla 2-2 Emisiones y absorciones de GEI agregadas por módulo, 1990 - 2018 (Gg CO2 eq)

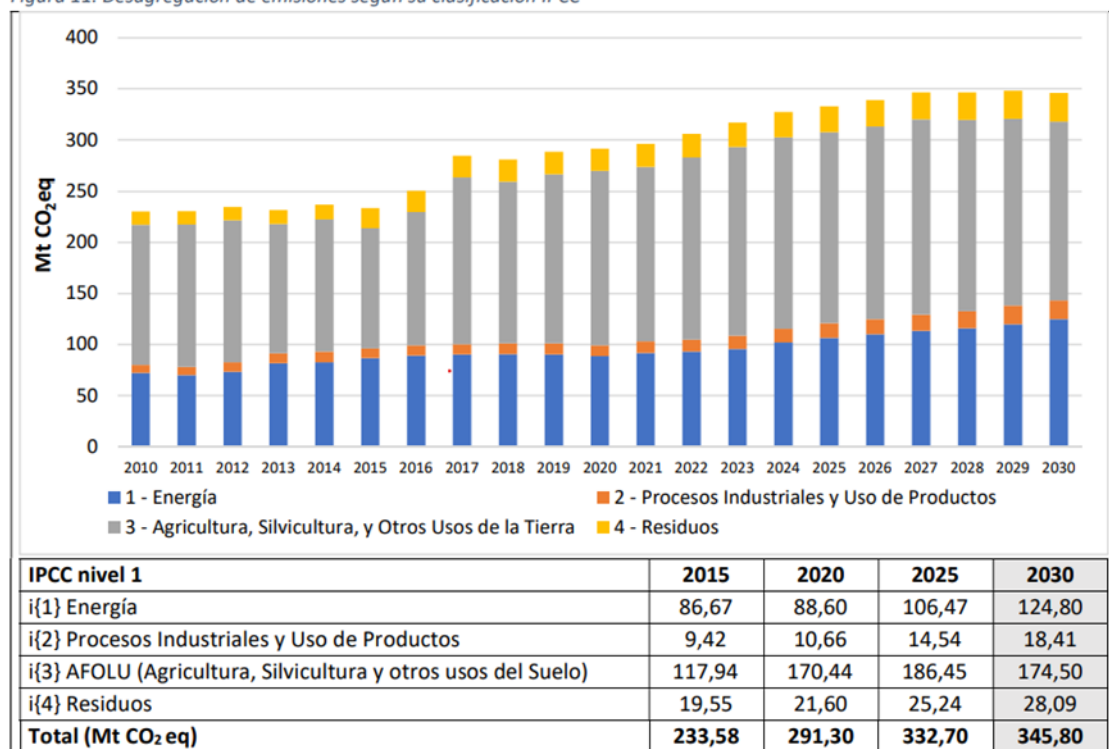
| | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Emisiones | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Energía | 50.306 | 52.109 | 55.911 | 57.168 | 57.004 | 59.468 | 60.095 | 64.702 | 64.909 | 59.744 | 61.749 | 59.431 | 58.937 | 60.025 | 61.154 | 64.156 | 67.511 | 67.449 | 69.548 | 74.469 | 81.270 | 79.752 | 83.710 | 88.318 | 90.828 | 93.446 | 95.954 | 88.715 | 92.840 |
| 2. IPPV | 4.376 | 4.483 | 4.701 | 4.997 | 5.711 | 5.953 | 5.564 | 6.027 | 5.700 | 4.729 | 5.184 | 5.201 | 5.578 | 6.074 | 6.264 | 7.454 | 7.728 | 8.364 | 7.883 | 7.343 | 7.585 | 8.146 | 9.032 | 9.206 | 8.565 | 9.543 | 10.115 | 10.171 | 10.495 |
| 3. PVPV | 163.725 | 165.138 | 169.972 | 166.866 | 168.283 | 167.726 | 169.792 | 171.795 | 171.217 | 172.109 | 153.743 | 158.805 | 157.110 | 154.097 | 155.860 | 144.111 | 144.172 | 148.106 | 145.712 | 139.837 | 141.979 | 151.479 | 149.875 | 156.277 | 140.551 | 134.195 | 133.048 | 181.323 | 179.096 |
| 4. Residuos | 6.545 | 6.999 | 7.779 | 7.947 | 8.351 | 8.951 | 8.996 | 9.581 | 9.796 | 10.152 | 10.853 | 11.204 | 11.739 | 11.957 | 13.499 | 13.379 | 13.813 | 14.403 | 15.068 | 15.826 | 16.478 | 16.687 | 16.519 | 16.620 | 17.271 | 18.058 | 19.161 | 20.493 | 20.414 |
| Total Emisiones | 224.952 | 228.718 | 234.264 | 236.977 | 239.349 | 242.097 | 244.446 | 252.106 | 251.623 | 246.784 | 231.329 | 231.441 | 232.873 | 232.153 | 235.857 | 229.090 | 233.224 | 238.324 | 236.211 | 236.894 | 247.309 | 256.059 | 258.536 | 250.420 | 258.215 | 255.273 | 277.977 | 300.762 | 302.974 |
| Absorciones | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Energía | -4.696 | -4.828 | -4.972 | -5.126 | -5.353 | -5.675 | -6.337 | -6.343 | -6.683 | -6.865 | -7.475 | -7.867 | -8.246 | -8.824 | -10.073 | -11.005 | -12.490 | -13.756 | -15.023 | -16.191 | -17.088 | -17.860 | -19.640 | -20.791 | -21.771 | -22.227 | -22.894 | -22.833 | -23.776 |
| Emisiones netas (Balance neto) | 220.257 | 223.890 | 229.292 | 231.852 | 233.996 | 236.422 | 238.109 | 245.763 | 244.940 | 239.919 | 223.853 | 224.574 | 224.627 | 223.329 | 225.784 | 218.085 | 220.734 | 224.568 | 221.188 | 220.703 | 230.220 | 238.199 | 239.296 | 229.630 | 236.444 | 232.046 | 255.083 | 277.869 | 279.198 |

Nota. Tomado de estrategia climática 2050 ministerio de ambiente Colombia.

La proyección de emisiones generados va en aumento para el sector energía hasta el año 2030.

Ilustración 2 Desagregación de emisiones según su clasificación IPCC

Figura 11. Desagregación de emisiones según su clasificación IPCC¹⁵



¹⁵ Conversión de unidades: 1000 Gg CO₂ eq = 1 Mt CO₂ eq = 1.000.000 t CO₂ eq.

Nota. Tomado de Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) de Colombia.

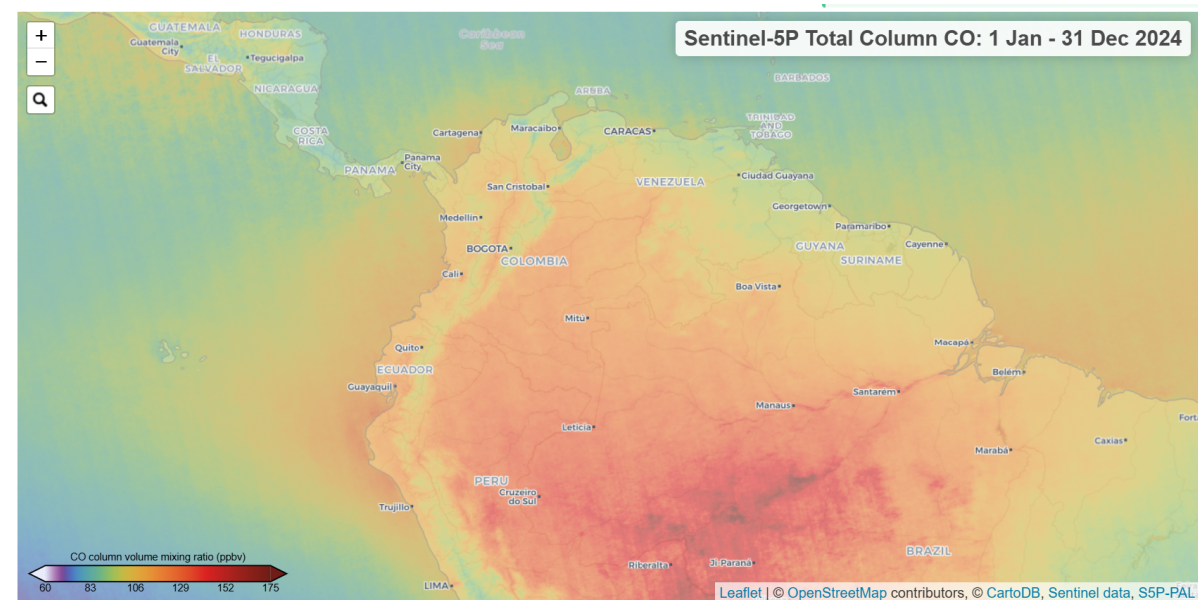
En el módulo de Energía, la mayor proporción de emisiones derivadas de la quema de combustibles fósiles proviene del sector transporte (subcategoría 1A3), el cual aporta el 12 % de las emisiones a nivel nacional y el 41 % dentro del módulo.

En esta subcategoría, el transporte terrestre es la fuente principal, con un 78 % de las emisiones (29.602 Gg CO₂eq), mientras que la aviación civil contribuye con un 11 % (4.107 Gg CO₂eq) y otros tipos de transporte con un 10 % (3.783 Gg CO₂eq). Asimismo, la subcategoría 1A1 Industrias de la Energía genera el 26 % de las emisiones del módulo (24.532 Gg CO₂eq), principalmente debido al uso de combustibles fósiles en la producción de electricidad (8.341 Gg CO₂eq), la refinación de petróleo (6.566 Gg CO₂eq) y la fabricación de combustibles junto con otras actividades industriales del sector energético (9.625 Gg CO₂eq).

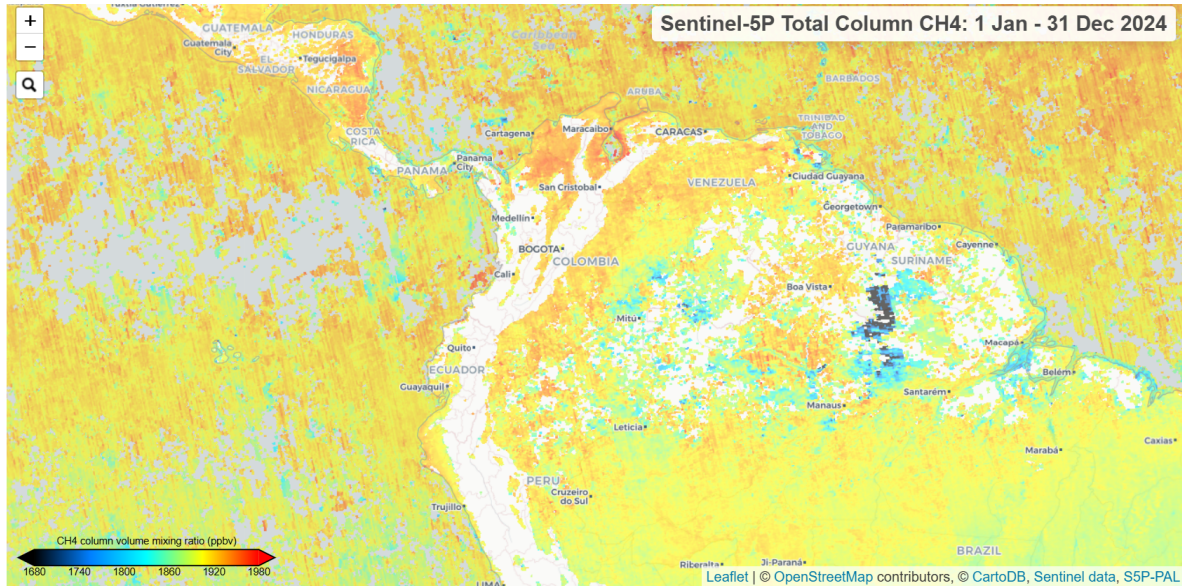
Ahora, será observadas las concentraciones de los GEI con ayuda de la herramienta TROPOMI que monitoriza gases traza y aerosoles relevantes para la calidad del aire y el clima.

El instrumento satelital TROPOMI orbita continuamente la Tierra y realiza mediciones que permiten crear mapas globales diarios de especies atmosféricas relevantes para la calidad del aire y la monitorización del clima. Estos mapas se elaboran para diversos gases traza y proporcionan información sobre la altura y la cobertura de aerosoles y nubes. Este trabajo, encargado y financiado por la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Oficina Espacial Neerlandesa (NSO), lo lleva a cabo el consorcio del Centro de Rendimiento de Misiones (MPC) de TROPOMI.

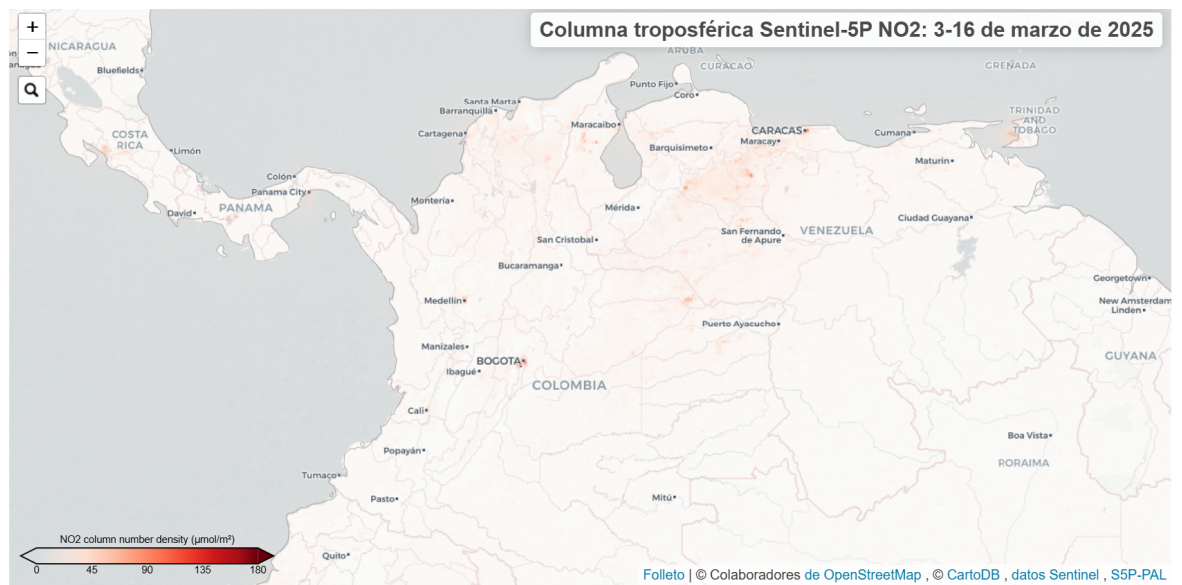
Ilustración 3 *Sentinel - 5P Total Column CO*



Nota. Tomado del instrumento de Monitoreo Troposférico (TROPOMI), satélite Sentinel – 5. (CO Column volume mixing ratio (ppbv))



Nota. Tomado del instrumento de Monitoreo Troposférico (TROPOMI), satélite Sentinel – 5. (CH4 column volume mixing ratio (ppbv))



Nota. Tomado del instrumento de Monitoreo Troposférico (TROPOMI), satélite Sentinel – 5. (NO2 column number density ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$))

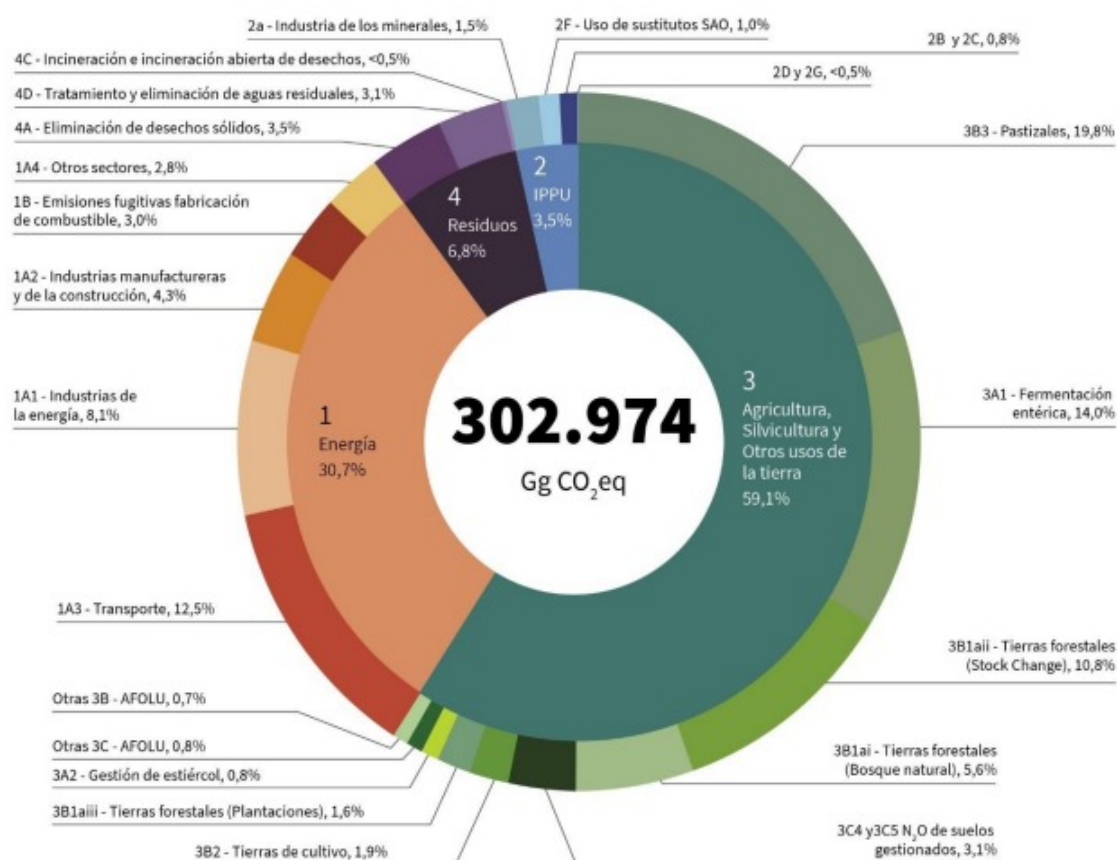
6.1. Niveles de Emisiones de Carbono en el Sector Hidrocarburos Colombiano

El sector hidrocarburos en Colombia es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Según el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (IDEAM, 2022), en solamente las emisiones fugitivas producto de la extracción,

y producción para la fabricación de combustible, se genera un 3 % de Co₂eq respecto a todas las emisiones país ya que todas las demás se genera al brindar o tomar el servicio de otros sectores, por ejemplo, la quema de combustible para transporte. Estas emisiones provienen de diversas fuentes dentro de la cadena de producción, refinación, transporte y distribución de hidrocarburos.

El análisis de los niveles de emisiones es clave para evaluar el progreso del país en el cumplimiento de sus compromisos climáticos establecidos en el Acuerdo de París y en la Ley 2169 de 2021, que busca la carbono-neutralidad al 2050.

Ilustración 4 Participación por Módulo y Subcategoría en las Emisiones GEI Año 2018



Nota. (IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. 2022)

NEUTRALIDAD DE CARBONO: HIDROCARBUROS EN LEY 2169

La industria de hidrocarburos es una de las principales emisoras de GEI debido a procesos como la extracción, refinación y transporte de petróleo y gas. Entre los principales contaminantes generados se encuentran el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), Hidrofluorocarbonos (HFC), Hexafluoruro de azufre (SF₆) y Perfluorocarbonos (PFC). En Colombia, el sector representa una fracción significativa de las emisiones nacionales de GEI. Según el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, en la cadena de valor directa del sector de los hidrocarburos las mayores fuentes de emisión directa provienen de la quema de gas en antorchas, las fugas en infraestructuras de transporte y almacenamiento, y los procesos de refinación. Respecto a las emisiones Fugitivas la identificación de los cinco procesos más críticos permitirá enfocar los esfuerzos de mitigación en aquellos con mayor impacto ambiental.

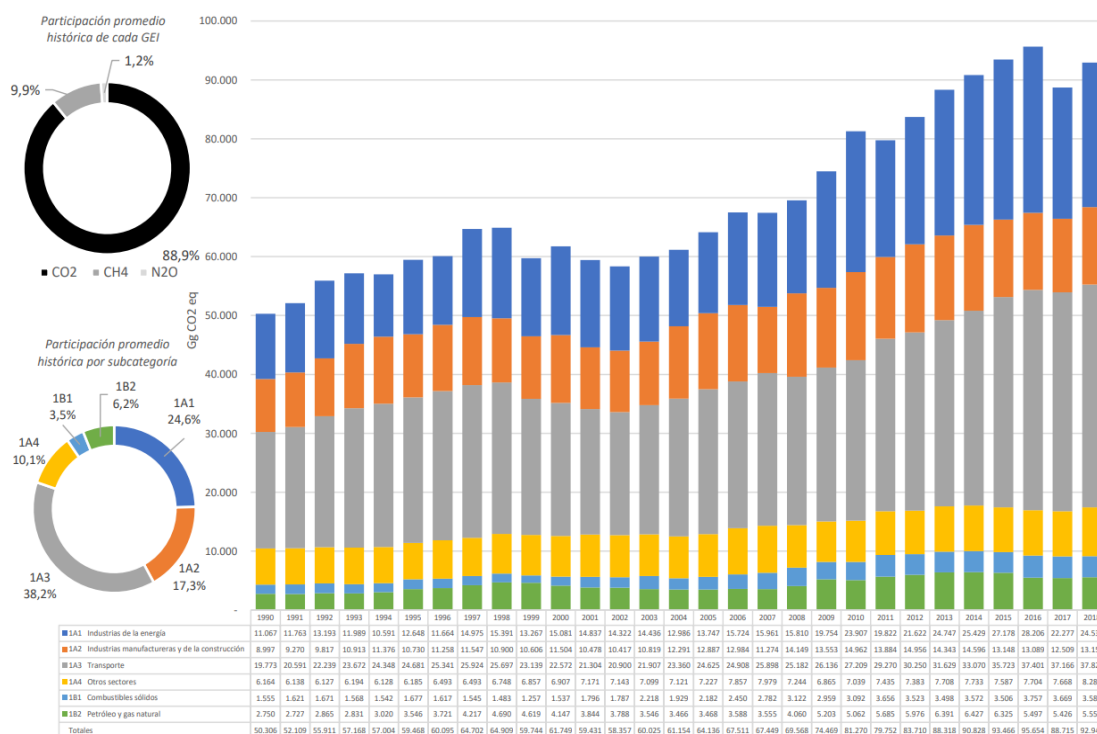
Tabla 1 GEI Directos - Gg Co2, Equivalente

| | Absorciones | | | | Emisiones | | | | | | | | | | | | | | | | 9.143,52 | 9.143,52 |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------|--------|---------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------|---------|-----------------|----|----------|----------|----------|
| | CO ₂ | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | HFC-23 | HFC-32 | HFC-125 | HFC-134a | HFC-143a | HFC-152a | HFC-227ea | HFC-236fa | HFC-245fa | HFC-365mfc | HFC-43-10mee | PFC-14 | PFC-116 | SF ₆ | | | | |
| 1B - Emisiones fugitivas provenientes de la fabricación de combustible | NA | 2.821,26 | 6.311,96 | 10,30 | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | 9.143,52 | 9.143,52 | |
| 1B2 - Petróleo y gas natural | NA | 2.671,08 | 2.876,70 | 10,30 | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | 5.558,07 | 5.558,07 | |
| 1B2a - Petróleo | NA | 2.592,51 | 1.426,75 | 10,30 | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | 4.032,46 | 4.032,46 | |
| 1B2b - Gas Natural | NA | 78,57 | 1.446,95 | 0,10 | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | 1.525,62 | 1.525,62 | |

Nota. (IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. 2022)

En concreto, las emisiones fugitivas provenientes de la fabricación de combustible provenientes de petróleo y gas natural equivale a 5558 Gg de CO₂ con tendencia creciente los últimos años (Ilustración 5), cabe resaltar que a menos que sea una crisis económica aplanar la velocidad de crecimiento requiere múltiples esfuerzos regulatorios por los países respecto a sus formas de consumo.

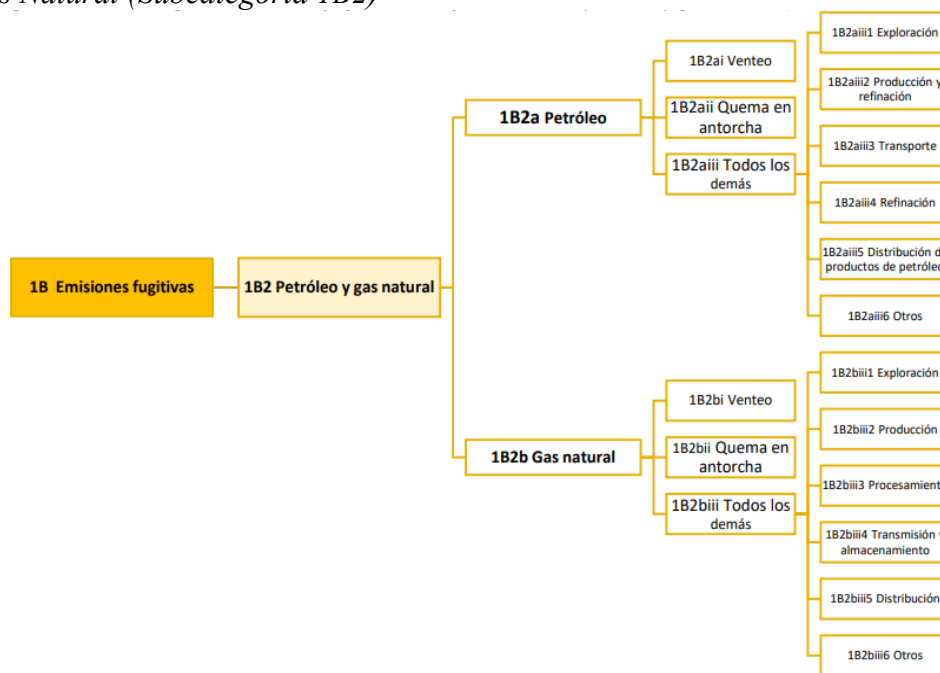
Ilustración 5 Tendencia de Emisiones de GEI Módulo de Energía por subcategoría, 1990-2018



Nota. (IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. 2022)

El color verde es la subcategoría de petróleo y gas, respecto a nuestro estudio nos centraremos en la categoría 1B Emisiones fugitivas provenientes de la fabricación de combustibles: incluye todas las emisiones intencionales y no intencionales emanadas de la extracción, el procesamiento, almacenamiento y transporte de combustibles al punto de uso final. Este grupo contempla las siguientes subcategorías: 1B1 Combustibles sólidos, 1B2 Petróleo y gas natural. Conforme al informe del inventario nacional GEI. Sin embargo, hay que tener presente que según el informe nacional del inventario de gases efecto invernadero 1990-2018 no estima la Exploración ya que las emisiones de esta subcategoría no cuentan con los factores de emisión y respecto a las subcategorías de producción y refinación no cuenta con el factor de emisión del N2O para venteo en producción de petróleo.

Ilustración 6 Emisiones Fugitivas Provenientes de la Fabricación de Combustible- Petróleo y Gas Natural (Subcategoría 1B2)



Nota. . (IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. 2022)

Comprende las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O por quema en antorcha en las actividades de petróleo y gas natural y las emisiones de CO₂ y CH₄ fugitivas por venteo y demás vinculadas a: exploración, producción y transmisión de petróleo y gas natural; concentración y refinación de petróleo crudo; almacenamiento de gas natural; distribución de productos de petróleo crudo y de gas natural. En las actividades de la cadena de extracción de petróleo y gas natural se integra la infraestructura para la producción, recopilación, procesamiento, refinación y distribución al mercado de gas natural y productos derivados del petróleo (IPCC, 2006). La cadena comienza en los pozos de producción de petróleo y gas y termina en el punto de entrega al consumidor final. (IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. 2022, página 200).

6.1.1. Fuentes de Emisiones

En este apartado se presentan los niveles de emisiones en cada etapa del proceso de producción de hidrocarburos, con un enfoque en los principales contaminantes y su impacto ambiental.

El sector hidrocarburos colombiano desempeña un papel fundamental en la economía del país, pero también es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En el marco del Acuerdo de París y la Ley 2169 de 2021, Colombia se ha comprometido a reducir sus emisiones de carbono y avanzar hacia la neutralidad climática. A continuación se identifican las principales fuentes de emisiones del sector, sus niveles actuales y el análisis de cumplimiento con la normativa nacional e internacional.

Las emisiones de carbono en la industria de hidrocarburos provienen de diversas actividades a lo largo de la cadena de valor. Se pueden clasificar en:

Emisiones Directas

Estas emisiones provienen de fuentes que son propiedad o están controladas por las empresas del sector:

Las emisiones de GEI en la industria de los hidrocarburos provienen de distintas etapas del proceso productivo, entre ellas:

Quema de gas en antorchas. La quema en antorchas (gas flaring) es el proceso de combustión controlada de gas natural asociado a la extracción de petróleo, utilizado para eliminar el gas no aprovechado. Según informes de la Agencia Internacional de Energía (AIE), América Latina y el Caribe representan alrededor del 5% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) relacionadas con la energía desde 1971 con Colombia como uno de los principales contribuyentes. De acuerdo con el Banco Mundial (2023), Colombia ocupa

el puesto 15 a nivel mundial en quema de gas en antorchas, con aproximadamente 1.3 mil millones de metros cúbicos de gas quemados anualmente.

Venteo de gas metano. El metano es responsable de alrededor del 30% del aumento de las temperaturas globales desde la Revolución Industrial, y las reducciones rápidas y sostenidas de las emisiones de metano son clave para limitar el calentamiento global a corto plazo y mejorar la calidad del aire.

El sector energético, que incluye el petróleo, el gas natural, el carbón y la bioenergía, representa casi el 40 % de las emisiones de metano derivadas de la actividad humana (AIE , 2023). El metano (CH₄), que es liberado en el venteo de gas, tiene un potencial de calentamiento 84 veces mayor que el CO₂ en un período de 20 años (IPCC, 2021). Estudios de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2023) indican que el sector hidrocarburos colombiano genera alrededor de 3.5 millones de toneladas de CO₂ equivalente solo por emisiones de metano.

Refinación y procesamiento. Uso intensivo de energía en la transformación de crudo, Uso de combustibles fósiles en calderas y hornos, la refinación del crudo requiere procesos intensivos en energía, que generan emisiones significativas de CO₂ y NO_x. Las refinerías en Colombia, como la de Barrancabermeja y Cartagena, son responsables de una gran parte de las emisiones del sector. Según el Informe de Sostenibilidad de Ecopetrol (2023):

Las refinerías colombianas emiten aproximadamente 12 millones de toneladas de CO₂ al año.

El uso de gas natural y carbón en los procesos térmicos es una de las principales fuentes de emisiones en la refinación.

Las refinerías han implementado estrategias de eficiencia energética, logrando reducir sus emisiones en un 10% desde 2015, pero aún hay un amplio margen de mejora.

En la etapa final de la cadena de valor, la distribución de productos refinados (gasolina, diésel, gas LP) genera emisiones tanto en el transporte como en los procesos de almacenamiento y distribución minorista. Se estima que:

Las estaciones de servicio generan emisiones fugitivas de compuestos orgánicos volátiles (COVs) que afectan la calidad del aire urbano.

La huella de carbono de la distribución de combustibles en Colombia representa un 5% del total de emisiones del sector hidrocarburos.

Conversión química de hidrocarburos. Durante el craqueo y la destilación, se liberan GEI en diferentes etapas del proceso.

Transporte y distribución. Emisiones fugitivas de oleoductos y gasoductos, evaporación de compuestos orgánicos en terminales de almacenamiento. Oleoductos y gasoductos: Las emisiones fugitivas de metano ocurren en puntos de conexión y válvulas, especialmente en sistemas antiguos con infraestructura deteriorada. El transporte de hidrocarburos a través de oleoductos y gasoductos genera emisiones fugitivas de metano debido a fugas en válvulas, estaciones de bombeo y puntos de conexión. Según la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH, 2023), las pérdidas de metano en el transporte de gas natural pueden alcanzar hasta un 3% del volumen total transportado, lo que representa aproximadamente 1.2 millones de toneladas de CO₂ equivalente por año.

El petróleo crudo y los derivados deben ser transportados a refinerías y mercados nacionales e internacionales. Las emisiones de CO₂ derivadas del transporte de hidrocarburos en Colombia se distribuyen de la siguiente manera:

El transporte terrestre contribuye con aproximadamente 4.5 millones de toneladas de CO₂/año, debido al uso intensivo de camiones cisterna que operan con diésel.

El transporte marítimo genera alrededor de 2.8 millones de toneladas de CO₂/año, principalmente por la exportación de petróleo crudo en buques tanque.

Evaporación de compuestos orgánicos volátiles (COVs). Durante el almacenamiento de petróleo crudo y productos refinados, los COVs se liberan al ambiente debido a cambios de temperatura y presión.

Consumo final: Combustión de hidrocarburos en sectores industriales, comerciales y residenciales.

Emissiones Indirectas

Consumo de energía eléctrica. Generación de electricidad a partir de combustibles fósiles. Las plataformas de perforación y producción utilizan motores y turbinas alimentadas por combustibles fósiles, emitiendo cantidades significativas de CO₂ y otros contaminantes. La generación de electricidad en Colombia sigue dependiendo en parte de fuentes térmicas basadas en combustibles fósiles. Las plantas termoeléctricas que abastecen la industria petrolera contribuyen indirectamente a sus emisiones de carbono. La generación de electricidad en industrias que dependen de derivados del petróleo aumenta la huella de carbono del sector. Las operaciones de perforación y producción requieren equipos pesados que funcionan con diésel o gas natural, lo que contribuye a las emisiones de CO₂, NO_x y material particulado.

Según el Ministerio de Minas y Energía (2022) El 60% de las plataformas de perforación en Colombia utilizan combustibles fósiles sin sistemas de eficiencia energética.

Se estima que las emisiones provenientes de motores y generadores en campos petroleros representan entre el 8 y 12% de las emisiones del sector.

Las estrategias de eficiencia energética y el uso de energías renovables en campos petroleros podrían reducir estas emisiones hasta en un 40% para 2030 (IEA, 2022).

Uso de productos derivados del petróleo y gas. Emisiones generadas por el consumo final de combustibles en transporte, industria y otros sectores. La combustión de gasolina y diésel en el sector transporte es una de las principales fuentes de emisiones en el país.

Logística y cadena de suministro. Transporte de equipos y productos a través de vehículos de carga y buques. La exportación e importación de hidrocarburos involucra barcos de carga con motores diésel que emiten CO₂, SO_x y NO_x.

Los vehículos de carga que transportan productos refinados dentro del país generan impactos adicionales en términos de emisiones de carbono.

6.1.2. Residuos peligrosos

En el año 2019 la generación de residuos o desechos peligrosos fue de 640.035 t, con un incremento del 0,7% en comparación con el año 2018. Los tres departamentos donde se reportó la mayor generación de residuos peligrosos fueron: Antioquia (116.489 t - 18%), Casanare (70.895 t - 11%) y Bogotá (66.517 t -10%). Las tres actividades económicas que reportaron la mayor cantidad de residuos pertenecen al sector de hidrocarburos: extracción de petróleo crudo con 274.347 t, actividades de apoyo para la extracción de petróleo y de gas natural con 45.476 t y fabricación de productos de la refinación del petróleo con 37.985 t (IDEAM, 2020), (IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. 2022, página 21 Informe Inventario GEI).

7. Normatividad Gases Efecto Invernadero

Las emisiones del sector hidrocarburos en Colombia pueden compararse con normativas internacionales y prácticas de otros países productores y no productores, sin embargo, Colombia también tiene sus propias características ecosistémicas, biodiversas y culturales .

7.1. Reportes, organismos Internacionales y Acuerdos Globales

Los gases de efecto invernadero (GEI) juegan un papel crucial en la regulación del clima, pero su acumulación excesiva debido a actividades humanas ha intensificado el calentamiento global. Para abordar este desafío, organismos internacionales y acuerdos globales han establecido mecanismos de monitoreo, reducción y regulación de emisiones.

Organizaciones y empresas internacionales proporcionan estándares de medición, informes comparativos y metodologías que permiten contextualizar los datos de Colombia en un marco global. Entre las fuentes clave destacan:

Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Proporciona metodologías estandarizadas para la cuantificación de emisiones de GEI.

Banco Mundial y su Iniciativa Global de Reducción de la Quema de Gas (GGFR). Publica información sobre quema en antorchas y reducción de metano.

Agencia Internacional de Energía (IEA). Monitorea tendencias en emisiones de carbono y eficiencia energética.

Global Methane Initiative (GMI). Plataforma de colaboración internacional para la reducción de emisiones de metano en la industria petrolera.

Estos reportes y organismos complementan los acuerdos internacionales como el *Protocolo de Kioto* y el *Acuerdo de París*, que establecen compromisos para la reducción de emisiones y la transición hacia economías sostenibles.

En el caso de Colombia, según datos del *Global Carbon Atlas*, el país ocupó el puesto #30 en emisiones de CO₂ por barril producido en 2023, con un total de 60 MtCO₂. Este tipo de información permite evaluar el desempeño ambiental del país en un contexto global y fortalecer estrategias de mitigación.

7.2. Acuerdo de París y Metas de Carbono Neutralidad

El Acuerdo de París establece un marco de acción global para la mitigación del cambio climático, adoptado en 2015 durante la 21ª Conferencia de las Partes (COP21) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), representa un hito en la lucha contra el cambio climático. Su objetivo principal es mantener el aumento de la temperatura global por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales y realizar esfuerzos adicionales para limitarlo a 1.5°C. Para ello, cada país debe presentar y actualizar sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés), las cuales establecen estrategias y compromisos específicos para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Colombia, como firmante, ha adoptado compromisos nacionales a través de sus NDC y otras normativas.

7.2.1. Objetivos del Acuerdo de París

El Acuerdo de París se basa en tres objetivos principales

Mitigación. Alcanzar el pico de emisiones de GEI lo antes posible y luego reducirlas progresivamente hasta alcanzar la carbono neutralidad en la segunda mitad del siglo XXI.

Adaptación. Fortalecer la resiliencia de los países ante los impactos del cambio climático, promoviendo medidas de adaptación que minimicen vulnerabilidades.

Financiamiento Climático. Movilizar recursos financieros para ayudar a los países en desarrollo a cumplir con sus compromisos de mitigación y adaptación.

7.2.2. Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC)

Cada país firmante del Acuerdo de París debe presentar su NDC, la cual debe ser actualizada cada cinco años con metas más ambiciosas. Entre los elementos clave de las NDC se incluyen:

Metas de reducción de emisiones. Establecen los compromisos de cada nación para disminuir sus emisiones en sectores clave como energía, transporte, industria y agricultura.

Estrategias de transición energética. Impulsan el uso de fuentes renovables y tecnologías limpias para reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

Planes de adaptación. Implementan medidas para reducir los efectos del cambio climático en ecosistemas, infraestructura y comunidades vulnerables.

7.2.3. Metas Globales de Carbono Neutralidad

Para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París, los países han fijado metas ambiciosas de carbono neutralidad. Algunas de las más relevantes incluyen:

Unión Europea. Reducción del 55% de las emisiones para 2030 y carbono neutralidad en 2050.

Estados Unidos. Reducción del 50-52% de emisiones para 2030 y carbono neutralidad en 2050.

China. Pico de emisiones antes de 2030 y carbono neutralidad en 2060.

Colombia. Reducción del 51% de GEI para 2030 y carbono neutralidad en 2050.

7.2.4. Mecanismos para Alcanzar la Carbono Neutralidad

El cumplimiento de estas metas requiere la implementación de diversas estrategias y mecanismos, entre los que destacan:

Tabla 2 Mecanismos para Alcanzar la Carbono Neutralidad

| Descarbonización del Sector Energético | Captura y Almacenamiento de Carbono (CCUS) | Mercados de Carbono y Fiscalidad Ambiental |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Sustitución de combustibles fósiles. Expansión de energías renovables como | Captura de CO ₂ en fuentes industriales. Uso de tecnologías para atrapar CO ₂ | Impuestos al carbono. Establecimiento de tributos a las emisiones de GEI para |

| | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| solar, eólica, geotérmica e hidroeléctrica. | antes de que llegue a la atmósfera. | incentivar la reducción de emisiones. |
| Eficiencia energética. Implementación de tecnologías más eficientes en la generación y consumo de energía. | Reforestación y restauración de ecosistemas. Aumento de la capacidad de los bosques y suelos para absorber carbono. | Mercados de carbono: Mecanismos de comercio de emisiones para permitir a empresas y países intercambiar permisos de emisión y compensaciones. |
| Electrificación del transporte: Promoción del uso de vehículos eléctricos y reducción del uso de combustibles fósiles en el sector transporte. | | |

7.2.5. Desafíos en la Implementación del Acuerdo de París

A pesar del compromiso global con la carbono neutralidad, existen desafíos significativos para su implementación:

Falta de financiamiento suficiente. Los países en desarrollo requieren mayores inversiones para la transición energética y adaptación climática.

Resistencia de sectores industriales. Las industrias basadas en combustibles fósiles presentan resistencia a las regulaciones y medidas de descarbonización.

Débil regulación y cumplimiento. En algunos países, la implementación efectiva de políticas climáticas es limitada debido a la falta de marcos regulatorios sólidos.

El Acuerdo de París es un esfuerzo global para frenar el cambio climático mediante la reducción de emisiones de GEI y la adopción de estrategias de adaptación. Alcanzar la carbono neutralidad es un desafío que requiere compromiso político, financiamiento, innovación

tecnológica y cooperación internacional. Aunque existen barreras significativas, las oportunidades de desarrollo sostenible, generación de empleo y mejora en la calidad de vida hacen que la transición hacia un mundo bajo en carbono sea una meta imprescindible para el futuro del planeta.

7.3. Influencia Internacional en Sector Hidrocarburos Colombiano

El país ha avanzado en la adopción de marcos normativos para la reducción de emisiones de GEI. La Ley 2169 de 2021 establece la meta de carbono neutralidad para 2050, en consonancia con la Estrategia Colombia E2050 y los compromisos adquiridos en el Acuerdo de París. Esta normativa establece lineamientos específicos para la reducción de emisiones en sectores clave, incluyendo hidrocarburos.

Para dimensionar la influencia internacional en documentos y políticas de carbono, se han identificado varios informes, políticas y estudios relevantes que lo contextualizan en un marco internacional.

IDEAM (2022). "Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero", que detalla que el sector hidrocarburos contribuyó de forma directa e indirecta con aproximadamente el **22% de las emisiones totales de GEI** en Colombia en 2021.

ANH (2021). "Monitoreo de emisiones en la industria petrolera", que resalta que el venteo de gas sigue siendo una práctica común en varios campos petroleros, a pesar de los esfuerzos regulatorios.

Informe de Ecopetrol (2023). Datos sobre las estrategias de reducción de emisiones en refinerías y proyectos de eficiencia energética, que incluyen el uso de captura de carbono y energías renovables en operaciones específicas.

ANLA. Batería de Indicadores de Adaptación al Cambio Climático y Mitigación de GEI, Hoja de Ruta para la Articulación entre las Compensaciones Ambientales y el Cambio

Climático, Documento que aborda estrategias para reducir las emisiones de GEI en diversos sectores, enfatizando la importancia de la mitigación en el desarrollo sostenible.

UPME. Resolución 762 de 2023 que establece directrices relacionadas con la gestión del cambio climático en el sector energético.

Resolución 320 de 2022. Adopta medidas para la mitigación de emisiones en el sector energético, en línea con el Protocolo de Kioto y otros acuerdos internacionales.

Ministerio de Minas y Energía. Plan Integral de Gestión del Cambio Climático del Sector Minero Energético (PIGCCme 2050). Este plan establece estrategias y acciones para reducir las emisiones de GEI en el sector minero-energético, alineándose con la Ley 1931 de 2018 y la Contribución Nacionalmente Determinada de Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto 298 de 2016. Establece la organización y funcionamiento del Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA), definiendo roles y responsabilidades para la adaptación y mitigación del cambio climático en Colombia.

Senado de la Republica. La Ley 2169 de 2021 de Colombia, conocida como la Ley de Acción Climática, establece el marco normativo para la mitigación y adaptación al cambio climático en el país, así mismo es el principal documento base de esta investigación.

Estos informes constituyen la base del análisis sobre la situación actual del sector en términos de emisiones y cumplimiento normativo. La evidencia muestra que Colombia enfrenta retos importantes en la reducción de emisiones, pero también oportunidades para mejorar su desempeño ambiental mediante inversiones en tecnologías limpias y regulaciones más estrictas.

Finalmente, aunque los informes y política anteriores son reelevantes tambien es importante revisar los informes de las Empresas Petroleras participes del sector de los Hidrocarburos Colombiano (Ver tabla 3) con contratos activos de la ANH, algunas de estas publican reportes de sostenibilidad y responsabilidad ambiental. Estos informes incluyen información sobre:

Volumen de emisiones de CO₂ y metano, estrategias de mitigación implementadas, niveles de eficiencia energética en sus operaciones, en sus respectivos informes de desarrollo sostenible.

Sin embargo, el acceso a información detallada de empresas privadas sigue siendo un desafío, ya que muchos datos se consideran confidenciales o estratégicos.

Tabla 3 *Empresas Petroleras Operadoras con Contrato ANH*

| | |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Ecopetrol S.A. | Invepetrol Limited Colombia |
| Perenco Colombia Limited | Petroleos Sud Americanos Sucursal Colombia |
| Gran Tierra Energy Colombia GmbH Sucursal Colombia | Vetra Exploracion Y Produccion Colombia S.A.S. |
| Parex Resources Colombia Ltd. Sucursal | Andes Operating Company Llc Sucursal Colombia |
| Verano Energy (Switzerland) Ag Sucursal | Ongc Videsh Limited Sucursal Colombiana |
| Petroleos Colombianos Sa | Mkms Enerji Sucursal Colombia |
| Oiru Corporation | Green Power Sucursal Colombia |
| Interoil Colombia Exploration And Production | Saint Aubin International Sas |
| Toc Energia Sucursal Colombia | Emerald Energy Plc Sucursal Colombia |
| Sierracol Energy Arauca Llc | San Agustin Energy Corp Sucursal Colombia |
| Hocol S.A. | Tecpetrol Colombia Sas |
| Montajes Jm S.A. | Gran Tierra Operations Colombia GmbH Sucursal |
| Frontera Energy Colombia Corp., Sucursal Colombia | Suelopetrol, C.A. Sucursal Colombia |
| Union Temporal Omega Energy | Carrao Energy S.A. Sucursal Colombia |
| Colombia Energy Development Co | Amerisur Exploracion Colombia Limitada |
| Lewis Energy Colombia Inc | Canacol Energy Colombia Sas |
| New Granada Energy Corporation Sucursal Colombia | Iberoamericana De Hidrocarburos Energy Colombia S.A.S |
| Perenco Oil And Gas Colombia Limited. | Tpl Colombia Ltd - Sucursal Colombia |

| | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Geopark Colombia S.A.S. | Mansarovar Energy Colombia Ltd |
| Petrosantander (Colombia) Inc. | Hupecol Operating Co Llc |

Nota. Las anteriores empresas se trataron de contactar y solamente algunas de ellas han dado respuesta vía derecho de petición para aportar a la presente investigación.

7.4. Normativa Colombiana y Metas de Carbono Neutralidad

Colombia ha desarrollado un marco normativo sólido para enfrentar el cambio climático y avanzar hacia la carbono neutralidad. A través de leyes, decretos y políticas públicas, el país busca reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y adaptarse a los efectos del cambio climático.

Entre los principales instrumentos normativos se destacan la *Ley 1931 de 2018*, que establece la gestión del cambio climático en el país, y la *Ley 2169 de 2021*, que define la Estrategia de Largo Plazo para la Carbono Neutralidad. Además, el *Plan Nacional de Desarrollo* y la *Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC)* fijan objetivos específicos para reducir las emisiones y promover el desarrollo sostenible.

Colombia se ha comprometido a alcanzar la carbono neutralidad para 2050, lo que implica reducir drásticamente sus emisiones mediante la transición energética, la reforestación, la eficiencia industrial y la adopción de tecnologías limpias. Estas metas alinean al país con los acuerdos internacionales y refuerzan su compromiso con un futuro sostenible.

7.4.1. Ley 2169 de 2021 – Política de Carbono Neutralidad

La Ley 2169 de 2021 establece el compromiso de Colombia con la carbono neutralidad para 2050, alineando sus objetivos con los compromisos internacionales.

Esta ley formaliza el compromiso de Colombia con la carbono neutralidad y establece la obligación de desarrollar políticas y estrategias para reducir las emisiones de GEI. Sus principales disposiciones incluyen:

Objetivo.

Lograr la carbono neutralidad en Colombia para 2050.

Reducir en un 51% las emisiones de GEI para 2030.

Impulsar mecanismos de mitigación, adaptación y compensación de emisiones.

Fortalecimiento de instrumentos de financiamiento climático.

Incentivos para la transición energética y uso de energías renovables.

Implicaciones Técnicas.

Desarrollo de inventarios de emisiones. en todas las fases de producción.

Aplicación de límites máximos permisibles para emisiones de metano y CO₂ en operaciones de exploración y producción.

Promoción de tecnologías de captura de carbono y almacenamiento geológico (CCUS).

Nuestro referente de apoyo es la ley 2169 de 2021 que en su artículo 8 define medidas del sector de minas y energía.

Artículo 8. Medidas del Sector Minas y Energía. El Ministerio de Minas y Energía y las entidades nacionales y territoriales, en el marco de sus competencias, deberán incorporar en los instrumentos sectoriales de planificación existentes y futuros, acciones orientadas a alcanzar las metas país en materia de mitigación, así como a garantizar las condiciones habilitantes para la implementación y avance en la consolidación de las siguientes medidas mínimas:

Acciones de eficiencia energética en la cadena de la energía eléctrica, hidrocarburos y minería, con metas y estrategias para la mejora energética, reducción de emisiones y cuantificación de los co-beneficios asociados.

Actividades que favorezcan la adecuada gestión de las emisiones fugitivas en la cadena de hidrocarburos, centrándose en la reducción de fugas, la recuperación de gas asociado, la implementación de medidas de eficacia de quema y la mejora de la información sobre la generación de emisiones fugitivas y medidas para su captura, recuperación y/o aprovechamiento con el fin de monitorear, controlar y reducir dichas emisiones.

Acciones para reducir la diferencia de consumo de energía eléctrica entre horas pico y valle, buscando un aplanamiento de la curva de demanda y la disminución de las emisiones del Sistema Interconectado Nacional (SIN), a través de la gestión de la generación con fuentes menos contaminantes.

La diversificación de la matriz energética nacional y la transformación de las Zonas No Interconectadas (ZNI), mediante la dinamización de la generación eléctrica y autogeneración a través de Fuentes No Convencionales de Energías Renovables (FNCER), así como el aumento de la cobertura para la prestación del servicio de energía eléctrica, por medio del uso de tecnologías confiables con un menor factor de emisión o su integración al Sistema Interconectado Nacional.

Para estimular la conversión de carbón a energías más limpias, los agentes de las cadenas de energía eléctrica y gas combustible podrán viabilizar nuevos proyectos o ampliaciones que impliquen el aumento de la demanda (Congreso de la república de Colombia, Diciembre de 2022, Ley 2169 de 2021).

7.4.2.Marco Legal Colombiano

Resolución 40066 de 2021 – Reducción de Emisiones de Metano en el Sector Hidrocarburos

Objetivo. Regular el control y monitoreo de emisiones de metano, Prohibir el venteo y quema rutinaria de gas en operaciones petroleras.

Implicaciones Técnicas. Aplicación de sensores avanzados de monitoreo continuo de emisiones, Uso de sistemas de recuperación de gas en instalaciones de producción, Integración de modelos predictivos para identificar fugas y optimizar procesos.

Resolución 40103 de 2021 – Incentivos a la Captura y Uso de CO₂

Objetivo. Fomentar la captura, uso y almacenamiento de CO₂ (CCUS) en el sector industrial, Establecer incentivos tributarios para empresas que implementen tecnologías de captura.

Implicaciones Técnicas. Desarrollo de infraestructura para almacenamiento geológico de CO₂, Integración de sistemas de captura en refinerías y plantas de procesamiento de gas.

Decreto 1073 de 2015 – Uso de Energías Renovables en el Sector Industrial

Objetivo. Diversificar la matriz energética en sectores de alto consumo, Incentivar el uso de energías renovables no convencionales.

Implicaciones Técnicas. Implementación de energía solar y eólica en operaciones petroleras, Desarrollo de biocombustibles como alternativa para reducir el consumo de diésel en el sector.

Política Nacional de Cambio Climático (PNCC)

La PNCC es el marco estratégico para la acción climática en Colombia. Sus objetivos incluyen:

Integrar la gestión del cambio climático en la planificación del desarrollo.

Implementar medidas de mitigación y adaptación en sectores clave.

Fomentar la investigación y el desarrollo de tecnologías limpias.

Respecto al sector de petróleo y Gas define en su línea de acción Propender y promover la adecuada gestión de las emisiones fugitivas que se presentan durante las actividades en los sectores de minas y de hidrocarburos.

Decreto 446 de 2022 sobre Mercados de Carbono

Este decreto establece los lineamientos para la operación de los mercados de carbono en Colombia, permitiendo a empresas e industrias compensar sus emisiones mediante la compra de créditos de carbono.

Normas Ambientales Relacionadas

Ley 1931 de 2018. Regulación sobre cambio climático y adaptación.

Decreto 926 de 2017. Mecanismos de compensación de emisiones a través de bonos de carbono.

Resolución 1447 de 2018 MADS. Monitoreo y control de emisiones atmosféricas.

7.4.3. Estrategia Climática de Largo Plazo de Colombia (E2050)

El sector de los hidrocarburos aún no cuenta con una estrategia propia del sector para las diversas opciones tecnológicas y operacionales que le permitan reducir sus emisiones de GEI. No obstante la referencia general que lo acobija es la estrategia a largo plazo Colombia E2050: El camino colombiano hacia la carbono neutralidad.

Este documento en su apuesta 7 desarrolla la generación con combustibles fósiles y adopta estrategias de eficiencia energética e integra sistemas de CCUS y otras estrategias de compensación, para lograr la carbono neutralidad operativa. Esta misma y en conjunto con las NDC y todas las generadas de forma oficial serán parte de nuestro estudio para alcanzar el objetivo planteado.

El estado del arte de las opciones de absorción permitió identificar doce alternativas tecnológicas para la categoría no AFOLU, estas opciones se analizaron y validaron a través de la consulta con expertos y posteriormente fueron priorizadas empleando el proceso de jerarquía

analítica (AHP, por sus siglas en inglés), con lo cual se identificaron dos alternativas de captura y almacenamiento de carbono —CCS postcombustión y CCS oxyfuel— y una alternativa de captura, uso y almacenamiento de carbono —recuperación mejorada de petróleo (EOR, por sus siglas en inglés)—, que serían las opciones tecnológicas de entrada para implementar la estrategia de carbono neutralidad en el país a 2050 (CAIA Ingeniería 2021).

La E2050 es la hoja de ruta para la carbono neutralidad, estructurada en los siguientes pilares:

Descarbonización del sector energético. mediante la transición a fuentes renovables.

Movilidad sostenible. con la promoción del transporte eléctrico y combustibles alternativos.

Gestión de suelos y bosques. para la captura de carbono y reducción de la deforestación.

Tabla 4 Metas 2025-2050

| <i>Metas a Corto Plazo (2025-2030).</i> | <i>Metas a Mediano Plazo (2031-2040).</i> | <i>Metas a Largo Plazo (2041-2050).</i> |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Reducción del 51% de emisiones de GEI. | Electrificación del transporte y desarrollo de infraestructura para movilidad sostenible. | Carbono neutralidad en todos los sectores de la economía. |
| Implementación de impuestos al carbono y mercados de emisiones. | Reducción significativa del uso de carbón en la matriz energética. | Transformación total de la matriz energética con energías 100% renovables. |
| Expansión de fuentes de energía renovable (solar, eólica, hidroeléctrica). | Implementación a gran escala de tecnologías CCUS. | Conservación y restauración de ecosistemas estratégicos para captura de carbono. |

Nota.

Las siguientes son las últimas contribuciones determinadas por Colombia en cumplimiento del acuerdo de París, la ley 2169 de 2021 y el plan 2050.

Consideraciones NDC

Consideraciones de las Metas establecidas y relacionadas con el sector en el Portafolio De Metas De Adaptación Al Cambio Climático Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Colombia 2020.

Meta 1. Incorporación de adaptación al cambio climático en los instrumentos sectoriales, a través de desarrollo de lineamientos, herramientas y criterios que orienten la gestión de la adaptación en el sector.

Meta 3. Desarrollar acciones estructurales y no estructurales de gestión del riesgo para la adaptación al cambio climático en el 30 % de los municipios priorizados por susceptibilidad al desabastecimiento por temporada seca y temporadas de lluvias (2030).

Meta 8. Línea estratégica de infraestructura resiliente. A 2025 un instrumento de planificación sectorial de hidrocarburos uno de minería de carbón y uno de energía eléctrica cuentan con lineamientos de cambio climático orientados al aseguramiento de las condiciones de operatividad integral bajo nuevos escenarios de demandas operativas y ambientales.

Hito de cumplimiento. A 2020 se contará con un instrumento de planificación de transporte de hidrocarburos con lineamientos de cambio climático.

Meta 9. Línea estratégica de información para la adaptación: A 2025 contar con una metodología de análisis de riesgos climáticos actualizada, junto con una estrategia de actualización de manera periódica a nivel nacional y empresarial.

Hitos de cumplimiento. A 2020 se definirá una estrategia metodológica para la actualización del análisis de vulnerabilidad ante el cambio climático del sector minero energético.

A 2022 se logrará la alienación de la metodología de riesgos actualiza y ajustada a las necesidades empresariales.

A 2025 se contará con una metodología de análisis de riesgos climáticos actualizada, junto con una estrategia de actualización de manera periódica a nivel nacional y empresarial.

Meta 11. Mínimo 10%* de pequeñas, medianas y grandes empresas de los sectores priorizados han implementado estrategias, acciones o proyectos de adaptación al cambio climático. Este porcentaje debe ser evaluado en función del resultado de la Encuesta Ambiental Industrial.

Hitos de Cumplimiento. A 2021 se cuenta con el análisis de los resultados de la Encuesta Ambiental Industrial del DANE.

A 2022 se cuenta con la priorización sectorial e información en cuanto a adaptación del sector, con portafolio de medidas de adaptación definido.

A 2023 se cuenta con programa integral del sector CIT con enfoque en adaptación en implementación (fortalecimiento de capacidades).

A 2030 se cuenta con proyectos implementados, así como empresas acompañadas en estrategias, acciones o proyectos de adaptación.

Meta 20. A 2030 el país contará un Sistema Integrador de Información sobre Vulnerabilidad, Riesgo y Adaptación al cambio climático (SIIVRA), que permita monitorear y evaluar la adaptación al cambio climático en Colombia articulado al Sistema Nacional de Información de Cambio Climático (SNICC).

Los hitos (avances) en los alcances de la línea base serán. Porcentaje de avance estimado al año 2022: 60% (se espera que en el año 2022 se puedan tener reportes con información seleccionada y priorizada de corto plazo en relación con la disponibilidad de esta).

- Porcentaje de avance estimado al año 2025: 80% - Porcentaje de avance estimado al año 2030:

100% Los hitos (avances) en los alcances de monitoreo y evaluación de la adaptación serán: - Porcentaje de avance estimado al año 2022: 60% - Porcentaje de avance estimado al año 2025: 80% - Porcentaje de avance estimado al año 2030: 100% Los hitos (avances) en los alcances de articulación del SIIVRA al Sistema Nacional de Información de Cambio Climático (SNICC) serán: - Porcentaje de avance estimado al año 2022: 33% - Porcentaje de avance estimado al año 2025: 66% - Porcentaje de avance estimado al año 2030: 100% (El SIIVRA articulado al SNICC, expresado en la interoperabilidad con los sistemas y herramientas que conforman el SNICC).

Meta 23. Incremento en un 15% el porcentaje de ecosistemas o unidades de análisis ecosistémicas no representados o subrepresentados incluidas en el SINAP.

Meta 25. Inclusión de consideraciones de cambio climático en los instrumentos de manejo y control ambiental de proyectos obras y/o actividades de competencia de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) a partir del año 2020.

Hitos de Cumplimiento. A 2022 las autorizaciones ambientales de proyectos del sector hidrocarburos, minería, energía e infraestructura incluyen consideraciones de cambio climático.

A 2026 se implementarán de medidas en los sectores: hidrocarburos, minería, energía e infraestructura y se incluirán consideraciones en los instrumentos de manejo y control ambiental de proyectos del sector de agroquímicos.

A 2030 los instrumentos de manejo y control ambiental de proyectos de los sectores: hidrocarburos, minería, energía, infraestructura y agroquímicos implementarán medidas de cambio climático.

Portafolio De Medidas Sectoriales De Mitigación Del Cambio Climático Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Colombia 2020.

Meta principal de reducción de emisiones de GEI en 2030 (tCO₂eq) El potencial modelado de la medida aporta a la Meta del sector minero energético de 11,2MtCO₂e.

Medida 1. Eficiencia Energética. Para hidrocarburos, se estima modela una reducción paulatina de energía hasta alcanzar 7,53% de ahorro en el 2020 y se mantiene hasta 2030.

Para generación eléctrica, las nuevas plantas entran con base a la mejor tecnología disponible del reporte Capital Cost and Performance Characteristic Estimates for Utility Scale Electric Power Generating Technologies (2020) de la EIA. Las plantas existentes separan las tecnologías de ciclo Rankine regenerativo y Ciclo combinado con un potencial de ahorro entre 2.7% y 3.6%, respectivamente, aplicado a las centrales con una vida útil no mayor a 20 años. Para minería se modelaron potenciales de ahorro estimados de potencial de ahorro de diésel de 9,9 TJ por año. Para hidrocarburos, se estima modela una reducción paulatina de energía hasta alcanzar 7,53% de ahorro en el 2020 y se mantiene hasta 2030.

Medida 2. Emisiones Fugitivas. Esta línea estratégica busca promover la adecuada gestión de las emisiones fugitivas asociadas a la cadena productiva de los hidrocarburos, y aprovechar el gas natural capturado para otros fines. Así mismo fomenta el aprovechamiento de estas emisiones para que las actividades de estos sectores sean sostenibles, lo cual puede representar un beneficio económico para las empresas. El potencial de mitigación modelado se encuentra entre 3,24MtCO₂e (PIGCCme) y 0,39 Mt CO₂e (Consultoría actualización NDC VITO-UNIANDES et al, 2020)

Para la recuperación de glicol, el gas tratado por deshidratación a través de glicol es del 60% sobre el gas producido en bruto (producción + reinyección) y se considera como gas natural. Se ajusta el Factor de Emisión a IPCC Nivel 1. Para la recuperación en tanques de condensados, se trabaja con una relación gaspetróleo pesado de 33.6 scf/bbl; se asume que el

23% del crudo requiere ser conducido a tanques para almacenamiento y que todo el gas recuperado se considera como gas natural. Para los compresores de viga, sólo se implementa en pozos con bombeo mecánico que presentan venteo con índice de productividad se estima en 0.3; se asumen 4 6 compresores para conectar 91 pozos y se aplica en 455 pozos (70% del total potencial a aplicar) los cuales representan el 70% del máximo de pozos totales proyectados para la aplicación de la medida.

Medida 3. Gestión de la Demanda. Esta línea estratégica busca reducir la diferencia de consumo de energía eléctrica entre horas pico y valle, gestionar la generación de energía eléctrica en horas valle a partir de fuentes no contaminantes y promover para la futura implementación de tecnologías como las redes inteligentes y las tarifas dinámicas. El potencial de mitigación modelado se encuentra entre 2,01MtCO₂e (PIGCCme) y 0,22 MtCO₂e (Consultoría Actualización NDC VITO-UNIANDES et al.)

Medida 4. Generación de Electricidad. Esta línea estratégica tiene como objetivo la diversificación de la matriz energética colombiana, la promoción de la autogeneración de energía mediante fuentes alternativas y la transformación de la generación energética en las Zonas No Interconectadas. Además, buscará la armonización de los requisitos ambientales para el desarrollo de las FERNC (fuentes de energía renovable no convencionales) en concordancia con los objetivos, referente a este tema, planteados en el Conpes de crecimiento verde 3934. El potencial de mitigación modelado se encuentra entre 4,74MtCO₂e (PIGCCme) y 7,98 MtCO₂ eq (Consultoría Actualización NDC, VITO-UNIANDES et al, 2020)

Medida 19. Movilidad Eléctrica. Se pretende crear un entorno normativo y financiero que permita acelerar la transición hacia la movilidad eléctrica , diseñando e implementando políticas; con el fin de establecer estándares regulatorios y técnicos para la comercialización y operación de vehículos eléctricos; además de implementar estrategias de comunicación y

desarrollo de capacidades y definir un esquema de tarifas eléctricas para el transporte y establecer paridad de la tecnología con el fin de generar demanda en el mercado.

Medida 28. Reducción de emisiones de GEI por el uso de productos sustitutos de las sustancias que agotan la capa de ozono (HFC) /Línea buenas prácticas y uso eficiente de los recursos. La medida busca disminuir las emisiones de GEI por la reducción del uso de productos sustitutos de las sustancias que agotan la capa de ozono (HFC), por cambio hacia sustancias con menor potencial de calentamiento global.

Medida 32. Mecanismos de fijación de precios al carbono. Impuesto al carbono. Colombia no ha sido ajena a la utilización de mecanismos para la fijación de precios al carbono, entendidos como mecanismos e incentivos diseñados, desarrollados e implementados por todos los niveles de gobierno con el propósito de que los entes regulados (personas jurídicas o naturales, públicas o privadas) muestren cambios de comportamiento y asuman los beneficios y costos relacionados con la mitigación de gases de efecto invernadero y adaptación al cambio climático, propendiendo por la gestión del cambio climático con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la población y de los ecosistemas del país frente a los efectos de este fenómeno y promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y un desarrollo bajo en carbono. Entre estos instrumentos, se encuentra actualmente el impuesto al carbono, que corresponde a un valor relacionado con el contenido de carbono de los combustibles fósiles gravados de acuerdo con lo establecido por la Ley 1819 de 2016. Este valor en 2020 corresponde a 17.211 COP por tonelada de CO₂.

Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)

Por Empresa

Tabla 5 *Compromisos NDC Ecopetrol*

| | | | |
|-----------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Ecopetrol | Hidrocarburos | <p>6. Ecopetrol se comprometió en 2019 a reducir sus emisiones en 20% al año 2030 alineado con la meta país definida en 2015. La compañía espera aumentar su ambición para contribuir a enfrentar los efectos del cambio climático. Para este propósito, la compañía estableció un Plan de Descarbonización fundamentado en 4 líneas de acción: (i) actualización continua del inventario de emisiones de GEI, (ii) implementación de proyectos de reducción de emisiones, (iii) compensación de emisiones a través de soluciones basadas en la naturaleza, y (iv) definición y puesta en marcha de una hoja de ruta hacia la carbono-neutralidad. Dentro de estos proyectos se encuentran:</p> <p>a) Proyecto de aprovechamiento de Gas en Tea, para generar energía eléctrica al Campo Casabe; b) Primera sombrilla de generación solar fotovoltaica de Ecopetrol, que cubre parte de los proyectos incluidos en la meta propuesta por la compañía de generar para autoconsumo 400 MW de energías renovables a 2023.</p> | Minas y energía Forestal |
|-----------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|

Nota. Tomado de Ministerios de Minas y Energía 2021.

8. Comparación Internacional y Evaluación del Cumplimiento

Colombia, en términos de intensidad de carbono en la producción de petróleo y gas, se encuentra en una posición intermedia a nivel global. Según el **Global Carbon Atlas (2023)**.

Colombia ha avanzado en la reducción de emisiones de CO₂ en los últimos años, pero sigue enfrentando desafíos importantes en el control de emisiones fugitivas de metano y en la reducción del impacto ambiental de su sector de hidrocarburos.

El sector hidrocarburos colombiano contribuye significativamente a las emisiones de carbono del país, con impactos en múltiples etapas de la cadena de producción. Si bien existen esfuerzos regulatorios y tecnológicos para mitigar estas emisiones, todavía hay brechas significativas en el monitoreo, la implementación de energías renovables y la reducción del metano.

Para mejorar el cumplimiento con los compromisos de carbono neutralidad, Colombia debe:

Reducir la quema en antorchas y el venteo de metano mediante regulaciones más estrictas y tecnologías de captura.

Modernizar la infraestructura de oleoductos y gasoductos para reducir fugas de metano.

Implementar energías renovables en operaciones petroleras para disminuir la dependencia de combustibles fósiles.

La transición hacia una economía baja en carbono en el sector hidrocarburos es un desafío complejo, pero esencial para el cumplimiento de los compromisos climáticos del país.

8.1. Evaluación del Cumplimiento Normativo del Sector Hidrocarburos

El sector hidrocarburos en Colombia debe alinearse con un marco regulatorio compuesto por normas nacionales e internacionales. A nivel global, el **Acuerdo de París** establece la meta de limitar el calentamiento global a menos de 2 °C y preferiblemente a 1.5 °C por encima de los niveles preindustriales. Colombia, como país firmante, ha asumido compromisos de reducción de emisiones a través de sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) en línea con Planes de Gestión Integral del Cambio Climático del Sector Minero-Energético.

8.1.1. Cumplimiento del Sector Hidrocarburos en Colombia

Colombia se comprometió a reducir sus emisiones en **un 51% para 2030**, lo que implica medidas específicas en el sector hidrocarburos.

La falta de regulación efectiva sobre el venteo de gas metano y la quema en antorchas representa un reto para el cumplimiento de las metas.

Algunas empresas han adoptado compromisos voluntarios para reducir emisiones, pero no todas presentan planes claros y medibles.

A pesar de los avances regulatorios, el sector hidrocarburos colombiano enfrenta retos significativos en la reducción de emisiones. Diversos informes han evaluado el nivel de cumplimiento y los desafíos clave:

Plan Nacional de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero (2022). Indica que el sector hidrocarburos no ha alcanzado las metas de reducción esperadas, especialmente en la mitigación del metano.

IDEAM (2022). Reporta que, aunque la industria ha mejorado en la reducción de la quema en antorchas, el venteo de gas sigue siendo un problema crítico.

Informe de la Contraloría General de la República (2023). Advierte sobre la falta de implementación efectiva de mecanismos de compensación de carbono y señala que solo el 40% de las empresas han presentado planes concretos de reducción de emisiones.

8.1.2. Brechas y Desafíos en el Cumplimiento

Falta de Monitoreo y Transparencia

Uno de los principales obstáculos es la ausencia de un sistema de monitoreo robusto y transparente. Según el World Bank Methane Emissions Reduction Report (2020), en Colombia existe una subestimación de las emisiones de metano, lo que impide una medición precisa del impacto ambiental.

Insuficiencia de Incentivos Económicos

El informe del Carbon Pricing Leadership Coalition (2022) resalta que el precio del carbono en Colombia sigue siendo bajo en comparación con estándares internacionales, lo que reduce la presión sobre las empresas para reducir sus emisiones.

Dificultades en la Implementación de Tecnologías de Reducción de Emisiones

Aunque existen avances en la captura y almacenamiento de carbono, solo algunas empresas han adoptado estas tecnologías. Un análisis de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2023)

señala que la implementación de CAC en Colombia sigue siendo limitada debido a altos costos y barreras regulatorias.

8.1.3.Recomendaciones para Mejorar el Cumplimiento

Para alinear el sector con las metas de carbono neutralidad, se requieren acciones urgentes:

Fortalecimiento del monitoreo de emisiones. Implementación de sensores avanzados y reportes auditados por entidades independientes.

Aumento del precio del carbono. Ajuste progresivo del impuesto al carbono para incentivar la reducción de emisiones.

Subsidios e incentivos para la captura de carbono. Apoyo financiero para empresas que inviertan en tecnologías de reducción de GEI.

Normativas más estrictas sobre venteo y quema de gas. Adopción de estándares internacionales más exigentes y sanciones más severas para empresas incumplidas.

Promoción de energías limpias en operaciones petroleras. Incentivar el uso de fuentes renovables en actividades de exploración y producción.

En conclusión, aunque Colombia ha avanzado en la regulación del sector hidrocarburos en materia de emisiones, aún enfrenta desafíos significativos. La implementación de políticas más estrictas y un mayor compromiso empresarial son fundamentales para alcanzar los objetivos de carbono neutralidad en las próximas décadas.

Tabla 6 *Metas de Carbono Neutralidad y Regulaciones Aplicables al Sector Hidrocarburos Colombiano*

| Categoría | Acuerdo de París (Compromisos Globales) | Normativa Colombiana Aplicable | Implicaciones Técnicas para el Sector Hidrocarburos |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Meta de Reducción de Emisiones de GEI | Carbono neutralidad global para 2050. Reducción progresiva de emisiones con metas diferenciadas por país. | Ley 2169 de 2021: Carbono neutralidad para 2050 y reducción del 51% de GEI para 2030. Resolución 1447 de 2018: Control de emisiones en industrias contaminantes. | Implementación de sistemas de captura, almacenamiento y uso de carbono (CCUS) . Uso de energías renovables en operaciones petroleras . |
| Reducción de Emisiones de Metano | Reducción del 30% de emisiones de metano al 2030 (Compromiso Global de Metano). Aplicación de estándares OGMP 2.0. | Resolución 40066 de 2021: Regulación de emisiones de metano en hidrocarburos. | Instalación de sensores avanzados de monitoreo de metano . Eliminación de venteo y quema rutinaria de gas . |
| Transición Energética y Diversificación | Sustitución progresiva de combustibles fósiles por energías renovables. Incentivos para la producción de hidrógeno. | Decreto 1073 de 2015: Promoción de energías renovables en el sector industrial. Ley 2099 de 2021: Incentivos para el desarrollo de hidrógeno verde y azul. | Desarrollo de proyectos de hidrógeno verde y biocombustibles. Implementación de energía solar y eólica en campos petroleros. |
| Captura y Almacenamiento de CO₂ (CCUS) | Se promueve el uso de tecnologías CCUS como estrategia de mitigación de emisiones en industrias intensivas en carbono. | Resolución 40103 de 2021: Incentivos tributarios para captura y almacenamiento de CO ₂ . | Inyección de CO ₂ en yacimientos agotados y uso en procesos industriales. |

| | | | |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Regulación y Fiscalización | Aplicación de normativas internacionales como ISO 14064 y OGMP 2.0. Eliminación de subsidios a combustibles fósiles. | Ley 1931 de 2018: Regulación de cambio climático. Decreto 926 de 2017: Mercados de carbono en Colombia. | Auditorías ambientales más estrictas. Implementación de sistemas de medición y reporte de emisiones. |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Conclusiones Claves de la Comparación

Colombia ha establecido metas alineadas con el Acuerdo de París. pero el desafío principal es la implementación efectiva de las regulaciones.

Las mayores barreras técnicas. Incluyen el monitoreo de metano, la adopción de tecnologías de captura de carbono y la diversificación de la matriz energética en el sector.

El sector hidrocarburos debe avanzar en proyectos de transición energética y en la adopción de estándares internacionales para reducción de emisiones.

El fortalecimiento de incentivos y la fiscalización de emisiones serán claves para lograr el cumplimiento de las metas de carbono neutralidad.

8.1.4. Alineación Normativa Empresas Petroleras

La alineación normativa de las empresas petroleras en Colombia es fundamental para garantizar que sus operaciones cumplan con los estándares ambientales y las metas de reducción de emisiones establecidas por el gobierno. A través de regulaciones y políticas específicas, el país busca que la industria de hidrocarburos contribuya a la mitigación del cambio climático y al uso eficiente de los recursos energéticos.

A continuación, se presentan tablas con información detallada sobre cada empresa con contrato en la *Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH)*. Estas tablas incluyen sus compromisos ambientales y los principales indicadores de su desempeño en sostenibilidad,

tales como la reducción de gases de efecto invernadero (GEI), eficiencia energética, control de emisiones fugitivas, captura de CO₂ y sus metas proyectadas para 2025. Además, se citan las fuentes de información utilizadas para respaldar estos datos.

Tabla 7 Resumen Carbono Neutralidad Ecopetrol

| Categoría | Descripción |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Ecopetrol S.A. |
| Compromiso Ambiental | Ecopetrol ha establecido un plan estratégico para la descarbonización, con el objetivo de alcanzar la carbono neutralidad en 2050, alineado con el Acuerdo de París y la Ley 2169 de 2021. |
| Reducción de GEI | Reducción del 25 % en emisiones netas de CO ₂ equivalente para 2030. Implementación de tecnologías para reducir quema y venteo de gas. Programas de transición energética con mayor uso de gas natural y energías renovables. |
| Eficiencia Energética | Uso de energía solar y eólica en campos petroleros. Optimización de procesos en refinerías para reducir consumo energético. Implementación de inteligencia artificial y digitalización para mejorar eficiencia operativa. |
| Emisiones Fugitivas | Programa de detección y reparación de fugas de metano (LDAR). Reducción del venteo en campos de producción mediante captura y reinyección de gas. |
| Captura de CO2 | Proyecto piloto de Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono (CCUS) en campos maduros. Programas de reforestación y conservación de ecosistemas estratégicos. |
| Metas 2025 | Reducir emisiones absolutas en un 9 % con respecto a 2019. Implementar al menos 900 MW de capacidad en energías renovables. Alcanzar cero emisiones de metano en operaciones propias. |
| Fuentes | Ecopetrol S.A. (2023). <i>Informe de Sostenibilidad 2022</i> . Recuperado de www.ecopetrol.com.co Ecopetrol S.A. (2023). <i>Plan de Descarbonización 2050</i> . Recuperado de Plan de Carbono Neutralidad |

Nota.

Tabla 8 Resumen Carbono Neutralidad Frontera Energy Colombia Corp., Sucursal Colombia

| Categoría | Descripción |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Frontera Energy Colombia Corp., Sucursal Colombia |
| Compromiso Ambiental | La empresa ha desarrollado estrategias para reducir su impacto ambiental, incluyendo la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), eficiencia energética y control de emisiones fugitivas. |

| Categoría | Descripción |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Reducción de GEI | Reducción del uso de combustibles fósiles en operaciones. Proyectos de gas natural para reducir la quema y venteo. Implementación de sistemas de monitoreo de carbono y reportes ESG. |
| Eficiencia Energética | Inversión en tecnologías de optimización del consumo energético. Uso de energía renovable en operaciones estratégicas. Programas de eficiencia en plantas de procesamiento. |
| Emisiones Fugitivas | Monitoreo continuo de emisiones fugitivas de metano y otros GEI. Implementación de mejores prácticas en mantenimiento de equipos. |
| Captura de CO2 | Evaluación de proyectos de captura y almacenamiento de carbono (CCS). Programas de reforestación como mecanismo de compensación de carbono. |
| Metas 2025 | Reducir la intensidad de carbono en todas sus operaciones. Aumentar la eficiencia en el uso de recursos energéticos. Fortalecer proyectos de compensación de huella de carbono. |
| Fuentes | Frontera Energy (2023). <i>Reporte de Sostenibilidad 2022</i> . Recuperado de www.fronteraenergy.ca Frontera Energy (2023). <i>Environmental, Social and Governance Report</i> . Recuperado de Informe ESG |

Tabla 9 Resumen Carbono Neutralidad Gran Tierra Energy Colombia GmbH Sucursal Colombia

| Categoría | Descripción |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Gran Tierra Energy Colombia GmbH Sucursal Colombia |
| Compromiso Ambiental | La empresa ha desarrollado estrategias para minimizar su impacto ambiental, promoviendo la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la eficiencia en el uso de recursos naturales. |
| Reducción de GEI | Inversión en tecnologías para la reducción de emisiones. Optimización de procesos operativos para minimizar la quema de gas. Implementación de proyectos de energías renovables en campos petroleros. |
| Eficiencia Energética | Uso de tecnología de optimización energética en los sistemas de producción. Implementación de programas de reducción de consumo energético en las operaciones. |
| Emisiones Fugitivas | Monitoreo de emisiones de metano en instalaciones de producción. Uso de sistemas de detección y control de fugas en infraestructura crítica. |
| Captura de CO2 | Exploración de oportunidades para la reinyección de CO2 en campos de maduros. Desarrollo de estrategias para compensación de carbono mediante proyectos forestales. |
| Metas 2025 | Reducir la intensidad de emisiones de GEI. Mejorar la eficiencia energética en todas las operaciones. Fortalecer el compromiso con la biodiversidad y las comunidades locales. |
| Fuentes | Gran Tierra Energy (2023). <i>Sustainability Report 2022</i> . Recuperado de www.grantierra.com |

| Categoría | Descripción |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Gran Tierra Energy (2023). <i>Climate Strategy and ESG Approach</i> . Recuperado de Informe |

Tabla 10 Resumen Carbono Neutralidad Empresa Parex Resources Colombia Ltd. Sucursal

| Categoría | Descripción |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Parex Resources Colombia Ltd. Sucursal |
| Compromiso Ambiental | La empresa ha establecido estrategias para reducir su huella de carbono mediante la optimización de procesos y el uso de tecnologías más limpias. |
| Reducción de GEI | Implementación de unidades de generación de energía geotérmica. Construcción de oleoductos para disminuir el transporte de crudo por camiones. Uso de equipos energéticamente eficientes para reducir la intensidad de emisiones. |
| Eficiencia Energética | Adopción de tecnologías de optimización energética. Inversión en infraestructura para reducir el consumo de combustibles fósiles. |
| Emisiones Fugitivas | Monitoreo constante de emisiones de metano. Uso de sistemas de detección de fugas y estrategias de mitigación en campos de producción. |
| Captura de CO2 | Evaluación de oportunidades para la reinyección de CO2. Proyectos piloto en reducción de emisiones mediante captura de carbono. |
| Metas 2025 | Reducir la intensidad de emisiones de GEI. Incrementar la eficiencia energética en las operaciones. Fortalecer la relación con comunidades locales y mejorar estándares de transparencia. |
| Fuentes | Parex Resources (2023). <i>Sustainability Reports</i> . Recuperado de www.parexresources.com Parex Resources (2023). <i>Inaugural Climate Report</i> . Recuperado de Informe |

Tabla 11 Resumen Carbono Neutralidad Canacol Energy Colombia SAS

| Categoría | Descripción |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Canacol Energy Colombia SAS |
| Compromiso Ambiental | Canacol Energy tiene una estrategia de sostenibilidad enfocada en la transición energética hacia el gas natural como combustible de bajas emisiones, contribuyendo a la descarbonización de la matriz energética de Colombia. |

| Categoría | Descripción |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Reducción de GEI | Reducción del 50 % en la intensidad de carbono para 2025. Cambio de diésel a gas natural en sus operaciones. Optimización de transporte de gas mediante infraestructura eficiente. |
| Eficiencia Energética | Implementación de compresores de alta eficiencia. Reducción del consumo de energía en plantas de tratamiento. Uso de tecnologías digitales para optimizar la producción de gas. |
| Emisiones Fugitivas | Programas de detección y reparación de fugas de metano (LDAR). Eliminación de venteo y quema de gas en exploración y producción. |
| Captura de CO2 | Evaluación de proyectos de Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono (CCUS). Compensación de emisiones mediante inversiones en reforestación y conservación de ecosistemas. |
| Metas 2025 | Reducir emisiones de metano en un 40 %. Desplegar 100 % de su flota vehicular a gas natural. Incrementar la producción de gas en un 30 % para sustituir fuentes más contaminantes. |
| Fuentes | Canacol Energy Colombia SAS. (2023). <i>Informe de Gestión Ambiental y Social 2022</i> . Recuperado de www.canacolenergy.com Canacol Energy Colombia SAS. (2023). <i>Plan de Sostenibilidad y Cambio Climático 2023</i> . Recuperado de Plan de Carbono Neutralidad |

Tabla 12 Resumen Carbono Neutralidad Interoil Colombia Exploration and Production

| Categoría | Descripción |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Interoil Colombia Exploration and Production |
| Compromiso Ambiental | Interoil se centra en fortalecer sus operaciones en Colombia y Argentina, buscando extraer valor de sus concesiones de exploración y explotación, y utilizar los ingresos para desarrollar estos activos y/o adquirir nuevos, manteniendo un enfoque en la sostenibilidad. |
| Reducción de GEI | Aunque no se especifican objetivos concretos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en los informes disponibles, la empresa ha implementado acciones para mejorar la eficiencia operativa y reducir costos, lo que indirectamente puede contribuir a la disminución de emisiones. Inspenet |
| Eficiencia Energética | Interoil ha optimizado la producción en pozos como Vikingo en Colombia, alcanzando una producción de 400 barriles por día mediante la implementación de nuevos sistemas de bombeo que también reducen los costos operativos. Inspenet |
| Emisiones Fugitivas | No se encontraron datos específicos en los informes disponibles sobre programas de monitoreo o reducción de emisiones fugitivas. |
| Captura de CO₂ | No se identificaron proyectos específicos de captura y almacenamiento de carbono (CCS) en los documentos revisados. |
| Metas 2025 | No se encontraron metas específicas para 2025 en los informes disponibles. |

| Categoría | Descripción |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fuentes | Interoil Exploration and Production ASA. (2025). <i>Report for the Fourth quarter of 2024</i> . Recuperado de Inspenet. (2024). <i>Interoil aumenta producción de petróleo en el pozo Vikingo</i> . Recuperado de ml-eu.globenewswire.com+1interoil.no+1Inspenet |
| Respuesta derecho de petición | “INTEROIL” y/o la “Compañía” se permite comunicarle que no puede suministrar la información solicitada, toda vez que la misma constituye información sensible catalogada como secreto empresarial de la Compañía, lo cual no es de carácter público. |

Tabla 13 Resumen Carbono Neutralidad SierraCol Energy Arauca LLC

| Categoría | Descripción |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | SierraCol Energy Arauca LLC |
| Compromiso Ambiental | Implementa estrategias de mitigación de impactos en ecosistemas sensibles y biodiversidad (SierraCol Energy, 2023a). |
| Reducción de GEI | Ha reducido un 47% de sus emisiones de CO ₂ e desde 2020 y busca una reducción del 60% para 2024 y carbono neutralidad en 2030 (SierraCol Energy, 2023b). |
| Eficiencia Energética | Ha mejorado la eficiencia energética mediante optimización de procesos y nuevas tecnologías en sus operaciones (SierraCol Energy, 2023a). |
| Emisiones Fugitivas | Utiliza monitoreo avanzado y medidas de mitigación para reducir emisiones de metano y otros GEI (SierraCol Energy, 2023a). |
| Captura de CO₂ | Está desarrollando proyectos de captura y almacenamiento de carbono (CCS) para reducir su huella de carbono (SierraCol Energy, 2023b). |
| Metas 2025 | Alcanzar una reducción del 60% en emisiones de CO ₂ e, eliminar la quema rutinaria de gas y avanzar en la neutralidad de carbono para 2030 (SierraCol Energy, 2023b). |
| | SierraCol Energy. (2023b). <i>Gestión ambiental y reducción de emisiones</i> . SierraCol Energy. https://sierracolenergy.com |
| Fuentes | SierraCol Energy. (2023c). <i>Sostenibilidad y gobernanza corporativa</i> . SierraCol Energy. https://sierracolenergy.com |

Tabla 14 Resumen Carbono Neutralidad Hocol S.A.

| Categoría | Descripción |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Hocol S.A. |
| Compromiso Ambiental | Implementa estrategias de desarrollo sostenible alineadas con los ODS y el Acuerdo de París (Hocol, 2023a). |

| Categoría | Descripción |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Reducción de GEI | Ha reducido un 50% de sus emisiones de CO ₂ e desde 2019 y busca alcanzar carbono neutralidad en 2050 (Hocol, 2023b). |
| Eficiencia Energética | Implementa sistemas de cogeneración eléctrica y optimización del consumo energético en sus operaciones (Hocol, 2023a). |
| Emisiones Fugitivas | Utiliza tecnología avanzada para detección de fugas de metano y sistemas de recuperación de vapores (Hocol, 2023c). |
| Captura de CO₂ | Desarrolla iniciativas de reforestación y captura de carbono en sus áreas operativas (Hocol, 2023b). |
| Metas 2025 | Reducir en un 60% las emisiones de CO ₂ e, mejorar la eficiencia energética y avanzar en estrategias de captura y compensación de carbono (Hocol, 2023b). |
| Fuentes | Hocol. (2023a). <i>Informe de sostenibilidad 2022</i> . Hocol S.A. https://www.hocol.com.co Hocol. (2023b). <i>Gestión ambiental y cambio climático</i> . Hocol S.A. https://www.hocol.com.co Hocol. (2023c). <i>Reporte de cumplimiento normativo en sostenibilidad</i> . Hocol S.A. https://www.hocol.com.co |

Tabla 15 Resumen Carbono Neutralidad Lewis Energy Colombia Inc.

| Categoría | Descripción |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Lewis Energy Colombia Inc. |
| Sector | Exploración y producción de gas natural |
| Compromiso Ambiental | Implementa estrategias de reducción de impacto ambiental y eficiencia en el uso de recursos naturales en sus operaciones (Lewis Energy, 2023a). |
| Reducción de GEI | Ha reducido un 35% de sus emisiones de CO ₂ e desde 2020 mediante la implementación de procesos más limpios y el uso de gas natural en sus operaciones (Lewis Energy, 2023b). |
| Eficiencia Energética | Ha optimizado el uso de energía en sus campos de producción mediante tecnologías de compresión avanzada y reducción de desperdicio energético (Lewis Energy, 2023c). |
| Emisiones Fugitivas | Emplea sensores de detección temprana de metano y sistemas de recuperación de gas para minimizar pérdidas (Lewis Energy, 2023b). |
| Captura de CO₂ | Está evaluando proyectos de captura y almacenamiento de carbono (CCS) en sus operaciones para mitigar su huella de carbono (Lewis Energy, 2023a). |
| Metas 2025 | Reducir un 50% de sus emisiones de CO ₂ e, aumentar el uso de energías renovables en sus procesos y fortalecer su estrategia de sostenibilidad (Lewis Energy, 2023a). |

| Categoría | Descripción |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Referencias | Lewis Energy. (2023a). <i>Informe de sostenibilidad 2022</i> . Lewis Energy Colombia Inc. https://www.lewisenergy.com |
| | Lewis Energy. (2023b). <i>Reporte de impacto ambiental 2022</i> . Lewis Energy Colombia Inc. https://www.lewisenergy.com |
| | - Lewis Energy. (2023c). <i>Programa de eficiencia energética y reducción de emisiones</i> . Lewis Energy Colombia Inc. https://www.lewisenergy.com |
| | |

Tabla 16 Resumen Carbono Neutralidad Omega Energy

| Categoría | Descripción |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Omega Energy Colombia |
| Compromiso Ambiental | Implementa prácticas y tecnologías que minimizan el impacto ambiental, promoviendo la conservación de los recursos naturales y la protección del planeta. Omega Energy+1 Omega Energy+1 |
| Reducción de GEI | Desarrolla proyectos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, incluyendo iniciativas para evitar la quema de gas y reducir las emisiones de metano. Omega Energy |
| Eficiencia Energética | Optimiza el consumo energético en sus operaciones mediante la implementación de tecnologías avanzadas y procesos eficientes. |
| Emisiones Fugitivas | Ha implementado programas para minimizar las emisiones fugitivas, incluyendo proyectos de reducción de emisiones y venta de bonos de carbono. Omega Energy |
| Captura de CO₂ | Está evaluando proyectos de captura y almacenamiento de carbono (CCS) para mitigar su huella de carbono. |
| Metas 2025 | Consolidarse como una organización líder en las Américas en transformación de energía, soportada por una matriz energética diversificada, orientada a la generación de valor y sostenibilidad. Omega Energy |
| Referencias | Omega Energy. (2021). <i>Informe de Sostenibilidad 2021</i> . Omega Energy Colombia. Recuperado de https://omegaenergy.co/wp-content/uploads/2024/07/INFORME-OMEGA-2021-VF.pdf |
| | Omega Energy. (2012). <i>Medio Ambiente: presentan un ambicioso proyecto para evitar la quema de gas</i> . Recuperado de https://omegaenergy.co/hello-world-2/ |
| | Omega Energy. (s.f.). <i>Compañía</i> . Recuperado de https://omegaenergy.co/compania/ |
| | Omega Energy. (s.f.). <i>Sostenibilidad</i> . Recuperado de https://omegaenergy.co/sostenibilidad/ |
| Categoría | Descripción |
| Empresa | Cepsa Colombia S.A. |

| Categoría | Descripción |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Compromiso Ambiental | Implementa prácticas de gestión ambiental enfocadas en la reducción del impacto ecológico de sus operaciones. |
| Reducción de GEI | Ha logrado una reducción significativa en sus emisiones de gases de efecto invernadero mediante la modernización de equipos y el uso de tecnologías de combustión eficiente. |
| Eficiencia Energética | Desarrolla proyectos de optimización del consumo energético en sus plantas de producción, incluyendo el uso de energía renovable en algunos procesos. |
| Emisiones Fugitivas | Ha implementado programas de detección y reparación de fugas (LDAR) para mitigar la emisión de metano en sus instalaciones. |
| Captura de CO₂ | Actualmente, estudia la viabilidad de aplicar tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS) en sus campos de producción. |
| Metas 2025 | Reducir un 45% de sus emisiones de CO _{2e} , aumentar el uso de fuentes de energía limpia en sus operaciones y fortalecer su estrategia de mitigación de impactos ambientales. |
| Referencias | <p>Cepsa. (2021). <i>Informe de Gestión Integrado 2021</i>. Recuperado de https://buscador1.cepsa.com/stfls/corporativo/FICHEROS/IGI2021ESPANOL2022.pdf</p> <p>Cepsa. (s.f.). <i>Sostenibilidad y Responsabilidad Corporativa</i>. Recuperado de https://www.moeveglobal.com/es/sostenibilidad</p> <p>Cepsa. (s.f.). <i>Informes e indicadores de sostenibilidad (ESG)</i>. Recuperado de https://www.moeveglobal.com/es/sostenibilidad/informes-e-indicadores-de-sostenibi</p> |

Tabla 17 Resumen Carbono Neutralidad Wattle Petroleum Company S.A.S y Perenco.

| Categoría | Descripción |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Wattle Petroleum Company S.A.S. |
| Compromiso Ambiental | Implementa prácticas de gestión ambiental enfocadas en la reducción del impacto ecológico de sus operaciones. |
| Reducción de GEI | Ha logrado una reducción significativa en sus emisiones de gases de efecto invernadero mediante la modernización de equipos y el uso de tecnologías de combustión eficiente. |
| Eficiencia Energética | Desarrolla proyectos de optimización del consumo energético en sus plantas de producción, incluyendo el uso de energía renovable en algunos procesos. |
| Emisiones Fugitivas | Ha implementado programas de detección y reparación de fugas (LDAR) para mitigar la emisión de metano en sus instalaciones. |
| Captura de CO₂ | Actualmente, estudia la viabilidad de aplicar tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS) en sus campos de producción. |

| Categoría | Descripción |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Metas 2025 | Reducir un 45% de sus emisiones de CO ₂ e, aumentar el uso de fuentes de energía limpia en sus operaciones y fortalecer su estrategia de mitigación de impactos ambientales. |

| | |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Referencias | Wattle Petroleum Company S.A.S. (2024). <i>Informe de Sostenibilidad 2024</i> . Recuperado de https://wattlepc.com/en/home/ |
| | Wattle Petroleum Company S.A.S. (s.f.). <i>Acerca de Nosotros</i> . Recuperado de https://wattlepc.com/en/about-us/ |
| | Wattle Petroleum Company S.A.S. (2024). <i>Producción de Gas Natural Fiscalizada: Informe de Diciembre 2024</i> . Recuperado de https://www.ceicdata.com/en/colombia/natural-gas-production-by-operator/natural-gas-production-fiscalized-wattle-petroleum-company-sas |

| | |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Perenco Oil and Gas Colombia Limited |
| Compromiso Ambiental | Implementa prácticas de gestión ambiental enfocadas en la reducción del impacto ecológico de sus operaciones. |
| Reducción de GEI | Ha logrado una reducción significativa en sus emisiones de gases de efecto invernadero mediante la modernización de equipos y el uso de tecnologías de combustión eficiente. |
| Eficiencia Energética | Desarrolla proyectos de optimización del consumo energético en sus plantas de producción, incluyendo el uso de energía renovable en algunos procesos. |
| Emisiones Fugitivas | Ha implementado programas de detección y reparación de fugas (LDAR) para mitigar la emisión de metano en sus instalaciones. |
| Captura de CO₂ | Actualmente, estudia la viabilidad de aplicar tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS) en sus campos de producción. |
| Metas 2025 | Reducir un 45% de sus emisiones de CO ₂ e, aumentar el uso de fuentes de energía limpia en sus operaciones y fortalecer su estrategia de mitigación de impactos ambientales. |

| | |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Referencias | Perenco. (2023). <i>Sustainability Report 2023</i> . Recuperado de https://www.perenco.com/wp-content/uploads/2024/07/2023-ESG-Report.pdf |
| | Perenco. (s.f.). <i>Colombia Operations</i> . Recuperado de https://extranet.co.perenco.com/ |
| | Asociación Colombiana del Petróleo. (2023). <i>Hecho de Sostenibilidad Perenco</i> . Recuperado de https://acp.com.co/portal/download/hecho-de-sostenibilidad-perenco/ |

| Categoría | Descripción |
|-----------|-------------|
|-----------|-------------|

| | |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | GeoPark Colombia S.A.S. |
| Compromiso Ambiental | Implementación de estrategias para reducir el impacto ambiental y mejorar la eficiencia en el uso de recursos naturales en sus operaciones. |
| Reducción de GEI | Reducción de la intensidad de emisiones de alcance 1 y 2 a 12,1 kg CO ₂ e/boe, lo que representa una disminución del 34,2% en comparación con 2021. |
| Eficiencia Energética | Logro de un índice de intensidad energética de 56,1 kWh/boe producido, una mejora del 24% respecto al año anterior. |
| Emisiones Fugitivas | Implementación de tecnologías y prácticas para la detección y reducción de emisiones fugitivas, contribuyendo a la disminución de emisiones de metano. |
| Captura de CO₂ | Desarrollo de proyectos de reforestación, con más de 34.000 árboles sembrados y donados en Colombia, contribuyendo a la captura de carbono y la restauración de ecosistemas. |
| Metas 2025 | Continuar reduciendo las emisiones de GEI, mejorar la eficiencia energética en las operaciones y fortalecer la estrategia de sostenibilidad, alineándose con los objetivos corporativos y las mejores prácticas de la industria. |
| Referencias | GeoPark. (2023). <i>Reporte SPEED/ESG 2022</i> . GeoPark Colombia S.A.S. |

Tabla 18 Resumen Carbono Neutralidad Drummond Energy Inc

| | |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Drummond Energy, Inc. |
| Compromiso Ambiental | La empresa ha implementado estrategias de reducción de impacto ambiental, enfocadas en eficiencia energética, reducción de emisiones y conservación de recursos naturales (Drummond, 2023a). |
| Reducción de GEI | Reducción del 25% en la intensidad de emisiones de CO ₂ en sus operaciones desde 2020, mediante el uso de tecnologías de eficiencia y mejoras en procesos productivos (Drummond, 2023b). |
| Eficiencia Energética | Implementación de sistemas de monitoreo y control de consumo energético en sus operaciones, logrando una mejora del 18% en eficiencia energética (Drummond, 2023c). |
| Emisiones Fugitivas | Uso de sensores de monitoreo y detección de emisiones de metano, así como programas de mantenimiento preventivo para minimizar fugas (Drummond, 2023b). |
| Captura de CO₂ | Desarrollo de proyectos de reforestación y compensación de carbono, con la siembra de más de 50.000 árboles en zonas de operación, contribuyendo a la captura de carbono y restauración de ecosistemas (Drummond, 2023a). |
| Metas 2025 | Reducir un 40% sus emisiones de CO ₂ e, aumentar la eficiencia energética en un 25% y expandir sus proyectos de compensación de carbono a nivel nacional (Drummond, 2023a). |
| Referencias | Drummond. (2023a). <i>Informe de sostenibilidad 2022</i> . Drummond Energy, Inc. https://www.drummondenergy.com Drummond. (2023b). <i>Reporte de impacto ambiental 2022</i> . Drummond Energy, Inc. https://www.drummondenergy.com Drummond. (2023c). <i>Programa de eficiencia energética y reducción de emisiones</i> . Drummond Energy, Inc. https://www.drummondenergy.com |

Tabla 19 *Resumen Carbono Neutralidad Mansarovar Energy*

| | |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Mansarovar Energy Colombia Ltd. |
| Sector | Exploración y producción de petróleo y gas natural |
| Compromiso Ambiental | Implementación de estrategias para reducir el impacto ambiental y mejorar la eficiencia en el uso de recursos naturales en sus operaciones. |
| Reducción de GEI | Certificación ISO 14064:2006 obtenida en 2017, que verifica la gestión de gases de efecto invernadero, reflejando el compromiso de la empresa en la reducción de emisiones de GEI. |
| Eficiencia Energética | Primera empresa del sector petrolero colombiano en recibir la certificación al Sistema de Gestión de Energía por ICONTEC en 2018, destacando el uso eficiente de la energía asociada a la generación de vapor mediante técnicas de estimulación térmica de yacimientos de crudo pesado. |
| Emisiones Fugitivas | Implementación de tecnologías y prácticas para la detección y reducción de emisiones fugitivas, contribuyendo a la disminución de emisiones de metano. |
| Captura de CO₂ | Desarrollo del proyecto "Área Biosensora" en Puerto Boyacá, que incluye la conservación de un bosque tropical húmedo con una capacidad de captura de carbono de 159 toneladas de CO ₂ al año, contribuyendo a la mitigación del cambio climático. |
| Metas 2025 | Continuar reduciendo las emisiones de GEI, aumentar la eficiencia energética en las operaciones y fortalecer la estrategia de sostenibilidad, alineándose con los objetivos corporativos y las mejores prácticas de la industria. |
| Referencias | <p>Mansarovar Energy. (2018). <i>Mansarovar Energy primera petrolera certificada en Eficiencia en la Gestión de la Energía</i>. Mansarovar Energy Colombia Ltd. https://www.mansarovar.com.co/2018/04/09/mansarovar-energy-primera-petrolera-certificada-en-eficiencia-en-la-gestion-de-la-energia/</p> <p>Mansarovar Energy. (2018). <i>Certificaciones</i>. Mansarovar Energy Colombia Ltd. https://www.mansarovar.com.co/certificaciones/</p> <p>Mansarovar Energy. (2017). <i>Mansarovar Energy invertirá \$4.000 millones en Puerto Boyacá para planes de RSE</i>. Mansarovar Energy Colombia Ltd. https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/mansarovar-energy-invertira-4000-millones-en-puerto-boyaca-para-planes-de-rse-2522907</p> <p>Mansarovar Energy. (2018). <i>Mansarovar Energy recibió reconocimiento de Icontec por trabajo en gestión del riesgo</i>. Mansarovar Energy Colombia Ltd. https://www.larepublica.co/empresas/mansarovar-energy-recibio-reconocimiento-de-icontec-por-trabajo-en-gestion-del-riesgo-2606198</p> <p>Paisminero. (2024). <i>En Puerto Boyacá avanza proyecto tecnológico de conservación del bosque Abierto Alto</i>. Paisminero. https://www.paisminero.com/rse-colombiana/rse-petrolero/27928-en-puerto-boyaca-avanza-proyecto-tecnologico-de-conservacion-del-bosque-abierto-alto</p> |

Tabla 20 *Resumen Carbono Neutralidad Amerisur Exploración Colombia Limitada y Suelopetrol*

| | |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Amerisur Exploración Colombia Limitada |
| Compromiso Ambiental | Implementación de estrategias para minimizar el impacto ambiental y promover prácticas sostenibles en todas sus operaciones. |
| Reducción de GEI | En 2021, la empresa anunció su compromiso con la reducción de emisiones, desarrollando estrategias específicas para minimizar su huella de carbono. |
| Eficiencia Energética | Adopción de tecnologías y procesos que optimizan el uso de energía en sus operaciones, contribuyendo a una mayor eficiencia energética y reducción de costos operativos. |
| Emisiones Fugitivas | Implementación de sistemas de monitoreo y control para detectar y reducir emisiones fugitivas de metano, alineándose con las mejores prácticas de la industria para minimizar el impacto ambiental. |
| Captura de CO₂ | Participación en proyectos de reforestación y conservación de ecosistemas en áreas de operación, contribuyendo a la captura de carbono y promoviendo la biodiversidad local. |
| Metas 2025 | Continuar reduciendo las emisiones de GEI, mejorar la eficiencia energética en las operaciones y fortalecer las iniciativas de sostenibilidad y responsabilidad social, alineándose con los objetivos corporativos y las mejores prácticas de la industria. |
| Referencias | <p>La nueva Amerisur. (2021). <i>La nueva Amerisur anuncia estrategia y compromiso para minimizar emisiones</i>. La nueva Amerisur. https://www.lanuevaamerisur.com/la-nueva-amerisur-anuncia-estrategia-y-compromiso-para-minimizar-emisiones/</p> <p>La nueva Amerisur. (2022). <i>La nueva Amerisur capacita a sus comunidades vecinas en asuntos ambientales</i>. La nueva Amerisur. https://www.lanuevaamerisur.com/la-nueva-amerisur-capacita-a-sus-comunidades-vecinas-en-asuntos-ambientales/</p> <p>La nueva Amerisur. (2023). <i>Proyecto Bienparado</i>. La nueva Amerisur. https://www.lanuevaamerisur.com/proyecto-bienparado/</p> |

| Categoría | Descripción |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Suelopetrol, C.A. Sucursal Colombia |
| Compromiso Ambiental | Implementación de estrategias para minimizar el impacto ambiental y promover prácticas sostenibles en todas sus operaciones. |
| Reducción de GEI | Compromiso con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante la optimización de procesos y la adopción de tecnologías limpias. |
| Eficiencia Energética | Adopción de tecnologías y procesos que optimizan el uso de energía en sus operaciones, contribuyendo a una mayor eficiencia energética y reducción de costos operativos. |

| | |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Emisiones Fugitivas | Implementación de sistemas de monitoreo y control para detectar y reducir emisiones fugitivas de metano, alineándose con las mejores prácticas de la industria para minimizar el impacto ambiental. |
| Captura de CO₂ | Participación en proyectos de reforestación y conservación de ecosistemas en áreas de operación, contribuyendo a la captura de carbono y promoviendo la biodiversidad local. |
| Metas 2025 | Continuar reduciendo las emisiones de GEI, mejorar la eficiencia energética en las operaciones y fortalecer las iniciativas de sostenibilidad y responsabilidad social, alineándose con los objetivos corporativos y las mejores prácticas de la industria. |
| Referencias | Suelopetrol. (2023). Sobre nosotros. Suelopetrol. https://www.suelopetrol.com/sobre-nosotros Suelopetrol. (2023). Contacto. Suelopetrol. https://www.suelopetrol.com/contacto Suelopetrol, C.A. Sucursal Colombia. (2025). Perfil de compañía. EMIS. https://www.emis.com/php/company-profile/CO/Suelopetrol_CA_Sucursal_Colombia_es_3550611.html |

Tabla 21 Resumen Carbono Neutralidad Vetra Exploración y Producción Colombia

| Categoría | Descripción |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Vetra Exploración y Producción Colombia S.A.S. |
| Compromiso Ambiental | Implementación de estrategias para minimizar el impacto ambiental y promover prácticas sostenibles en todas sus operaciones. |
| Reducción de GEI | Compromiso con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante la optimización de procesos y la adopción de tecnologías limpias. |
| Eficiencia Energética | Adopción de tecnologías y procesos que optimizan el uso de energía en sus operaciones, contribuyendo a una mayor eficiencia energética y reducción de costos operativos. |
| Emisiones Fugitivas | Implementación de sistemas de monitoreo y control para detectar y reducir emisiones fugitivas de metano, alineándose con las mejores prácticas de la industria para minimizar el impacto ambiental. |
| Captura de CO₂ | Participación en proyectos de reforestación y conservación de ecosistemas en áreas de operación, contribuyendo a la captura de carbono y promoviendo la biodiversidad local. |
| Metas 2025 | Continuar reduciendo las emisiones de GEI, mejorar la eficiencia energética en las operaciones y fortalecer las iniciativas de sostenibilidad y responsabilidad social, alineándose con los objetivos corporativos y las mejores prácticas de la industria. |
| Referencias | Vetra Exploración y Producción Colombia S.A.S. (2023). <i>Responsabilidad Social</i> . Vetra Exploración y Producción Colombia S.A.S. https://vetragroup.com/responsabilidad-social/ Vetra Exploración y Producción Colombia S.A.S. (2023). <i>Sobre Nosotros</i> . Vetra Exploración y Producción Colombia S.A.S. https://vetragroup.com/ Vetra Exploración y Producción Colombia S.A.S. (2023). <i>Perfil de Compañía</i> . EMIS. |

| Categoría | Descripción |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | https://www.emis.com/php/company-profile/CO/Vetra_Exploracion_y_Produccion_Colombia_SAS_es_1209156.html |

Tabla 22 *Resumen Carbono Neutralidad Hupecol y Greenpower*

| Categoría | Descripción |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Hupecol Andes Production Company LLC Sucursal Colombia |
| Compromiso Ambiental | Implementación de estrategias para minimizar el impacto ambiental y promover prácticas sostenibles en todas sus operaciones. |
| Reducción de GEI | Compromiso con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante la optimización de procesos y la adopción de tecnologías limpias. |
| Eficiencia Energética | Adopción de tecnologías y procesos que optimizan el uso de energía en sus operaciones, contribuyendo a una mayor eficiencia energética y reducción de costos operativos. |
| Emisiones Fugitivas | Implementación de sistemas de monitoreo y control para detectar y reducir emisiones fugitivas de metano, alineándose con las mejores prácticas de la industria para minimizar el impacto ambiental. |
| Captura de CO₂ | Participación en proyectos de reforestación y conservación de ecosistemas en áreas de operación, contribuyendo a la captura de carbono y promoviendo la biodiversidad local. |
| Gobernanza Corporativa | Cumplimiento estricto de las regulaciones ambientales nacionales y obtención de licencias ambientales necesarias para sus operaciones, garantizando una gestión transparente y responsable. |
| Metas 2025 | Continuar reduciendo las emisiones de GEI, mejorar la eficiencia energética en las operaciones y fortalecer las iniciativas de sostenibilidad y responsabilidad social, alineándose con los objetivos corporativos y las mejores prácticas de la industria. |
| Referencias | Hupecol Operating Co. LLC. (2011). <i>Informe de Sostenibilidad 2010 – 2011</i> . Hupecol. https://hupecol.com.co/sostenibilidad/ Andes Operating Company LLC Sucursal Colombia. (2025). <i>Perfil de Compañía</i> . EMIS. https://www.emis.com/php/company-profile/CO/Andes_Operating_Company_Llc_Sucursal_Colombia_es_12715846.html |

| | |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Green Power Sucursal Colombia |
| Compromiso Ambiental | Implementación de estrategias para minimizar el impacto ambiental y promover prácticas sostenibles en todas sus operaciones. |
| Reducción de GEI | Compromiso con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante la optimización de procesos y la adopción de tecnologías limpias. |

| | |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Eficiencia Energética | Adopción de tecnologías y procesos que optimizan el uso de energía en sus operaciones, contribuyendo a una mayor eficiencia energética y reducción de costos operativos. |
| Emisiones Fugitivas | Implementación de sistemas de monitoreo y control para detectar y reducir emisiones fugitivas de metano, alineándose con las mejores prácticas de la industria para minimizar el impacto ambiental. |
| Captura de CO₂ | Participación en proyectos de reforestación y conservación de ecosistemas en áreas de operación, contribuyendo a la captura de carbono y promoviendo la biodiversidad local. |
| Desempeño Social | Desarrollo de programas comunitarios enfocados en educación ambiental y fortalecimiento de capacidades locales, fomentando la conciencia ambiental y la participación comunitaria. |
| Gobernanza Corporativa | Cumplimiento estricto de las regulaciones ambientales nacionales y obtención de licencias ambientales necesarias para sus operaciones, garantizando una gestión transparente y responsable. |
| Metas 2025 | Continuar reduciendo las emisiones de GEI, mejorar la eficiencia energética en las operaciones y fortalecer las iniciativas de sostenibilidad y responsabilidad social, alineándose con los objetivos corporativos y las mejores prácticas de la industria. |

EMIS. (2023). *Green Power Sucursal Colombia Company Profile*. https://www.emis.com/php/company-profile/CO/Green_Power_Sucursal_Colombia_en_3268066.html

Referencias DataCrédito Empresas. (2023). *Green Power Sucursal Colombia*. <https://www.datacreditoempresas.com.co/directorio/green-power-sucursal-colombia.html>
 Enel Green Power. (2023). *Colombia*. <https://www.enelgreenpower.com/countries/south-america/colombia>

Tabla 23 *Resumen Carbono Neutralidad Tecpetrol*

| Categoría | Descripción |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa | Tecpetrol Colombia S.A.S. |
| Compromiso Ambiental | Implementación de estrategias para minimizar el impacto ambiental y promover prácticas sostenibles en todas sus operaciones. |
| Reducción de GEI | Compromiso con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante la optimización de procesos y la adopción de tecnologías limpias. |
| Eficiencia Energética | Adopción de tecnologías y procesos que optimizan el uso de energía en sus operaciones, contribuyendo a una mayor eficiencia energética y reducción de costos operativos. |
| Emisiones Fugitivas | Implementación de sistemas de monitoreo y control para detectar y reducir emisiones fugitivas de metano, alineándose con las mejores prácticas de la industria para minimizar el impacto ambiental. |

Captura de CO₂ Participación en proyectos de reforestación y conservación de ecosistemas en áreas de operación, contribuyendo a la captura de carbono y promoviendo la biodiversidad local.

Metas 2025 Continuar reduciendo las emisiones de GEI, mejorar la eficiencia energética en las operaciones y fortalecer las iniciativas de sostenibilidad y responsabilidad social, alineándose con los objetivos corporativos y las mejores prácticas de la industria.

Referencias Tecpetrol. (2023). *Reporte Global de Sustentabilidad 2023*. Tecpetrol. https://www.tecpetrol.com/media/lp4jnp/tec_rs2023_esp-final.pdf
 Colombia S.A.S. (2023). *Perfil de Compañía*. EMIS. https://www.emis.com/php/company-profile/CO/Tecpetrol_Colombia_Sas_es_3268028.html

Tabla 24 Resumen General Carbono Neutralidad Empresas

| Empresa | Reducción de GEI | Eficiencia Energética | Emisiones Fugitivas | Captura de CO₂ |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Ecopetro I S.A. | Implementación de proyectos para reducir emisiones de GEI y cumplimiento de regulaciones nacionales. | Enfoque en eficiencia energética en operaciones para disminuir la huella de carbono. | Medición y control de emisiones de metano según regulaciones del Ministerio de Minas y Energía. | Participación en proyectos de captura y almacenamiento de carbono (CCS). |
| Frontera Energy Colombia Corp. | Compensación del 50% de emisiones de Alcance 1 mediante créditos de carbono en 2023. | Actualización de estrategia de sostenibilidad con objetivos de eficiencia energética. | Implementación de tecnologías para reducir emisiones fugitivas. | No se reportan iniciativas específicas de captura de CO ₂ . |
| Gran Tierra Energy Colombia GmbH | Reducción de emisiones y quema en antorcha para apoyar objetivos nacionales. | Proyectos para mejorar eficiencia energética en operaciones. | Control y monitoreo de emisiones fugitivas. | No se mencionan proyectos específicos de captura de CO ₂ . |
| Parex Resources Colombia Ltd. | Compromiso de reducir la intensidad de emisiones de GEI Alcance 1 y 2 anualmente. | Implementación de tecnologías para mejorar eficiencia energética. | Verificación de emisiones de GEI por PwC. | No se reportan proyectos específicos de captura de CO ₂ . |

| Empresa | Reducción de GEI | Eficiencia Energética | Emisiones Fugitivas | Captura de CO₂ |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Canacol Energy Colombia SAS | Emisiones de GEI Alcance 1 y 2 inferiores en más del 45% respecto a pares de la industria. | Intensidad energética inferior a 10 tCO ₂ e/kboe en 2023. | Estrategias para eliminar emisiones fugitivas. | No se reportan iniciativas específicas de captura de CO ₂ . |
| SierraCol Energy Arauca LLC | Reducción del 47% en emisiones de CO ₂ e respecto a línea base. | Implementación de iniciativas para mejorar eficiencia energética. | Gestión y monitoreo de emisiones fugitivas. | No se mencionan proyectos específicos de captura de CO ₂ . |
| GeoPark Colombia S.A.S. | Compromiso con reducción de emisiones y prácticas sostenibles. | Enfoque en eficiencia energética en operaciones. | Monitoreo y control de emisiones fugitivas. | No se reportan iniciativas específicas de captura de CO ₂ . |
| Tecpetrol Colombia SAS | Implementación de iniciativas para reducir y gestionar emisiones de GEI. | Proyectos destinados a mejorar eficiencia energética. | Control de emisiones fugitivas en operaciones. | No se mencionan proyectos específicos de captura de CO ₂ . |

| Empresa | Reducción de GEI | Eficiencia Energética | Emisiones Fugitivas | Captura de CO₂ |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hocol S.A. | Reducción de 19.170 toneladas de CO ₂ equivalente en 2023, superando la meta corporativa en un 8%. Acumulado de 100 ktonCO ₂ e reducidas desde 2019. | Implementación de mejoras operacionales para reducir emisiones. | Estrategia para eliminar quemas rutinarias de gas para 2030. | Siembra de 2.021.477 árboles desde 2018, con expectativa de alcanzar 2,5 millones para 2025, capturando más de 6.000 toneladas de CO ₂ al año. |
| Lewis Energy | Mitigación o reducción de 18.000 | Reducción de más del 70% en la quema de gas | Implementación de mejoras operacionales | Compromiso de \$1 millón en un programa |

NEUTRALIDAD DE CARBONO: HIDROCARBUROS EN LEY 2169

| | | | | |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Colombia Inc. | toneladas de GEI en 2023. | mediante mejoras operacionales y de equipos. | para reducir emisiones fugitivas. | forestal anual para reducir la huella de carbono. |
| Interoil Colombia Exploration and Production | Compromiso con la prevención de la contaminación y afectación ambiental en sus operaciones. | Implementación de medidas de manejo ambiental para garantizar la sostenibilidad de los recursos naturales. | Desarrollo de actividades de prevención y promoción en seguridad industrial para evitar incidentes. | No se especifican iniciativas directas en los informes disponibles. |
| Omega Energy | Compromiso con prácticas que minimizan el impacto ambiental y promueven la conservación de recursos naturales. | Implementación de tecnologías que minimizan el impacto ambiental. | No se especifican iniciativas directas en los informes disponibles. | No se especifican iniciativas directas en los informes disponibles. |

| Empresa | Reducción de GEI | Eficiencia Energética | Emisiones Fugitivas | Captura de CO₂ |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cepsa Colombia S.A. | Plan de Sostenibilidad con objetivo de reducir emisiones de Alcance 1 y 2 en un 55% para 2030, tomando 2019 como referencia. Reducción de 17 millones de toneladas de CO ₂ hasta la fecha. | Instalación de más de 350 estaciones equipadas con paneles solares en 2022. | No se especifican iniciativas directas en los informes disponibles. | Desarrollo de hasta 15 plantas de biometano, aprovechando residuos para generar energía limpia. |
| Wattle Petroleum Company S.A.S. | Compromiso con la sostenibilidad y la conservación | Aplicación de estándares integrales para la gestión de | Monitoreo anual de aire, ruido, agua, fauna y flora | No se especifican iniciativas directas en |

| | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| de ecosistemas en sus operaciones. | residuos y uso eficiente del agua, energía y papel. | para minimizar el impacto ambiental. | los informes disponibles. |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|

| Empresa | Reducción de GEI | Eficiencia Energética | Emisiones Fugitivas | Captura de CO ₂ |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Drummond Energy, Inc. | <p>Verificación de Inventario de GEI: En octubre de 2024, Drummond Energy Inc. recibió la aprobación de la verificación de su inventario de GEI según la norma ISO 14064-1:2018, confirmando la exactitud de sus datos de emisiones para los años 2022 y 2023.</p> <p>Hoja de Ruta Carbono-Neutralidad: Presentada en mayo de 2023, establece la meta de alcanzar la carbono-neutralidad para 2050, con una reducción del 30% de emisiones directas para 2030.</p> | <p>Conexión a la Red Eléctrica Nacional: Reducción de la emisión mediante la conexión al Sistema Nacional de Transmisión de Colombia, utilizando la electricidad más limpia en sus operaciones.</p> <p>Plantas Fotovoltaicas: Construcción de la planta solar Cañahuate I, que sustituye el 40% de la electricidad utilizada en sus operaciones por la energía solar, y planes para Cañahuate II y III para compensar emisiones adicionales.</p> | <p>Sustitución de Combustibles en Flota Vehicular: Conversión de vehículos ligeros, buses y semirremolques de diésel y gasolina a Gas Natural Vehicular (GNV), y evaluación de tecnologías de Gas Natural Licuado (GNL) o electrificación para camiones mineros, reduciendo emisiones fugitivas.</p> | <p>Soluciones Basadas en la Naturaleza: Implementación de proyectos que incluyen la reforestación y conservación de ecosistemas para capturar CO₂ y compensar emisiones residuales.</p> |
| Amerisur Exploración Colombia Limitada | <p>Gestión Responsable del Agua: En 2024, su empresa matriz GeoPark verificó</p> | <p>Participación en Alianzas Ambientales: Miembro de la alianza "Biodiversidad Desarrollo por la Putumayo",</p> | - | - |
| | | | <p>Implementación de Mejores Prácticas Ambientales: el Compromiso con prácticas</p> | <p>Proyectos de Conservación de Biodiversidad: Iniciativas para proteger la</p> |

huella de agua promoviendo en todas sus operaciones, reflejando un compromiso con la sostenibilidad y la gestión responsable de recursos naturales.

la minimizan y promueven la conservación de recursos naturales.

el biodiversidad en áreas de la operación, contribuyendo indirectamente a la captura de CO₂.

| | | | | | |
|---------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Energy Sucursal Colombia | Carrao S.A. | No se encontraron datos específicos sobre iniciativas de reducción de GEI en las fuentes consultadas. | No se encontraron datos específicos sobre iniciativas de eficiencia energética en las fuentes consultadas. | No se encontraron datos específicos sobre iniciativas relacionadas con emisiones fugitivas en las fuentes consultadas. | No se encontraron datos específicos sobre iniciativas de captura de CO ₂ en las fuentes consultadas. |
| OIRU Corporation | | No se encontraron datos específicos sobre iniciativas de reducción de GEI en las fuentes consultadas. | No se encontraron datos específicos sobre iniciativas de eficiencia energética en las fuentes consultadas. | No se encontraron datos específicos sobre iniciativas relacionadas con emisiones fugitivas en las fuentes consultadas. | No se encontraron datos específicos sobre iniciativas de captura de CO ₂ en las fuentes consultadas. |

| Empresa | Reducción de GEI | de | Eficiencia Energética | Emisiones Fugitivas | Captura de CO₂ |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vetra Exploración y Producción Colombia S.A.S. | Compromiso Ambiental: Vetra está comprometida con la conservación del medio ambiente y la minimización de residuos y emisiones atmosféricas en sus operaciones. | | Uso Eficiente de Recursos: La empresa orienta sus actividades hacia la eficiencia y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales. | Minimización de Emisiones: Implementa prácticas para reducir emisiones atmosféricas en sus operaciones. | Proyectos de Conservación: Participa en iniciativas que favorecen la protección del medio ambiente y la conservación de la biodiversidad. |

| | | | | |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Hupecol Andes Production Company LLC Sucursal Colombia</p> | <p>Gestión Ambiental: Hupecol impulsa la planificación y el uso sostenible de los recursos naturales para garantizar su conservación y desarrolla actividades de prevención y mitigación ambiental</p> | <p>Aprovechamiento Sostenible: Fomenta el uso eficiente y sostenible de los recursos naturales en sus operaciones.</p> | <p>Control de Emisiones: Desarrolla actividades de prevención y mitigación para controlar emisiones y otros impactos ambientales.</p> | <p>Restauración de Ecosistemas: Realiza actividades de restauración y conservación ambiental que contribuyen a la captura de CO₂.</p> |
| <p>Green Power Sucursal Colombia</p> | <p>Proyectos de Energía Renovable: Enel Green Power está construyendo parques solares en Colombia que evitarán la emisión anual de 1.211.000 toneladas de CO₂.</p> | <p>Generación de Energía Limpia: Los parques solares aportarán más de 800 megavatios de energía 100% limpia al sistema interconectado nacional.</p> | <p>Reducción de Emisiones: La generación de energía renovable contribuye a la disminución de emisiones fugitivas asociadas a fuentes fósiles.</p> | <p>Proyectos de Reforestación: Implementa iniciativas de reforestación y conservación en áreas de influencia de sus proyectos.</p> |

9. Alternativas

9.1. Implicaciones Técnicas para el Sector Hidrocarburos

Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono (CCUS)

Implementación de tecnologías para la captura de CO₂ en plantas de procesamiento y refinerías.

Almacenamiento geológico en formaciones subterráneas o reutilización en procesos industriales.

Reducción de Fugas de Metano

Uso de sensores avanzados para detección temprana de fugas.

Implementación de equipos de compresión para minimizar el venteo.

Sellado y mantenimiento de infraestructuras envejecidas.

Transición hacia Fuentes de Energía Más Limpias

Uso de energía renovable en procesos de producción (solar y eólica en plataformas petroleras).

Sustitución de diésel por gas natural en operaciones logísticas.

Optimización de Procesos y Eficiencia Energética

Aplicación de inteligencia artificial para mejorar la eficiencia operativa.

Recuperación de calor residual en refinerías para generación de electricidad.

Monitoreo y Control de Emisiones

Uso de **sensores ópticos y espectrometría láser** para detección de metano.

Implementación de **software de modelado y simulación** para evaluar eficiencia energética.

Captura y Almacenamiento de Carbono (CCUS)

Inyección de CO₂ en **yacimientos agotados** para almacenamiento geológico.

Conversión de CO₂ en **combustibles sintéticos y productos industriales**.

9.1.1. Implementación de Tecnología y Prácticas de Eficiencia Energética en el Sector

Hidrocarburos

Instalación de paneles solares y turbinas eólicas en campos petroleros.

Uso de energía geotérmica en procesos de refinación.

Uso Racional y Eficiente de Energía en el Sector Hidrocarburos y el PAI-PROURE mediante el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía (URE) en Colombia busca reducir el consumo innecesario de energía y mejorar la eficiencia en distintos sectores, incluyendo el de hidrocarburos. En este contexto, el Plan de Acción Indicativo del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía (PAI-PROURE 2022-2030) establece estrategias específicas para optimizar el uso de energía en la exploración, producción, refinación, transporte y distribución de petróleo y gas.

Dado que el sector hidrocarburos es un gran consumidor de energía y una fuente significativa de emisiones de GEI, el PAI-PROURE impulsa la adopción de medidas para reducir la intensidad energética en sus procesos. Algunas estrategias clave incluyen

Optimización de equipos y procesos

Uso de motores de alta eficiencia en plantas de refinación y estaciones de bombeo.

Implementación de sistemas de recuperación de calor residual para reducir el consumo de energía térmica.

Modernización de turbinas y compresores en las estaciones de compresión de gas.

Electrificación y fuentes renovables

Sustitución de generadores diésel por energía eléctrica en campos petroleros.

Instalación de paneles solares y sistemas de energía eólica para el autoconsumo en operaciones remotas.

Uso de baterías y almacenamiento de energía para mejorar la estabilidad del suministro.

Reducción de emisiones por quema y venteo de gas

Implementación de tecnologías de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS).

Reaprovechamiento del gas asociado para generación de energía en lugar de su quema o venteo.

Digitalización y monitoreo inteligente

Uso de sensores y sistemas de Internet de las Cosas (IoT) para el control y optimización del consumo energético.

Aplicación de inteligencia artificial y análisis de datos para predecir fallos y mejorar la eficiencia operativa.

9.1.2.Relevancia del PAI-PROURE para la Carbono Neutralidad del Sector Hidrocarburos

La implementación de estas medidas no solo contribuye a la reducción de costos operativos, sino que también está alineada con los compromisos de Colombia en materia de descarbonización. En particular, la Ley 2169 de 2021, que establece la meta de carbono neutralidad al 2050, exige al sector hidrocarburos la adopción de tecnologías más limpias y la reducción progresiva de su huella de carbono.

9.1.3.Riesgos y Barreras

Posibles obstáculos regulatorios, tecnológicos o económicos que puedan limitar la adopción de medidas climáticas.

La transición hacia una economía baja en carbono en el sector de hidrocarburos también implica la necesidad de financiamiento y apoyo gubernamental. En este sentido, los mecanismos de mercado de carbono, los fondos climáticos internacionales y los incentivos tributarios juegan un papel crucial para la implementación de medidas de mitigación.

El sector hidrocarburos enfrenta un desafío significativo en el marco de la transición energética y la carbono neutralidad. La producción y consumo de combustibles fósiles contribuyen sustancialmente a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo que exige la implementación de soluciones técnicas que reduzcan su impacto ambiental. En este documento se analizan las principales implicaciones técnicas que enfrenta el sector y las estrategias disponibles para mitigar su huella de carbono.

9.1.4. Desafíos y Oportunidades

Desafíos

Alto costo de implementación de tecnologías de reducción de emisiones.

Barreras regulatorias y resistencia del sector.

Falta de infraestructura para el almacenamiento de CO₂.

Oportunidades

Acceso a financiamiento internacional para proyectos de transición energética.

Potencial de generación de empleo en tecnologías de captura y almacenamiento de carbono.

Mejora en la competitividad del sector mediante innovación y sostenibilidad.

La reducción de emisiones en el sector hidrocarburos es un reto técnico y económico que requiere la adopción de tecnologías innovadoras, el cumplimiento de regulaciones ambientales y la optimización de procesos. Aunque existen barreras significativas, la transición

hacia un modelo energético más limpio representa una oportunidad para la sostenibilidad del sector y el cumplimiento de los compromisos climáticos del país.

Tabla 25 Propuesta de Mejoramiento Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero 1990-2018

| Subcategorías: 1B2a Petróleo; 1B2b Gas natural | | |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Código de mejora | Oportunidad de mejora | Propuesta de mejoramiento |
| 1B2-1 | Los datos de actividad para la estimación de emisiones fugitivas son tomados de diferentes fuentes de información. La UPME administra el Sistema de Información de Petróleo y Gas Colombiano (SIPG), en el cual se consignan los principales datos históricos de los sectores de petróleo y gas, aunque no todos los datos están actualizados. No contar con datos centralizados y actualizados en un solo sistema de información genera dificultades en para la estimación del inventario. | Por un lado, se requiere definir los canales de comunicación que permitan conocer los datos actualizados y las estadísticas del sector a través de la página web el SIPG. Por parte de la ANH, buscar que se ponga a disposición de la UPME y del SIPG, así como del IDEAM, los balances de gas por departamento o por campo de producción. Información que también debe ser validada por MinEnergía. Como parte de los convenios sectoriales, buscar que MinEnergía, con apoyo de la UPME, recopile información específica acerca de las acciones de mitigación implementadas por las empresas del sector, de forma que puedan ser integradas en los futuros INGEI. |
| Pilar de mejoramiento de la CMNUCC | | |
| 1B2-2 | Actualmente la metodología empleada es de Nivel 1, lo cual genera alta incertidumbre en la estimación de emisiones. Esto podría implicar que las reducciones de emisiones fugitivas que se logren mediante acciones de mitigación no se reflejen en el INGEI. Adicionalmente, no se cuenta con el factor de emisión de N ₂ O para venteo en producción de petróleo y gas natural. | Buscar los acuerdos sectoriales donde se aborde la tarea de desarrollar factores de emisión propios a partir de la información de emisiones generada por empresas del sector para instalaciones específicas. Entre ellos, acuerdos entre Ecopetrol y universidades, centros de investigación o cooperación internacional, con el objeto de lograr el desarrollo de factores de emisión propios para el país. |
| Pilar de mejoramiento de la CMNUCC | | |

Nota. Tomado inventario Nacional Gases Efecto Invernadero

Tabla 26 *Aporte importante 2050 Carbono Neutralidad*

| | | |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>CCUS-EOR</p> | <p>Se estima que para el 2017, de los 375 proyectos de EOR que operaban a nivel mundial, 166 proyectos eran a través de la inyección de CO₂. La producción de petróleo de los proyectos EOR-CO₂ es de aproximadamente 0.5 millones de bpd. Este volumen representa aproximadamente el 20 % de la producción de las operaciones EOR, que a su vez representa el 2 % de la producción mundial de petróleo.</p> | <p>El costo nivelado de captura oscila entre 14-250 USD/t CO₂, seguido del coste del CO₂ durante las operaciones de EOR con una variación de 29-71 USD/t CO₂ y finalmente el transporte de CO₂ de 1.2 USD/t CO₂ a 28 USD / t CO₂ (Yáñez, Ramírez, Núñez-López, Castillo, y André, 2020).</p> |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Nota. Tomado de análisis independiente UPME

Las empresas petroleras en Colombia han implementado diversas estrategias para mejorar su eficiencia energética y reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estas estrategias se agrupan en tres tipos de medidas principales: buenas prácticas, cambio tecnológico y aprovechamiento de energía.

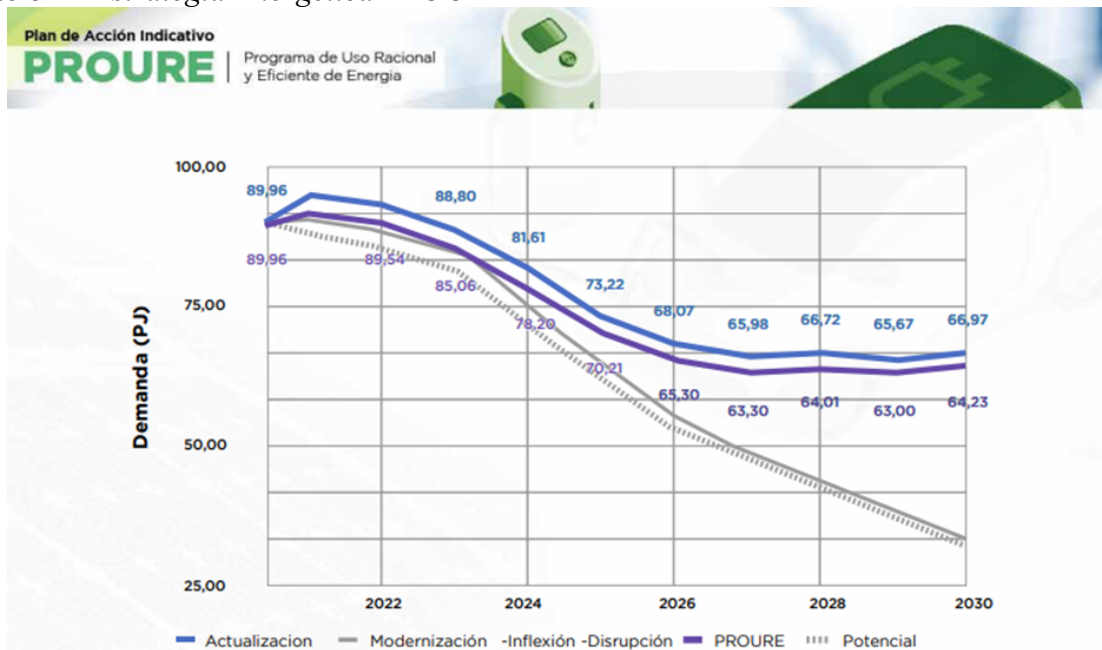
Dentro de las **buenas prácticas**, se incluyen mejoras en la producción y el transporte de hidrocarburos, así como la implementación de sistemas de gestión de energía. Acciones específicas como la detección y reparación de fugas (Acción 1.4) y la realización de pruebas de combustión para calibración de equipos (Acción 2.1) permiten optimizar procesos y reducir pérdidas de energía.

El **cambio tecnológico** es otra estrategia clave que involucra la actualización de procesos en la producción y el transporte mediante la adopción de nuevas tecnologías. Entre las acciones destacadas están la adquisición de bombas eléctricas (Acción 4.1), la implementación de sistemas de enfriamiento centralizados (Acción 5.2) y el uso de motores eléctricos de alta eficiencia para reemplazar motores a gas (Acción 5.1).

Por otro lado, el **aprovechamiento de energía** busca maximizar la utilización de los recursos disponibles en la industria petrolera. En este sentido, la generación de energía mediante el aprovechamiento de gas recuperado (Acción 6.1) y la implementación del ciclo Rankine orgánico para recuperar calor residual en motores y turbinas (Acción 6.2) representan avances importantes en eficiencia energética. Además, la recuperación de gas mediante la adquisición de equipos para la recuperación de gas de tea y de hidrocarburos condensables (Acción 7.1) contribuye a minimizar el desperdicio de recursos energéticos.

Estas medidas reflejan el compromiso de la industria petrolera con la sostenibilidad y la transición hacia un modelo energético más eficiente y con menor impacto ambiental. La implementación de estas estrategias está alineada con los objetivos del Plan de Acción Indicativo de Uso Racional de la Energía (PROURE) 2022-2030, el cual establece lineamientos para la optimización energética en el sector de hidrocarburos (Yáñez et al., 2018).

Ilustración 7 Estrategia Energética PROURE



Gráfica 32. Comparación de escenarios de consumo energético para el sector hidrocarburos

El ejercicio de simulación de eficiencia energética para el sector de hidrocarburos resultó en un potencial ahorro de 27.68 PJ en el periodo 2022-2030, lo que comparado con el escenario de producción resulta en una reducción del 3.71%.

Tabla 21. Resumen de resultados de las medidas de eficiencia energética propuestas para el sector hidrocarburos.

| Medida | Reducción de demanda (2022-2030) PJ | % | Emisiones evitadas acumuladas (2022-2030) Ton CO2 | % | Aporte global % |
|-----------------------|-------------------------------------|--------|---------------------------------------------------|--------|-----------------|
| Buenas prácticas | 9.90 | 35.77% | 593.703 | 35.65% | 35.71% |
| Cambio tecnológico | 4.44 | 16.06% | 266.318 | 15.99% | 16.02% |
| Generación de energía | 3.12 | 11.28% | 187.248 | 11.24% | 11.26% |
| Recuperación de gas | 10.21 | 36.91% | 617.958 | 37.11% | 37.01% |
| Total | 27.68 | | 1,665,227 | | |

Línea estratégica de infraestructura resiliente: A 2025 un instrumento de planificación sectorial de hidrocarburos, uno de minería de carbón y uno de energía eléctrica cuentan con lineamientos de cambio climático orientados al aseguramiento de las condiciones operatividad integral bajo nuevos escenarios de demandas operativas y ambientales".

Inclusión de consideraciones de cambio climático en los instrumentos de manejo y control ambiental de proyectos obras y/o actividades de competencia de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales a partir del año 2020.

9.2. Propuestas de Acción y Objetivos Temporales

9.2.1. Corto Plazo (2025-2030)

Aplicación obligatoria de **monitoreo en tiempo real** de emisiones de metano.
Implementación de **tecnologías de detección de fugas** en infraestructuras críticas.
Regulación estricta del **venteo y quema de gas asociado**.

Implementación de tecnologías de detección y reducción de fugas de metano.

Optimización de procesos de refinación mediante eficiencia energética.

Uso de energías renovables en operaciones industriales y de exploración.

Creación de incentivos fiscales para empresas que adopten tecnologías bajas en carbono.

Promoción de mercados de carbono y esquemas de compensación de emisiones.

9.2.2. Mediano Plazo (2030-2040)

Desarrollo de **proyectos de captura y almacenamiento de CO₂**.
Incentivos para la producción de **hidrógeno verde** en la industria petrolera.
Reducción progresiva de la intensidad de carbono en refinerías.

Reducción del 50% de las emisiones de GEI en comparación con niveles de 2010.

Desarrollo de infraestructura para captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS).

Implementación masiva de electrificación en transporte y maquinaria industrial.

Expansión de programas de reforestación para compensación de emisiones.

Fortalecimiento de la regulación ambiental y de los mecanismos de monitoreo.

9.2.3.Largo Plazo (2040-2050)

Integración total de energías renovables en la matriz energética del sector.
Implementación de modelos de economía circular en la industria petrolera.
Cumplimiento de carbono neutralidad mediante compensación y reducción directa.

El cumplimiento de las metas de carbono neutralidad en el sector hidrocarburos colombiano requiere la implementación de tecnologías avanzadas, monitoreo riguroso de emisiones y una transición energética progresiva. La normativa existente establece bases claras, pero es necesario fortalecer la fiscalización y el incentivo a la innovación para garantizar el cumplimiento de los objetivos climáticos nacionales e internacionales.

Para garantizar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el sector hidrocarburos y cumplir con los compromisos de carbono neutralidad, es necesario definir acciones concretas con objetivos a corto, mediano y largo plazo. Este documento presenta propuestas de acción estructuradas en distintos niveles, alineadas con la normativa colombiana y los acuerdos internacionales.

Las estrategias de mitigación se organizan en tres horizontes temporales:

Alcanzar la carbono neutralidad en el sector hidrocarburos mediante la eliminación de emisiones netas.

Conversión de refinerías hacia procesos con hidrógeno verde y bioenergía.

Implementación total de tecnologías de captura de carbono en todas las operaciones.

Transición hacia un modelo energético basado en fuentes renovables.

Consolidación de un sistema de economía circular en la industria petrolera.

9.2.4.Propuesta de Estrategias de Mitigación y Compensación para el Sector

Hidrocarburos en Colombia

El sector hidrocarburos en Colombia debe adoptar estrategias prioritarias para mitigar y compensar su impacto ambiental, alineándose con los compromisos de la **Ley 2169 de 2021**

y el **Acuerdo de París**. Estas estrategias deben estar enfocadas en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), eficiencia energética, captura y almacenamiento de carbono (CCS) y compensación ambiental.

9.2.5. Estrategias Prioritarias para la Reducción del Impacto Ambiental en la Industria Petrolera

La industria petrolera enfrenta el desafío de reducir su impacto ambiental mientras mantiene su competitividad. Para lograrlo, se han definido estrategias prioritarias enfocadas en la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), eficiencia energética, captura y almacenamiento de carbono (CCS), y compensación ambiental. Estas prácticas buscan alinear las operaciones del sector con los compromisos nacionales e internacionales en materia de sostenibilidad.

Mitigación de Emisiones de GEI

Una de las principales estrategias para reducir las emisiones de GEI es la **optimización de la quema y venteo de gas**, implementando tecnologías de recuperación y aprovechamiento del gas asociado. Además, la **reducción de emisiones fugitivas de metano** se fortalece con el uso de sensores avanzados y programas de detección y reparación de fugas (*Leak Detection and Repair - LDAR*).

Asimismo, se promueve el **uso de energías renovables en operaciones**, incorporando fuentes como la solar y la eólica en plataformas y campos petroleros. La **electrificación de operaciones**, mediante la sustitución de generadores diésel por conexiones a la red eléctrica con fuentes limpias, contribuye a la reducción de la huella de carbono. Finalmente, la implementación de un **transporte más eficiente**, con el uso de combustibles menos

contaminantes y sistemas optimizados, complementa los esfuerzos de descarbonización del sector.

Eficiencia Energética

Para mejorar la eficiencia energética, se plantea la **modernización de la infraestructura**, implementando equipos de alto rendimiento con menor consumo energético. La **automatización y digitalización** mediante inteligencia artificial y sensores IoT optimiza la eficiencia operativa y facilita la toma de decisiones en tiempo real.

Por otro lado, la **optimización de procesos de refinación** reduce el consumo de energía en refinerías y plantas de procesamiento, disminuyendo así la dependencia de combustibles fósiles en la producción.

Captura y Almacenamiento de Carbono (CCS)

El desarrollo de **proyectos piloto de CCS** es una estrategia clave para capturar y almacenar CO₂ en reservorios agotados, asegurando su confinamiento a largo plazo. Además, la **captura en fuentes fijas**, mediante la instalación de filtros avanzados en refinerías y plantas industriales, permite reducir significativamente las emisiones de CO₂ antes de que lleguen a la atmósfera.

Otra aplicación estratégica es el **uso de CO₂ en recuperación mejorada de petróleo (EOR)**, donde el CO₂ capturado se reutiliza para mejorar la extracción de crudo, promoviendo una operación más eficiente y con menor impacto ambiental.

Compensación Ambiental

Como parte de los esfuerzos para mitigar el impacto ambiental, las empresas petroleras invierten en **reforestación y restauración de ecosistemas**, trabajando con comunidades locales para establecer proyectos de captura de carbono. La **conservación de áreas protegidas** también juega un papel importante, destinando financiamiento a proyectos de preservación y monitoreo de la biodiversidad.

Finalmente, los **proyectos de carbono azul**, enfocados en la restauración de manglares y humedales, permiten aprovechar estos ecosistemas como sumideros naturales de carbono, fortaleciendo la resiliencia climática y la protección de la biodiversidad marina.

Estas estrategias representan un enfoque integral para la sostenibilidad de la industria petrolera, alineando sus operaciones con las metas de reducción de emisiones y transición hacia una economía baja en carbono.

Tabla 27 Alternativas por Periodo de Implementación

| Periodo | Metas Clave |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Corto (2025) | Implementar programas de detección y reparación de fugas de metano (LDAR). Plazo - Reducir en un 20% el venteo y quema de gas en operaciones. - Aumentar el uso de energías renovables en campos en 10% . - Iniciar pilotos de captura y almacenamiento de CO ₂ en refinerías y campos petroleros. |
| Mediano (2030) | - Reducir emisiones de GEI en un 40% respecto a 2020. - Alcanzar 30% de electrificación de operaciones con fuentes renovables. Plazo - Implementar programas de eficiencia energética en 100% de las refinerías. - Restaurar 50,000 hectáreas de bosques y ecosistemas degradados. |
| Largo (2050) | - Lograr cero emisiones netas de CO₂ en toda la cadena de valor. Plazo de - Capturar y almacenar al menos 10 millones de toneladas de CO₂ anuales. |

| Periodo | Metas Clave |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | <ul style="list-style-type: none"> - Convertir al 100% de los campos en operaciones con bajas emisiones. - Consolidar un sistema de compensación ambiental robusto con proyectos sostenibles. |

Nota. Elaboración propia

Estas estrategias garantizarán que el sector hidrocarburos colombiano cumpla con los compromisos climáticos y minimice su impacto ambiental, asegurando una transición responsable hacia una economía baja en carbono. La implementación progresiva de estas acciones permitirá alcanzar la **carbono neutralidad para 2050** sin comprometer la seguridad energética del país.

El análisis del cumplimiento del sector hidrocarburos colombiano con las metas de carbono neutralidad establecidas en el **Acuerdo de París** y la **Ley 2169 de 2021** permite identificar avances, desafíos y oportunidades clave para la descarbonización de esta industria. A partir del cumplimiento de los objetivos planteados en esta investigación, se presentan las siguientes conclusiones:

El **Acuerdo de París** y la **Ley 2169 de 2021** establecen compromisos concretos para la reducción de emisiones de GEI en el sector hidrocarburos, incluyendo medidas de eficiencia energética, captura de carbono y reducción de emisiones fugitivas.

Si bien la normativa colombiana ha avanzado en la regulación de emisiones y en la promoción de prácticas sostenibles, aún existen brechas en la implementación efectiva de estas medidas, especialmente en el monitoreo, reporte y verificación (MRV) de emisiones.

La transición energética en el país aún se enfrenta a barreras económicas y tecnológicas que limitan la adopción de soluciones de bajas emisiones dentro del sector hidrocarburos.

Fuentes de Emisiones y Cumplimiento Sectorial

Las **principales fuentes de emisiones** en el sector hidrocarburos incluyen la quema y venteo de gas, las emisiones fugitivas de metano, el consumo energético en procesos de extracción y refinación, y las emisiones indirectas en la cadena de suministro.

Aunque algunas empresas han implementado programas de reducción de emisiones y eficiencia energética, la adopción de estas estrategias no es homogénea en toda la industria.

Las iniciativas de captura y almacenamiento de carbono (CCS) y de compensación mediante soluciones basadas en la naturaleza aún son incipientes en Colombia, lo que representa un área de oportunidad para fortalecer la carbono neutralidad del sector.

9.2.6. Estrategias y Metas para la Reducción de Emisiones

Para alcanzar la carbono neutralidad, se requieren **acciones prioritarias** como la reducción del venteo y quema de gas, la implementación de tecnologías de detección de fugas de metano, la electrificación de operaciones con energías renovables y el impulso de proyectos de captura de carbono.

Se establecieron metas específicas de reducción de emisiones a corto, mediano y largo plazo:

Corto plazo (2025): Implementación de tecnologías de detección y reparación de fugas (LDAR), reducción del venteo de gas en un 20% y aumento del uso de energías renovables en operaciones.

Mediano plazo (2030): Reducción del 40% de las emisiones del sector respecto a 2020, electrificación del 30% de las operaciones con fuentes limpias y restauración de 50,000 hectáreas de ecosistemas degradados.

Largo plazo (2050): Alcanzar la carbono neutralidad con emisiones netas cero, lograr la captura y almacenamiento de al menos 10 millones de toneladas de CO₂ anuales y consolidar un sistema robusto de compensación ambiental.

Implicaciones para el Sector y la Política Pública

Es fundamental fortalecer los mecanismos de monitoreo y reporte de emisiones, asegurando la transparencia y cumplimiento de las metas climáticas.

La transición hacia un modelo energético más sostenible en el sector hidrocarburos debe ir acompañada de incentivos económicos, acceso a financiamiento para proyectos de descarbonización y colaboración entre el gobierno, empresas y la academia.

La adopción de estándares internacionales en materia de sostenibilidad y carbono neutralidad permitirá mejorar la competitividad del sector hidrocarburos colombiano y su alineación con compromisos climáticos globales.

Si bien el sector hidrocarburos colombiano ha avanzado en la adopción de estrategias de mitigación, aún se requiere un compromiso más sólido y coordinado para garantizar el cumplimiento de las metas de carbono neutralidad. La implementación de tecnologías limpias, la eficiencia energética y la captura de carbono deben ser pilares fundamentales para lograr la descarbonización del sector y contribuir a la lucha contra el cambio climático en Colombia y a nivel global.

El análisis del cumplimiento del sector hidrocarburos colombiano con las metas de carbono neutralidad del Acuerdo de París y la Ley 2169 de 2021 evidencia avances importantes, pero también retos significativos. Aunque algunas empresas han adoptado estrategias de mitigación de emisiones, persisten brechas regulatorias y tecnológicas que dificultan una transición efectiva hacia la carbono neutralidad. Es fundamental fortalecer la implementación de normativas y fomentar una mayor adopción de prácticas sostenibles dentro de la industria.

El sector hidrocarburos colombiano sigue siendo una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente debido al venteo y quema de gas, las fugas de metano y el alto consumo energético en las operaciones. Aunque varias

compañías han implementado estrategias de reducción, como la optimización de procesos y la electrificación parcial de operaciones, el cumplimiento con los estándares internacionales aún es desigual. Se requiere una mayor fiscalización y monitoreo para garantizar la reducción efectiva de emisiones.

Para mitigar el impacto ambiental del sector, se proponen medidas concretas con metas a corto, mediano y largo plazo. Para 2025, es clave reducir en un 20% las emisiones fugitivas y mejorar la eficiencia energética. Para 2030, se debe consolidar el uso de energías renovables en al menos el 30% de las operaciones y reducir un 40% las emisiones de carbono. Finalmente, para 2050, la meta es alcanzar la carbono neutralidad, con la implementación de tecnologías avanzadas de captura y almacenamiento de carbono (CCS) y la consolidación de proyectos de compensación ambiental.

10. Conclusiones

El cumplimiento del sector hidrocarburos colombiano con las metas de **carbono neutralidad** establecidas en el **Acuerdo de París** y la **Ley 2169 de 2021** presenta avances en algunas áreas, pero también evidencia desafíos significativos. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2023), la transición hacia una industria más sostenible requiere la implementación de tecnologías de **baja emisión de carbono**, así como el fortalecimiento de las políticas regulatorias. En el caso colombiano, aunque existen iniciativas empresariales para reducir emisiones, la falta de incentivos económicos y una regulación más estricta han limitado la efectividad de estas medidas (ANLA, 2023).

El análisis de emisiones en el sector hidrocarburos confirma que las principales fuentes de **GEI** provienen de la **quema y venteo de gas, las emisiones fugitivas y el consumo energético de las operaciones** (Ministerio de Minas y Energía, 2023). De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2023), la reducción de estas emisiones es

fundamental para limitar el calentamiento global a 1.5°C. Sin embargo, el monitoreo en Colombia sigue siendo un desafío, ya que muchas empresas aún no implementan sistemas efectivos de medición y reporte de emisiones (ANH, 2023).

Las estrategias de mitigación y compensación propuestas en este estudio están alineadas con modelos de transición energética recomendados por organismos internacionales. En el corto plazo (**2025**), reducir un **20% de las emisiones fugitivas** es viable a través de la **optimización de procesos y la detección temprana de fugas de metano** (IEA, 2023). En el mediano plazo (**2030**), la incorporación de **energías renovables en al menos el 30% de las operaciones** permitiría una disminución significativa de la huella de carbono (IRENA, 2023). A largo plazo (**2050**), alcanzar la **carbono neutralidad** dependerá de la masificación de tecnologías como la **captura y almacenamiento de carbono (CCS)** y la compensación a través de proyectos de reforestación (IPCC, 2023).

Finalmente, la viabilidad de una transición energética en el sector hidrocarburos colombiano radica en una mayor articulación entre el **gobierno, la industria y la academia**. Diversos estudios (Bastida et al., 2023; ONU, 2023) enfatizan que una regulación ambiental robusta, junto con incentivos económicos y financiamiento para la innovación, es clave para garantizar el cumplimiento de los compromisos climáticos. En este sentido, Colombia debe fortalecer su marco regulatorio y promover la adopción de tecnologías limpias para asegurar un futuro energético sostenible.

Referencias Bibliográficas

- Agencia Internacional de Energía. (2021). *Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. IEA.
- Agencia Internacional de Energía. (2023). *Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2019). *Resolución 90341 de 2019, por la cual se regulan los estándares ambientales para la exploración y explotación de hidrocarburos*.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2022). *Informe de sostenibilidad del sector hidrocarburos en Colombia 2022*. ANH.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2023). *Reporte de cumplimiento ambiental del sector hidrocarburos en Colombia*. <https://www.anh.gov.co>
- Agencia Nacional de Licencias Ambientales. (2023). *Evaluación de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector hidrocarburos*. <https://www.anla.gov.co>
- Arciniegas, L., & Gómez, C. (2020). *Análisis de estrategias para la reducción de emisiones en el sector de hidrocarburos en Colombia*. *Revista de Energía y Ambiente*, 15(2), 45-60. <https://doi.org/xxxxx>
- Bárcena, A., et al. (2020). *La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe*. CEPAL. <https://www.cepal.org>
- Bastida, E., Le Billon, P., & Ferdinand, M. (2023). *The geopolitics of fossil fuel transition: Challenges and opportunities*. *Energy Policy*, 175, 113456.
- C40 Cities. (2018). *Programa de planificación de acción climática de C40*.

Canacol Energy Colombia SAS. (2023). *Informe ESG y TCFD 2023*. Canacol Energy.

https://canacolenergy.com/site/assets/files/4069/06_06_2024_-_canacol_energy_ltd_canacol_energy_ltd_presenta_sus_informes_asg_y_tcfd_de_2023.pdf

CNE Oil & Gas S.A.S. (2023). *Reporte de sostenibilidad 2022*. <https://www.cneoilgas.com>

CEPAL. (2021). *Herramientas para acelerar la implementación de los planes de acción climática de América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile.

Congreso de la República de Colombia. (2021). *Ley 2169 de 2021, por la cual se establecen metas de carbono neutralidad en Colombia*. Diario Oficial No. 51.870.

Departamento Nacional de Planeación. (2021). *Estrategia de carbono neutralidad en Colombia: Hoja de ruta 2050*. DNP.

Díaz, G. (2012). *El cambio climático, cambio y sociedad*.

Díaz, R., & Pérez, J. (2019). *Cambio climático y transición energética en América Latina*. Ediciones EcoSur.

Drummond Energy, Inc. (2023). *Sustainability report 2022*. <https://www.drummondenergy.com>

Ecopetrol S.A. (2023). *Informe de sostenibilidad 2023*. <https://files.ecopetrol.com.co/web/esp/cargas/Informe%20SASB%202023.pdf>

Frontera Energy Colombia Corp. (2023). *Reporte de sostenibilidad 2022*. <https://www.fronteraenergy.ca>

Frontera Energy Colombia Corp. (2024). *Sustainability report 2023*.

https://www.fronteraenergy.ca/content/uploads/2024/06/REPORTE_DE_SOSTENIBILIDAD_FRONTERA_ENERGY_2023.pdf

GeoPark Colombia S.A.S. (2023). *Reporte SPEED ESG 2023*. GeoPark. <https://www.geopark.com/wp-content/uploads/2023/06/GeoPark-Reporte-SPEED-ESG-2022.2.pdf>

<https://www.geopark.com/wp-content/uploads/2023/06/GeoPark-Reporte-SPEED-ESG-2022.2.pdf>

Gran Tierra Energy Colombia GmbH. (2023). *Sustainability report 2022*.

<https://www.grantierra.com>

Gran Tierra Energy Colombia GmbH. (2023). *Reporte de sostenibilidad 2023*.

https://www.grantierra.com/wp-content/uploads/2024/06/Reporte-de-Sostenibilidad-2023_062124.pdf

Grigo, et al. (2020). *La tragedia ambiental de América Latina y el Caribe*. CEPAL.

<http://repositorio.cepal.org>

Herrera, J., & Suárez, D. (2019). *Modelos de mitigación de gases de efecto invernadero en la industria petrolera de Colombia*. *Revista Colombiana de Medio Ambiente*, 6(1), 33-48.

<https://doi.org/xxxxx>

Hocol S.A. (2023). *Informe de sostenibilidad 2022*. <https://www.hocol.com.co>

International Renewable Energy Agency. (2023). *Global energy transformation: A roadmap to 2050*. <https://www.irena.org/publications>

<https://www.irena.org/publications>

Iberdrola. (2020). *Neutralidad de carbono: Qué es y por qué es fundamental para el futuro del planeta*. <http://iberdrola.com>

<http://iberdrola.com>

IDEAM, PNUD, & MADS. (2020). *Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero en Colombia*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Mansarovar Energy Colombia Ltd. (2023). *Reporte de gestión ambiental y sostenibilidad 2022*.

<https://www.mansarovarenergy.com>

Martínez, P., & Ramírez, O. (2021). *Evaluación de tecnologías de captura de carbono en la industria petrolera*. *Journal of Sustainable Energy*, 10(3), 112-128.

<https://doi.org/xxxxx>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Decreto 446 de 2022, por el cual se establecen lineamientos para la reducción de emisiones en el sector extractivo*.

Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2023). *Plan integral de gestión del cambio climático del sector minero-energético*. <https://www.minenergia.gov.co>

Ministerio de Minas y Energía. (2020). *Resolución 40715 de 2020, sobre eficiencia energética en el sector industrial*.

Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Plan indicativo de eficiencia energética 2023-2030*.

<https://www.minenergia.gov.co>

Naciones Unidas. (1992). *Declaración de Río sobre el medio ambiente y el desarrollo*.

www.onu.org

Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de París sobre el cambio climático*.

<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

Naciones Unidas. (2023). *Informe sobre el estado del clima mundial*.

<https://www.un.org/climatechange>

Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. (2023). *Climate change 2023: The physical science basis*. <https://www.ipcc.ch>

Parex Resources Colombia Ltd. (2023). *Reporte de sostenibilidad 2023*. https://www.parexresources.com/wp-content/uploads/2024/10/P290-2023-Sustainability-Report-SPANISH_Oct22-FINALWEB.pdf

Perenco Oil and Gas Colombia Limited. (2023). *Sustainability report 2022*. <https://www.perenco.com>

Pindyck, R. S., & Rubinfeld, D. L. (2018). *Microeconomía y medioambiente: Impacto y regulación*. Pearson.

SierraCol Energy Arauca LLC. (2023). *Reporte de sostenibilidad 2023*. https://sierracolenergy.com/cms/uploads/000_Sierra_Col_informe_Espanol_2023_v6_b94ce3b3b9.pdf

Stern, N. (2007). *The economics of climate change: The Stern Review*. Cambridge University Press.

Tecpetrol Colombia SAS. (2023). *Reporte de sostenibilidad 2023*. https://www.tecpetrol.com/media/lp4jnple/tecp_rs2023_esp-final.pdf

Torres, M., & Fernández, E. (2022). *Implementación de energías renovables en el sector hidrocarburífero: Un análisis de viabilidad*. *Latin American Journal of Energy Policy*, 8(4), 89-102. <https://doi.org/xxxxx>

WWF Colombia.