

Evaluación de estrategias para la reducción de la huella de carbono en la industria petrolera
colombiana

Karol Yuliana Rico Talero

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Harving Díaz Consuegra

Ingeniero de Petróleos y Especialista en Ingeniería Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

En el punto culminante de este viaje académico, deseo expresar mi más profunda gratitud y reconocimiento a todos aquellos que han sido parte integral de esta travesía que ha transformado nuestro conocimiento y aspiraciones.

A mi amada familia, cuyo amor incondicional y apoyo constante me ha sostenido en cada paso del camino, les dedico este logro. Sus palabras de aliento y sacrificios silenciosos me han dado la fuerza para superar desafíos y seguir adelante en busca del conocimiento.

A ti, mi querido, te dedico este logro con todo mi corazón. Cada paso que he dado hacia adelante en esta carrera, ha sido posible gracias a tu presencia constante a mi lado. Tus palabras de aliento, tus abrazos reconfortantes y tu sonrisa han sido mi combustible para persistir y alcanzar mis metas.

A mis amigos, quienes han compartido risas, alegrías y momentos de desahogo durante estos años, les agradezco por su invaluable compañía. Su energía positiva ha iluminado incluso los días más oscuros de estudio y me han registrado que el equilibrio entre el trabajo y el descanso es fundamental.

En esta dedicación, deseo que mi tesis no solo represente mi esfuerzo, sino también el reconocimiento sincero a todos aquellos que han sido parte de esta travesía. Que este trabajo sea un testimonio duradero de mi gratitud y aprecio por todos los momentos compartidos y el apoyo brindado. Que inspire a las generaciones futuras de estudiantes de Ingeniería de Petróleos a perseguir el conocimiento y contribuir al campo de manera significativa.

Con humildad y gratitud, Karol Yuliana Rico.

Agradecimientos

En el proceso de alcanzar esta meta significativa, me siento profundamente agradecido/a por todas las personas que han dejado su huella en mi camino y han contribuido de manera invaluable a mi crecimiento académico y personal.

A mi familia, por ser mi fuente inagotable de amor, apoyo y aliento.

A mi director de tesis, ingeniero Harving Díaz Consuegra, por su guía experta y dedicación en orientarme a lo largo de este proceso. Sus conocimientos y comentarios críticos han sido fundamentales para dar forma a mi trabajo.

A mis profesores, cuya pasión por la enseñanza y el conocimiento ha iluminado mi camino. Agradezco por transmitirme no solo información, sino también el deseo de seguir aprendiendo y explorando.

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos, por brindarme las herramientas y los recursos necesarios para desarrollarme como profesional en esta disciplina. Cada lección aprendida y cada experiencia vivida aquí ha contribuido a mi crecimiento integral.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo General	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Marco de Referencia	13
2.1 Marco Conceptual	13
2.1.1 Gases de Efecto Invernadero	13
2.1.2 Huella de Carbono y Cambio Climático	13
2.1.3 Huella de Carbono en la Industria Petrolera Colombiana	14
2.1.4 Alcance de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	17
2.1.5 Modelo de Desarrollo de la Cuádruple Hélice.....	19
2.2 Marco Legal	20
2.2.1 Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	20
2.2.2 Conferencia de las Partes	21
2.2.3 Acuerdo de París	21
2.2.4 Normatividad Colombiana.....	22
3. Panorama Actual de la Huella de Carbono en la Industria Petrolera Colombiana	23
3.1 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y Huella de Carbono Generadas por la Industria	23
3.2 Fuentes Principales que Generan Huella de Carbono en la Industria de los Hidrocarburos ..	28
4. Iniciativas o Casos de Éxito a Nivel Mundial en la Reducción de la Huella de Carbono	30

4.1 Reducción de Metano	31
4.1.1 Unidades de Recuperación de Vapor (VRU).....	33
4.1.2 Reemplazar Sistema de Antorchas	35
4.2 Eficiencia Energética	36
4.2.1 Softwares de Eficiencia Energética	37
4.2.2 Programas de Gestión de Energía	38
4.3 Hidrogeno	40
4.4 Energías Renovables	44
4.5 Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC)	47
5. Evaluación de la Aplicabilidad de los Casos Estudiados en la Industria Petrolera Colombiana	51
6. Estrategias para Reducir la Huella de Carbono desde los Diferentes Actores del Modelo de Desarrollo de la Cuádruple Hélice	68
7. Conclusiones	76
8. Recomendaciones	79
Referencias Bibliográficas	80

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Normatividad Colombiana</i>	22
Tabla 2 <i>Información iniciativa Unidades de Recuperación de Vapor VRU</i>	52
Tabla 3 <i>Información iniciativa Reemplazar Sistema de Antorchas</i>	53
Tabla 4 <i>Información iniciativa Softwares de Eficiencia Energética</i>	55
Tabla 5 <i>Información iniciativa Programa de Gestión de Energía</i>	57
Tabla 6 <i>Información iniciativa Hidrógeno</i>	58
Tabla 7 <i>Información iniciativa Energías Renovables</i>	61
Tabla 8 <i>Información iniciativa Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC)</i>	63
Tabla 9 <i>Ponderación semicuantitativa de las iniciativas para reducción de huella de carbono</i>	65
Tabla 10 <i>Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia inventario de emisiones</i>	69
Tabla 11 <i>Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia programa de gestión de energía</i>	70
Tabla 12 <i>Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia softwares de eficiencia energética</i>	71
Tabla 13 <i>Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia Unidades de Recuperación de Vapor</i>	72
Tabla 14 <i>Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia sistema de antorchas eficientes</i>	72

Tabla 15 <i>Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia energías renovables</i>	73
Tabla 16 <i>Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia hidrógeno</i>	74
Tabla 17 <i>Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia captura y almacenamiento de carbono</i>	75

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Contribución emisiones de CO₂ en el mundo</i>	15
Figura 2 <i>Participación de emisiones por módulo de energía</i>	17
Figura 3 <i>Emisiones de alcance 1, 2 y 3</i>	18
Figura 4 <i>Modelo de desarrollo económico de la cuádruple hélice</i>	20
Figura 5 <i>Principales empresas productoras de petróleo en Colombia</i>	24
Figura 6 <i>Huella e intensidad de carbono de las empresas petroleras en Colombia</i>	25
Figura 7 <i>Carbono intensidad promedio global y nacional 2022</i>	27
Figura 8 <i>Fuentes potenciales de emisión de gases de efecto invernadero en producción y exploración</i>	29
Figura 9 <i>Estimación de Emisiones de Metano en la Producción de Petróleo en Colombia</i>	32
Figura 10 <i>Sistema de Recuperación de Vapores del Tanque de Petróleo/Condensados</i>	34
Figura 11 <i>Orden de viabilidad iniciativas reducción huella de carbono</i>	66

Resumen

Título: Evaluación de estrategias para la reducción de huella de carbono de la industria petrolera en Colombia *

Autor: Karol Yuliana Rico Talero **

Palabras Clave: Huella de carbono, industria petrolera, cambio climático, estrategias de reducción.

Descripción

El cambio climático es uno de los retos más grandes que enfrenta el mundo hoy en día, en gran parte debido a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provocadas por la quema de combustibles fósiles. En este escenario, la huella de carbono se ha vuelto una herramienta clave para medir cómo nuestras actividades impactan el medio ambiente, incluyendo la producción de petróleo. Colombia, como parte del Acuerdo de París, se ha comprometido a reducir sus emisiones de GEI en un 20% para el 2030. Más tarde, en la COP26, el país elevó esta meta, apuntando a una reducción del 51%, con la intención de alcanzar la neutralidad de carbono para el 2050.

Se analizó el panorama actual de la huella de carbono en la industria petrolera colombiana y su posición en comparación con el nivel mundial. Se identificaron casos de éxito y estrategias globales en la reducción de huella de carbono en el sector petrolero, alineadas con las cinco vías de descarbonización propuestas por la Agencia Internacional de Energía: reducción de metano, eficiencia energética, energías renovables, hidrógeno y captura y almacenamiento de carbono. A partir de este análisis, se recopilaron las iniciativas más pertinentes y se evaluó su aplicabilidad en la industria petrolera colombiana. Como resultado, se propusieron ocho estrategias que el sector de hidrocarburos podría implementar progresivamente para reducir su huella de carbono y mejorar la intensidad de carbono por barril producido. Además, se detallaron las acciones necesarias que deben ser coordinadas entre los actores del modelo de la cuádruple hélice para lograr estos objetivos y de esta manera contribuir al compromiso adquirido por el país.

* Trabajo de Grado

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Harving Díaz Consuegra. Ingeniero de Petróleos y Especialista en Ingeniería Ambiental.

Abstract

Title: Evaluation of carbon footprint reduction strategies for the oil industry in Colombia *

Author(s): Karol Yuliana Rico Talero **

Key Words: Carbon footprint, oil industry, climate change, reduction strategies.

Description

Climate change is one of the greatest challenges facing the world today, largely due to greenhouse gas (GHG) emissions from fossil fuel combustion. In this context, the carbon footprint has become a key tool for measuring how our activities impact the environment, including oil production. As part of the Paris Agreement, Colombia has committed to reducing its GHG emissions by 20% by 2030. Later, at COP26, the country raised this target to a 51% reduction, with the intention of achieving carbon neutrality by 2050.

The current state of the carbon footprint in the Colombian oil industry was analyzed and compared to the global level. Successful cases and global strategies for reducing carbon footprints in the oil sector were identified, aligned with the five decarbonization pathways proposed by the International Energy Agency: methane reduction, energy efficiency, renewable energy, hydrogen, and carbon capture and storage. Based on this analysis, the most relevant initiatives were gathered and their applicability to the Colombian oil industry was evaluated. As a result, eight strategies were proposed that the hydrocarbons sector could progressively implement to reduce its carbon footprint and improve carbon intensity per barrel produced. Additionally, the necessary actions were outlined for coordination among the actors in the quadruple helix model to achieve these goals and thus contribute to the country's commitment.

* Degree Project

** Industrial University of Santander. Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Harving Díaz Consuegra. Petroleum Engineer and Specialist in Environmental Engineering.

Introducción

El cambio climático, resultado del aumento de gases de efecto invernadero por actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, la deforestación, la agricultura intensiva y una gestión ineficiente de residuos, impacta diversos sectores. Por ello, es fundamental entender y medir la huella de carbono generada por la producción de petróleo. Esta evaluación no solo permite valorar el impacto ambiental de las operaciones industriales, sino que también ayuda a desarrollar estrategias efectivas para mitigar dichos efectos. A nivel mundial, la creciente preocupación por el calentamiento global ha llevado a países, incluido Colombia, a asumir compromisos ambiciosos, como los establecidos en el Acuerdo de París y la COP26, que incluyen la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en un 51% para 2030 y la meta de alcanzar la neutralidad de carbono para 2050. En este contexto, la industria petrolera colombiana juega un papel crucial en la transición hacia una economía de bajas emisiones.

No obstante, a pesar de los progresos en regulación y la adopción de prácticas sostenibles, la industria petrolera colombiana enfrenta retos considerables. Las emisiones de gases de efecto invernadero siguen siendo elevadas, lo que hace que la necesidad de desarrollar e implementar estrategias efectivas para reducir la huella de carbono sea cada vez más apremiante. Este trabajo se propone analizar el estado actual de la huella de carbono en la industria petrolera colombiana, centrándose en la intensidad de carbono generada por la producción de un barril de petróleo y comparándola con los estándares globales. El objetivo es establecer una línea base que permita ubicar a Colombia en términos de su huella de carbono y avanzar hacia un futuro más sostenible.

La presente investigación tiene como objetivo contribuir a la literatura existente mediante un análisis de las estrategias de reducción de huella de carbono aplicables al contexto colombiano. A través de un enfoque analítico y comparativo, se identificarán y evaluarán las mejores prácticas globales en la industria petrolera, alineadas con las cinco vías de descarbonización propuestas por la Agencia Internacional de Energía: reducción de metano, eficiencia energética, energías renovables, hidrógeno y captura y almacenamiento de carbono.

El propósito final del estudio es proponer un conjunto de estrategias específicas que el sector petrolero colombiano podría implementar de manera gradual para mitigar su huella de carbono, en colaboración con otros actores del modelo de desarrollo de la cuádruple hélice. Asimismo, se recalca la importancia de fomentar políticas públicas que incentiven la inversión en tecnologías limpias y promuevan la cooperación entre los distintos actores involucrados en la industria, para cumplir con los compromisos climáticos del país y asegurar una transición hacia una economía más sostenible.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar las estrategias para la reducción de la huella de carbono en la industria petrolera colombiana.

1.2 Objetivos Específicos

- Analizar el panorama actual de la huella de carbono de la industria petrolera en Colombia.
- Identificar iniciativas o casos exitosos a nivel mundial en la reducción de huella de carbono y evaluar su aplicabilidad en la industria petrolera colombiana.
- Plantear estrategias para reducir la huella de carbono desde los diferentes actores del modelo de desarrollo de la cuádruple hélice.

2. Marco de Referencia

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 Gases de Efecto Invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) son componentes gaseosos presentes en la atmósfera que tienen la capacidad de retener el calor del sol, contribuyendo al efecto invernadero que mantiene la temperatura de la Tierra en un rango adecuado para la vida. Estos gases incluyen el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y otros compuestos como los gases fluorados. El aumento de la concentración de estos gases, principalmente debido a actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, ha llevado a un desequilibrio en el efecto invernadero natural, contribuyendo al calentamiento global y al cambio climático (EPA, 2021).

2.1.2 Huella de Carbono y Cambio Climático

La huella de carbono se refiere a la cantidad total de gases de efecto invernadero (GEI) liberados a la atmósfera como resultado directo o indirecto de las actividades humanas (EPA, 2021). Representa la medida de la contribución individual o colectiva al cambio climático y se expresa en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO₂e).

La relación entre la huella de carbono y el cambio climático es estrecha y significativa. El aumento de las emisiones de GEI, especialmente dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), debido a la quema de combustibles fósiles, la deforestación, la agricultura intensiva y otras actividades humanas, ha llevado a un aumento en la concentración de estos gases en la atmósfera.

Esto ha desencadenado el fenómeno del calentamiento global, que es la principal causa del cambio climático actual (IPCC, 2014).

Las emisiones de GEI atrapan el calor en la atmósfera, lo que provoca un aumento de la temperatura promedio en el planeta. Esto desencadena una serie de efectos adversos, como el derretimiento de los casquetes polares, el aumento del nivel del mar, eventos climáticos extremos más frecuentes e intensos, cambios en los patrones de precipitación y la alteración de los ecosistemas naturales (IPCC, 2014).

Reducir la huella de carbono es crucial para mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la sostenibilidad ambiental. Esto implica adoptar medidas para reducir las emisiones de GEI a través de la eficiencia energética, el uso de fuentes de energía renovable, la gestión adecuada de residuos, la promoción de prácticas agrícolas sostenibles y la conservación de los bosques, entre otras acciones (FAO, 2019).

2.1.3 Huella de Carbono en la Industria Petrolera Colombiana

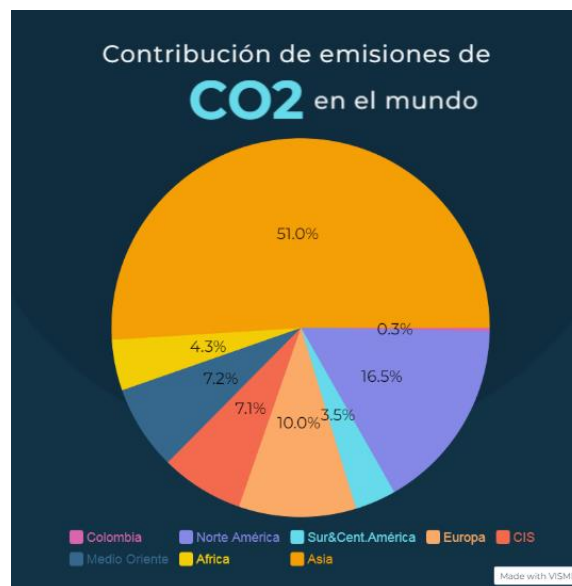
La huella de carbono en la industria petrolera colombiana se refiere a la cantidad total de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), liberados durante todas las etapas de la cadena de valor del petróleo en Colombia. Las emisiones directas provienen de las operaciones propias de la industria, como la quema de gases asociados a la producción de petróleo, uso de maquinaria pesada en los campos petroleros y quema de combustibles fósiles para la generación de energía. Por otro lado, las emisiones indirectas se generan durante el transporte y distribución del petróleo, donde los vehículos y las infraestructuras

asociadas emiten GEI. Además, los procesos de refinación y uso final de los combustibles fósiles también contribuyen a la huella de carbono de la industria petrolera.

Según el último informe sobre inventario de emisiones de gases efecto invernadero, del IDEAM y el Ministerio de Ambiente, Colombia tiene una huella de carbono promedio de aproximadamente 303 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Mt CO₂ eq) (IDEAM, 2021). En comparación, el BP Statistical Review of World Energy indica que a nivel mundial se generan alrededor de 39.315 Mt CO₂ eq (BP, 2022). Esto significa que Colombia contribuye con aproximadamente el 0,3% de las emisiones globales. Aunque este porcentaje puede considerarse pequeño, es importante tener en cuenta que Colombia es uno de los países más vulnerables al cambio climático y sus efectos, los cuales representan una amenaza para la estabilidad ambiental de los sistemas.

Figura 1

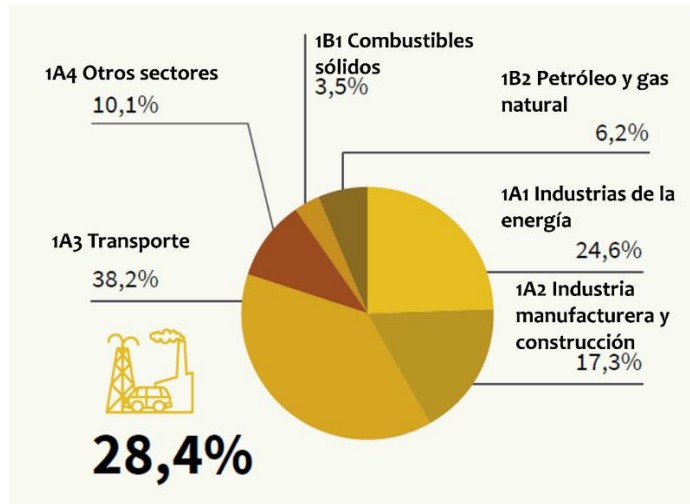
Contribución emisiones de CO₂ en el mundo



Nota. Comparación de las contribuciones generadas en materia de CO₂ de los continentes y Colombia. Datos tomados de *BP Statistical Review of World Energy 2022 & BUR3* (IDEAM, MinAmbiente).

El sector energético en Colombia tiene un impacto significativo en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En promedio, este sector contribuye al 24,8% del total de las emisiones de GEI en el país. Dentro del sector energético, la industria petrolera es responsable del 6,2% de las emisiones directas, lo cual es un porcentaje relativamente bajo respecto a las demás industrias de generación energética (IDEAM, 2021).

Por otro lado, el sector de agricultura, ganadería, silvicultura y otros usos de la tierra es el principal contribuyente a las emisiones de GEI en Colombia, representando el 63,4%. Estas actividades están relacionadas con la producción agrícola, la ganadería, la deforestación y otros usos del suelo, y liberan gases como el metano y el dióxido de carbono. En cuanto a los procesos industriales y los residuos, en conjunto aportan el 8,2% de las emisiones de GEI en el país. Esto incluye la producción de cemento, acero y otros procesos industriales, así como la gestión inadecuada de los residuos (IDEAM, 2021).

Figura 2*Participación de emisiones por módulo de energía*

Nota. Tomado de *Inventario de Emisiones BUR3 Colombia, IDEAM 2021.*

2.1.4 Alcance de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

Los alcances de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) fueron introducidos por primera vez en el GHG Protocol (2004), una iniciativa desarrollada por el World Resources Institute (WRI) y el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). En este documento se definen tres alcances para propósitos de reporte y contabilidad de emisiones de GEI.

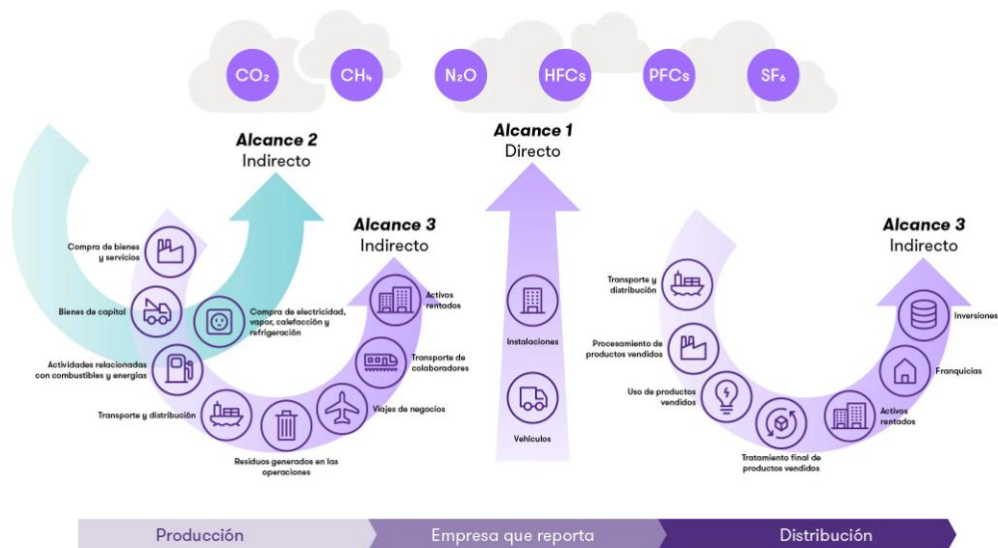
- **Alcance 1.** Son aquellas liberadas directamente desde fuentes de propiedad o control de la organización. Esto incluye las emisiones de la combustión de combustibles fósiles en instalaciones propiedad de la empresa, como plantas de producción, vehículos de la flota propia y procesos industriales (p.29).
- **Alcance 2.** Son aquellas liberadas como resultado de la generación de electricidad, calor o vapor comprados por la organización. Esto incluye las emisiones asociadas

con la producción de energía utilizada por la empresa, como las provenientes de plantas de generación de electricidad externas a la organización (p.29).

- **Alcance 3.** Abarcan todas las demás emisiones indirectas que ocurren como resultado de las actividades de la organización, pero que se originan a partir de fuentes que no son propiedad ni están bajo su control directo. Esto incluye las emisiones derivadas de la cadena de suministro de la organización, el uso de productos vendidos, los desplazamientos de empleados y otras actividades externas, como los viajes de negocios y el tratamiento de residuos (p.29).

Figura 3

Emisiones de alcance 1, 2 y 3



Nota. Tomado de "Emisiones de sostenibilidad alcance 1, 2 y 3", por Grant Thornton Argentina, 2023, Grant Thornton (<https://n9.cl/nxx2c>).

2.1.5 Modelo de Desarrollo de la Cuádruple Hélice

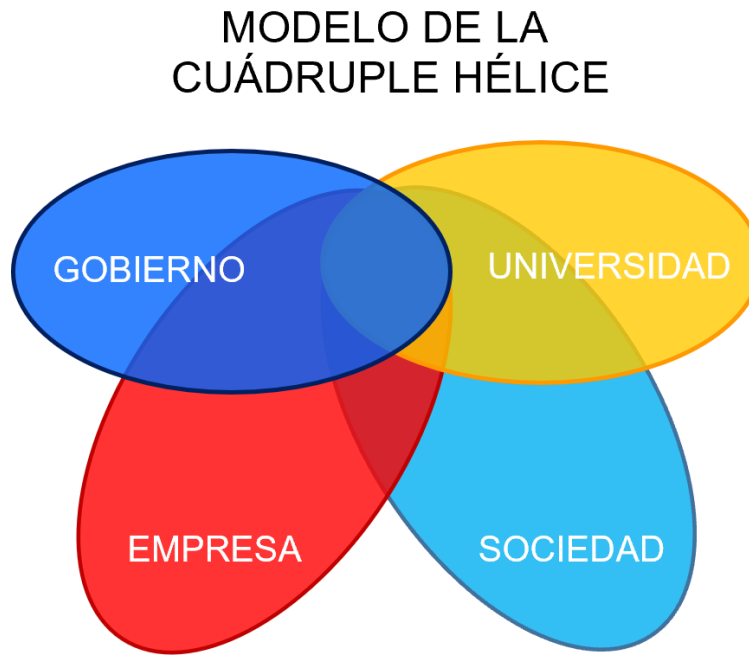
El modelo de desarrollo económico de la Cuádruple Hélice es un enfoque colaborativo que involucra a los actores clave de la sociedad, incluyendo a la academia, la industria, el gobierno y la sociedad civil, en la promoción de la innovación y el crecimiento socioeconómico sostenible (Etzkowitz & Leydesdorff, 2000). En este modelo, se reconoce que la generación de conocimiento, la transferencia tecnológica, la creación de empresas y el bienestar social son impulsados por la interacción y la cooperación entre estos cuatro elementos.

La Cuádruple Hélice amplía el concepto original de la Triple Hélice, que se centraba en la colaboración entre universidades, industria y gobierno, al incorporar la participación activa de la sociedad civil (Carayannis & Campbell, 2010). La inclusión de la sociedad civil como un actor fundamental en el proceso de desarrollo económico reconoce su capacidad para aportar perspectivas éticas, sociales y ambientales, así como para impulsar la co-creación de políticas y soluciones innovadoras.

Este modelo se basa en la premisa de que la colaboración entre los diferentes actores de la sociedad, en lugar de actuar de forma aislada, puede generar resultados más efectivos y sostenibles en términos de crecimiento económico, creación de empleo, mejora de la calidad de vida y protección del medio ambiente.

Figura 4

Modelo de desarrollo económico de la cuádruple hélice

**2.2 Marco Legal****2.2.1 Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático**

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés) es un acuerdo internacional adoptado en 1992 con el fin de unir a los países del mundo en la lucha contra el cambio climático. Su objetivo principal es proporcionar un marco para que los países cooperen en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y en la adaptación a los impactos del cambio climático. Además, la UNFCCC promueve la transferencia de tecnología y el apoyo financiero a los países en desarrollo para que puedan abordar estos desafíos de manera efectiva (UNFCCC, 1992).

2.2.2 Conferencia de las Partes

La Conferencia de las Partes (COP) es una reunión anual donde los países que son parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) se reúnen para discutir y tomar decisiones sobre cómo abordar el cambio climático a nivel mundial. En la COP, los países negocian acuerdos, establecen metas y políticas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y adaptarse a los impactos del cambio climático. Es un foro importante donde se debaten temas clave relacionados con el clima y se toman medidas concretas para proteger el medio ambiente y la sociedad (UNFCCC, s.f.).

Durante la conferencia que tuvo lugar en Glasgow, Colombia se hizo notable por su participación activa al presentar soluciones innovadoras y establecer metas ambiciosas para abordar el cambio climático. Entre los logros destacados se encuentra el lanzamiento de la Estrategia Climática de largo plazo E2050, que establece una guía detallada para un desarrollo que genere bajas emisiones de gases de efecto invernadero. Esta estrategia tiene como objetivo reducir las emisiones de gases efecto invernadero en un 51 % para el año 2030 y alcanzar la neutralidad de carbono en el año 2050.

2.2.3 Acuerdo de París

El Acuerdo de París es un tratado internacional adoptado en 2015 durante la COP21 de la UNFCCC, donde los países se comprometen a tomar medidas para limitar el calentamiento global a menos de 2 grados Celsius, con esfuerzos adicionales para limitarlo a 1.5 grados Celsius. El acuerdo incluye compromisos de reducción de emisiones y medidas de adaptación al cambio climático (UNFCCC, 2015). Colombia, como signatario del acuerdo, se ha comprometido a

contribuir a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la adaptación a los impactos del cambio climático. El Acuerdo de París proporciona un marco internacional para la cooperación y el intercambio de conocimientos entre países, mientras que Colombia, a nivel nacional, busca avanzar hacia un desarrollo sostenible y bajo en carbono, protegiendo al mismo tiempo su biodiversidad y recursos naturales.

2.2.4 Normatividad Colombiana

En la Tabla 1 se dan a conocer la legislación por la cual se reglamenta el presente proyecto.

Tabla 1

Normatividad Colombiana

Nombre	Fecha	Descripción
Ley 1931, Ley del Cambio Climático	27 julio de 2018	Por la cual se establecen las directrices para la gestión del cambio, principalmente, en las acciones de adaptación al cambio climático, así como en mitigación de gases efecto invernadero, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la población y de los ecosistemas del país y promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y un desarrollo bajo en carbono. Asimismo, la ley establece el Sistema Nacional de Cambio Climático y los instrumentos con los que se contará para la gestión del cambio climático en el país. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)
Resolución 40807	02 agosto de 2018	Por medio de la cual se adopta el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático del sector minero-energético (PIGCCSm-e). (Ministerio de Minas y Energía, 2018)
Estrategia de Largo Plazo de Colombia (E2050)	18 de junio de 2020	La Estrategia 2050 es un instrumento de política de Estado que orienta las acciones nacionales, sectoriales y territoriales para construir un futuro resiliente al clima en Colombia, al tiempo que constituye un ejercicio de planificación de largo plazo que demuestra el compromiso

		internacional del País para contribuir con el logro de los objetivos globales plasmados en el Acuerdo de París. (Gobierno de Colombia, 2021)
Ley 2169, Ley de Acción Climática	22 de diciembre de 2021	Ley por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono neutralidad y resiliencia climática y se dictan otras disposiciones. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021)

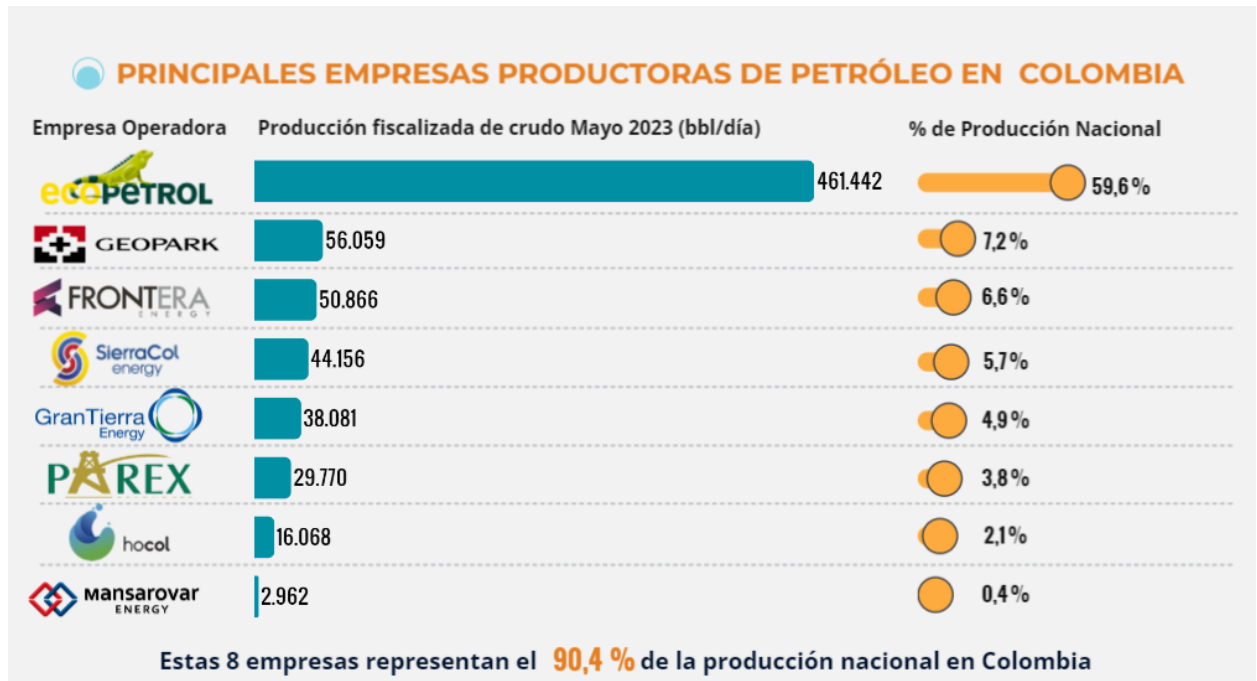
3. Panorama Actual de la Huella de Carbono en la Industria Petrolera Colombiana

3.1 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y Huella de Carbono Generadas por la Industria

En la búsqueda de una industria petrolera más sostenible y consciente del impacto ambiental, es fundamental analizar el panorama actual de la huella de carbono en Colombia. En este contexto, se ha realizado una investigación que se enfoca en las ocho empresas que lideran la producción de crudo en el país. Este estudio ha permitido extraer datos relevantes sobre la huella de carbono asociada a sus operaciones. Estos datos son cruciales para calcular la intensidad de carbono en la industria petrolera colombiana, lo que proporciona una visión detallada del impacto ambiental de esta actividad en el país.

Figura 5

Principales empresas productoras de petróleo en Colombia











Nota. Datos tomados de *Agencia Nacional de Hidrocarburos. Estadísticas de Producción 2023.*

Estas empresas petroleras en Colombia emiten informes de sostenibilidad cada año para ser transparentes sobre sus operaciones y sus impactos en el medio ambiente, la sociedad y la economía. Esto incluye un recuento de sus emisiones de CO₂, huella de carbono y su intensidad de carbono, ya que estos datos les permiten a las empresas mostrar su compromiso con la reducción de su huella de carbono y contribuir a la lucha contra el calentamiento global. A continuación, se presenta en la Figura 6 el resumen de la huella de carbono e intensidad de carbono de cada empresa petrolera.

Figura 6

Huella e intensidad de carbono de las empresas petroleras en Colombia

Empresa	Huella de Carbono [tCO ₂ eq]	Intensidad de Carbono [kgCO ₂ e/boe]
 ecopETROL	13.726.096	41,5
 GEOPARK	235.705	10,9
 FRONTERA ENERGY	476.095	30
 SierraCol energy	391.000	21,6
 GranTierra Energy	390.061	33
 PAR REX RESOURCES INC	180.771	19
 hocol	271.000	37,4
 mansarovar ENERGY	11.808	10

Nota. Los datos correspondientes a la huella de carbono se derivan del valor bruto reportado por las empresas en cuanto a emisiones de Alcance 1 y 2. Datos tomados de los *Informes de Sostenibilidad 2022 de cada empresa.*

Ecopetrol tiene la huella de carbono más alta entre las empresas petroleras de Colombia, con una diferencia significativa, alcanzando 13,726,096 tCO₂eq, y también la mayor intensidad de carbono con 41.5 kgCO₂e/boe. Esto se debe en gran parte a que la empresa es responsable de casi el 60% de la producción de petróleo del país, lo que explica sus elevados valores de intensidad de

carbono. Sin embargo, Ecopetrol ha sido pionera en establecer metas ambiciosas alineadas con los objetivos de cambio climático para reducir sus emisiones:

La empresa está implementando un plan de descarbonización que incluye la actualización continua de su inventario de gases de efecto invernadero, la implementación de un portafolio de reducción de emisiones, la definición de una hoja de ruta para alcanzar el objetivo de cero emisiones netas, y el diseño y ejecución de un portafolio de compensación a través de Soluciones Naturales del Clima, entre otras acciones. (Ecopetrol, 2021)

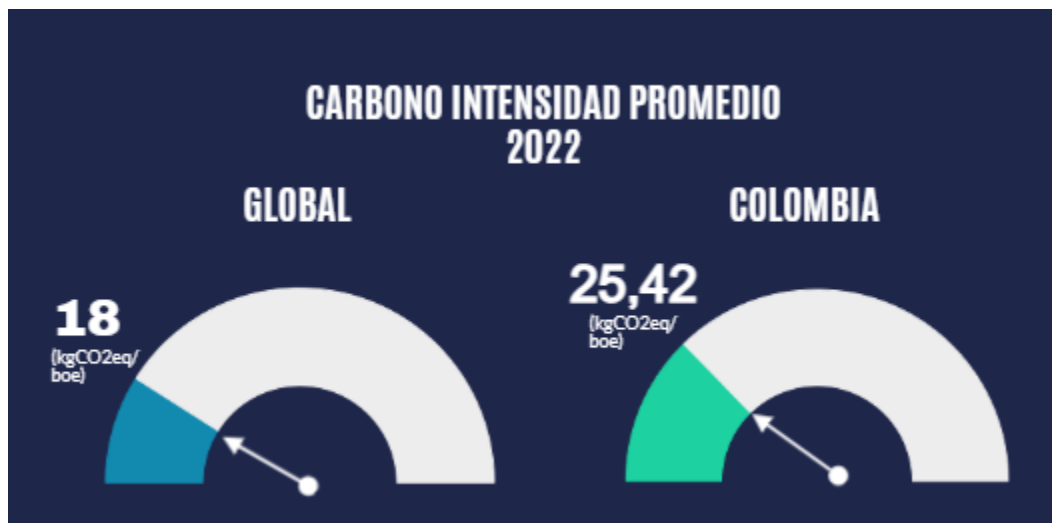
Por otro lado, se observa que las empresas Frontera Energy, Gran Tierra Energy y Hocol exhiben una intensidad de carbono ligeramente elevada, a pesar de que su producción de crudo representa menos del 8% del total nacional. Esto sugiere que la cantidad de barriles producidos por estas empresas está generando una huella de carbono mayor de lo esperado. Aunque la producción de estas empresas es considerablemente menor que la de Ecopetrol, su intensidad de carbono se asemeja notablemente a la de esta última.

Es destacable que GeoPark, la segunda mayor productora de crudo en Colombia, mantenga una intensidad de solo 10.9 kgCO_{2e}/boe. La empresa ha implementado una estrategia integral para reducir sus emisiones y huella de carbono, enfocándose en la eficiencia energética, el uso de energías renovables, la reducción de la quema de gas, y programas de reforestación y conservación. Además, GeoPark monitorea y reporta sus emisiones y promueve la educación y sensibilización ambiental entre sus empleados y las comunidades locales.

Para conocer el panorama actual de la huella de carbono de la industria petrolera en Colombia, se utilizaron datos de intensidad de carbono de las 8 empresas para calcular un promedio nacional. Este promedio se comparó con la intensidad promedio global, revelando que Colombia está desfazada por más de 7 puntos respecto a la línea base mundial. Esto subraya la necesidad de que Colombia y las empresas que operan en el país se mantengan comprometidas con la reducción de su huella de carbono y la adopción de prácticas sostenibles, para así alinearse con los objetivos globales en términos de intensidad de carbono.

Figura 7

Carbono intensidad promedio global y nacional 2022



Nota. El gráfico corresponde a los valores de intensidad de carbono a nivel mundial y nacional del año 2022. Dato de emisión global tomado de Emissions Monitoring Report 2023 (pag 53), por *The North Sea Transition Authority*.

Organizaciones como la Iniciativa Climática de la Industria Petrolera y del Gas (OGCI, por sus siglas en inglés), una alianza formada por algunas de las principales empresas energéticas del mundo, tienen como objetivo común combatir el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Para 2025, la OGCI se ha propuesto reducir la intensidad de carbono a 17 kgCO₂/boe, enfocándose en áreas clave como la eficiencia energética, la captura y almacenamiento de carbono (CAC), la reducción de emisiones de metano y la transición hacia energías renovables. Es fundamental que Colombia y las empresas que operan en el país implementen estrategias sostenibles para reducir su huella de carbono y, con ello, su intensidad de carbono, a fin de cumplir con los compromisos nacionales en materia de cambio climático.

3.2 Fuentes Principales que Generan Huella de Carbono en la Industria de los Hidrocarburos

En la industria de los hidrocarburos, se generan emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que contribuyen a la huella de carbono del sector en diversas etapas de la cadena productiva. Nos centraremos en la exploración y producción, donde se emiten gases como dióxido de carbono, metano y óxido nitroso. Estas emisiones provienen con mayor frecuencia de actividades como venteos operativos o de seguridad, quema de gas en teas, pérdidas por descargas, fugas accidentales en pozos o líneas de transporte, entre otras.

En 2021, el American Petroleum Institute (API) publicó un compendio sobre las emisiones de gases de efecto invernadero en la industria del petróleo y gas. Este documento detalla las diversas fuentes de emisión durante las etapas de producción y exploración, como se ilustra en la Figura 8.

Figura 8

Fuentes potenciales de emisión de gases de efecto invernadero en producción y exploración

EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN	CO₂	N₂O	CH₄
FUENTES DE COMBUSTIÓN (Dispositivos estacionarios)			
Calderas/Generadores de vapor	X	X	X
Deshidratadores	X	X	X
Calentadores/tratadores	X	X	X
Generadores de energía de combustión interna (IC)	X	X	X
Bombas contra incendios	X	X	X
Controladores de compresores alternos	X	X	X
Generadores electricos de turbina	X	X	X
Compresores centrifugos	X	X	X
FUENTES DE COMBUSTIÓN (Fuentes Móviles)			
Vehiculos de la empresa	X	X	X
Aviones/helicopteros	X	X	X
ELIMINACIÓN DE GASES RESIDUALES			
Teas	X	X	X
Incineradores	X	X	X
FUENTES VENTILADAS (Proceso de venteos)			
Procesos de Deshidratación			X
Bombas deshidratadoras Kimray			X
Procesos de endulzamiento de gases	X		X
Tanques de almacenamiento y recipientes de drenaje	X(*)		X
Dispositivos neumáticos	X(*)		X
Bombas de inyección de químicos	X(*)		X
Muestreo y análisis de gases	X(*)		X
FUENTES VENTILADAS (Mantenimiento/Reparaciones)			
Desgasificación de lodos	X(*)		X
Revestimiento de pozo de gas a baja presión	X(*)		X
Purga de compresores	X(*)		X
Arranque del compresor	X(*)		X
Recopilación de purgas de oleoductos	X(*)		X
Purga de buques	X(*)		X
Reacondicionamientos a pozos	X(*)		X
Desconexión de pozos	X(*)		X
FUENTES VENTILADAS (Actividades no rutinarias)			
Apagado de emergencia/Purga de seguridad	X(*)		X
Válvula de alivio de presión (PRV)	X(*)		X
Reventones de pozo (cuando no estan acampanados)	X(*)		X
Supresión de incendios			
FUENTES FUGITIVAS			
Fugas en componentes del equipo	X(*)		X
Tratamiento de aguas residuales	X		X
Aire acondicionado/Refrigeración			
FUENTES INDIRECTAS			
Importaciones de electricidad	X	X	X
Importaciones de calor/vapor de proceso	X	X	X
Cogeneración	X	X	X
* Se proporciona un enfoque de estimación de emisiones, pero solo se aplica a flujos de producción ricos en CO2 (por ejemplo, inyección de CO2, recuperacion mejorada de petróleo). La importancia de estas fuentes depende del CO2, la concentración y la tasa de emisión específica de la fuente.			

Nota. Adaptado de *Compendium of Greenhouse Gas Emissions Methodologies for the Natural Gas and Oil Industry*, (pag 2-9) por American Petroleum Institute, 2021.

4. Iniciativas o Casos de Éxito a Nivel Mundial en la Reducción de la Huella de Carbono

En un mundo cada vez más consciente de los efectos del cambio climático, la reducción de la huella de carbono se ha convertido en una prioridad global. Diversos países y empresas del sector petrolero alrededor del mundo han implementado iniciativas innovadoras y exitosas para disminuir sus emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a la lucha contra el calentamiento global. Estos esfuerzos no solo buscan mitigar el impacto ambiental, sino también fomentar el desarrollo sostenible y mejorar la calidad de vida de las comunidades.

Colombia, un país con una biodiversidad extraordinaria y un compromiso creciente con la sostenibilidad, se encuentra en una posición ideal para aprender de estas experiencias globales. Adaptar y adoptar prácticas efectivas de otras naciones puede ayudar a Colombia a avanzar en su propio camino hacia la reducción de la huella de carbono. En este contexto, exploraremos algunas de las iniciativas más destacadas y exitosas a nivel mundial, identificando aquellas que pueden ser aplicadas de manera efectiva en Colombia, para contribuir a un futuro más limpio y sostenible.

La Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) ha identificado cinco pilares clave que deben abordarse de manera integral y coordinada para lograr el objetivo de

emisiones netas cero para el año 2050, según su informe especial "Emissions from Oil and Gas Operations in Net Zero Transitions" publicado en 2023. Estos pilares incluyen la reducción de las emisiones de metano, la eliminación de todas las quemas no relacionadas con emergencias, la electrificación de las instalaciones utilizando fuentes de energía de bajas emisiones, la adopción de tecnologías CCUS en los procesos de petróleo y gas, la expansión del uso de hidrógeno verde, y la implementación de estrategias de eficiencia energética para reducir aún más las emisiones.

Con el objetivo de proponer iniciativas o casos de éxito para reducir la huella de carbono y alcanzar los compromisos planteados por Colombia en la COP 26, nos centraremos en presentar soluciones fundamentadas en los cinco pilares propuestos por la Agencia Internacional de Energía (IEA). Estas soluciones no solo apoyarán la descarbonización de sectores clave como la industria petrolera colombiana, sino que también contribuirán al cumplimiento de las metas internacionales de mitigación del cambio climático.

4.1 Reducción de Metano

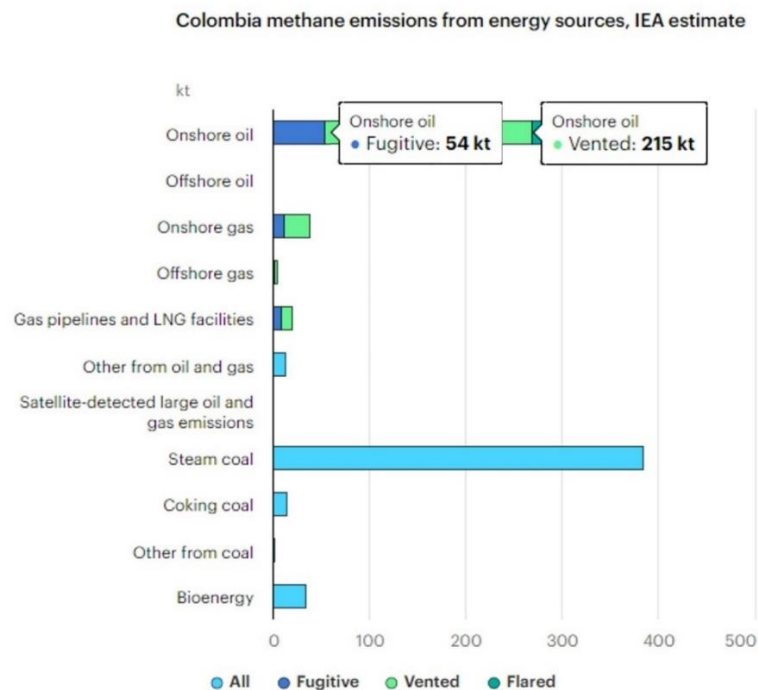
El metano ha sido responsable de aproximadamente el 30% del incremento de la temperatura global desde la Revolución Industrial. Una reducción rápida y sostenida de las emisiones de metano es crucial para limitar el calentamiento a corto plazo y mejorar la calidad del aire. Se estima que la industria del petróleo y el gas es responsable de 80 millones de toneladas (Mt) de emisiones de metano, lo que equivale a 2,4 gigatoneladas (Gt) de CO₂ equivalente (IEA I. E., 2023).

Afortunadamente, existen numerosas tecnologías y medidas bien establecidas para reducir las emisiones de metano en las operaciones industriales. En el Escenario de Emisiones Netas Cero (NZE), se proyecta que estas emisiones disminuirán en más de 60 Mt, lo que representa una reducción del 75%, para el año 2030. Esta disminución significativa es fundamental no solo para mitigar el impacto del cambio climático, sino también para promover un ambiente más limpio y saludable (IEA I. E., 2023).

Según una estimación de la Agencia Internacional de Energía (IEA), los valores de emisión de metano en la sección de producción de crudo en Colombia, que se muestran en la Figura 9, revelan que la mayor parte de estas emisiones proviene de emisiones venteadas.

Figura 9

Estimación de Emisiones de Metano en la Producción de Petróleo en Colombia

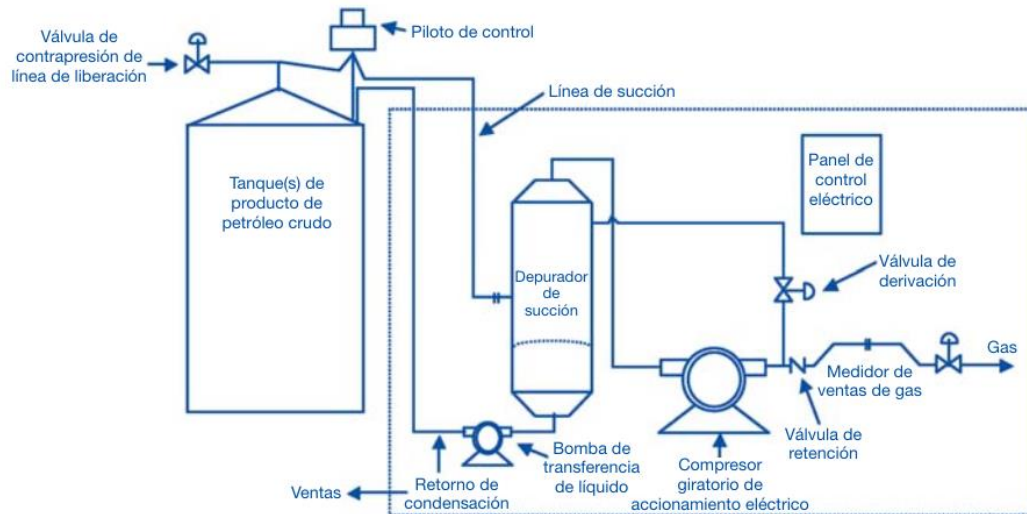


Nota. Los datos mostrados en la figura corresponden a una estimación realizada por la IEA con el fin de conciliar la información existente y producir un conjunto coherente de estimaciones a nivel de país. Tomado de *Methane tracker data explorer*, por International Energy Agency, 2024, IEA.

4.1.1 Unidades de Recuperación de Vapor (VRU)

Las Unidades de Recuperación de Vapores (VRU, por sus siglas en inglés) son sistemas diseñados para capturar vapores de hidrocarburos que se liberan durante el almacenamiento y la manipulación de petróleo crudo, condensados y otros líquidos volátiles en la industria. Mientras el petróleo se almacena, los hidrocarburos livianos, como el metano y otros compuestos orgánicos volátiles (VOC), comienzan a evaporarse. Este proceso también incluye la evaporación de gas natural licuado, contaminantes peligrosos del aire (HAP) y algunos gases inertes. Estos vapores se acumulan en el espacio entre el líquido y el techo fijo del tanque. Cuando el nivel del líquido dentro del tanque cambia, es común que estos vapores se liberen a la atmósfera (EPA, 2022).

Una forma efectiva de evitar las emisiones de estos gases y lograr un ahorro económico significativo es la instalación de unidades de recuperación de vapores en los tanques de almacenamiento de petróleo. Este sistema es relativamente simple y puede capturar aproximadamente el 95 % de los vapores con alto poder calorífico (Btu), los cuales pueden ser vendidos o utilizados in situ como combustible. Este enfoque no solo reduce las emisiones de gases contaminantes, sino que también optimiza el uso de los recursos energéticos, promoviendo prácticas más sostenibles en la industria (Natural Gas STAR & EPA, 2003).

Figura 10*Sistema de Recuperación de Vapores del Tanque de Petróleo/Condensados*

Nota. La figura muestra una VRU conectada a un tanque de almacenamiento de petróleo crudo. Adaptado de *Installing Vapor Recovery Units on Crude Oil Storage Tanks* (p.3), por Natural Gas STAR & Environmental Protection Agency, 2003.

Adicionalmente, los dispositivos neumáticos utilizados en todos los sitios de producción e instalaciones de compresión para controlar y operar válvulas y bombas mediante cambios de presión liberan pequeñas cantidades de gas como parte de su funcionamiento. Este gas contiene metano, que, aunque en pequeñas cantidades por acción individual, al sumarse todas las veces que se accionan a lo largo del día y durante todo el año, el impacto es significativo. De hecho, un estudio realizado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) en 2022 para determinar las emisiones de metano por fuente en la industria del petróleo y gas reflejó que el 24% de estas emisiones provienen de los dispositivos neumáticos. Esto demuestra que estas pequeñas fugas tienen un impacto considerable (EPA, 2022).

Por esta razón, es recomendable implementar dispositivos de Recuperación de Vapores (VRU) para recolectar estos gases. Una vez recolectados, estos gases pueden venderse, utilizarse en otros procesos o enviarse a las teas para su quema controlada. Esta medida no solo ayuda a reducir las emisiones de metano, sino que también puede generar beneficios económicos adicionales para las instalaciones.

4.1.2 Reemplazar Sistema de Antorchas

En algunas regiones de Colombia, aún se sigue venteando el gas producido porque sobrepasa la capacidad de los gasoductos o porque no se cuenta con la infraestructura adecuada para su transporte. La práctica de ventear el gas o quemarlo con antorchas ineficientes contribuye a la liberación de metano sin quemar a la atmósfera. Estas emisiones no controladas no solo aportan al cambio climático, sino que también representan una pérdida de recursos energéticos valiosos. Utilizar antorchas modernas y eficientes pueden minimizar estas emisiones al asegurar una combustión más completa del metano, convirtiéndolo en CO₂, que, aunque sigue siendo un gas de efecto invernadero, es menos perjudicial a corto plazo que el metano.

Las antorchas eficientes son clave en la industria petrolera para mitigar impactos ambientales y mejorar la eficiencia energética. Tecnologías como las antorchas de combustión asistida por aire, de vaporización y combustión, y de baja emisión (Low-NO_x) son algunas opciones avanzadas disponibles en el mercado. Estas soluciones no solo reducen las emisiones de gases contaminantes, sino que también optimizan el uso de recursos energéticos.

Flare IQ de Baker Hughes representa un avance notable en la optimización del rendimiento de las antorchas mediante tecnología innovadora. Utiliza sensores avanzados y análisis en tiempo real para medir el flujo de gases de antorcha mediante ultrasonido. Este sistema optimiza la combustión ajustando críticamente parámetros como temperatura, presión, velocidad de gases y composición del gas. Esto asegura una eficiencia de combustión superior al 98% al controlar los niveles de gas combustible, vapor y aire asistido, reduciendo el deslizamiento de metano y otros compuestos orgánicos volátiles (Baker Hughes , 2021).

BP ha implementado con éxito Flare.IQ para medir con precisión las emisiones de metano de sus antorchas en diversas regiones. Esta tecnología permite intervenciones tempranas para reducir las emisiones, apoyando los objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones de la empresa (Baker Hughes , 2021).

Existen diversas tecnologías en el mercado, como Flare IQ, que están diseñadas para mejorar la eficiencia de la quema de gas y para reducir las emisiones de metano. Sin embargo, es importante considerar que, antes de implementar estas tecnologías, es recomendable reemplazar las antorchas antiguas e ineficientes, esto asegurará que se obtengan mejores resultados de reducción de metano y al mismo tiempo de una quema efectiva.

4.2 Eficiencia Energética

La eficiencia energética, se ha convertido en un pilar fundamental para lograr la sostenibilidad y reducir la huella de carbono en la industria petrolera. Consiste en usar la energía de manera más eficiente, para hacer las mismas actividades, pero con menos consumo. Esto

significa implementar tecnologías y mejorar los procesos para emitir menos gases de efecto invernadero. Al implementar estos cambios, las empresas petroleras no solo aportan a los objetivos de cambio climático, sino que también pueden ser más competitivas y ahorrar en costos.

4.2.1 Softwares de Eficiencia Energética

Las herramientas digitales y la inteligencia artificial se han convertido en parte integral de nuestra vida diaria, simplificándonos numerosas tareas. De igual manera, la industria de hidrocarburos puede aprovechar estas tecnologías para optimizar sus procesos, generando un ahorro energético y reduciendo significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero. Implementar estas innovaciones no solo mejora la eficiencia, sino que también contribuye a un futuro más sostenible para todos.

Un ejemplo destacado es el software Emissions.AI de ERM International Group. Esta solución digital proporciona a los equipos operativos información valiosa sobre los factores que impulsan el consumo excesivo de energía y las emisiones ocultas en plantas y procesos. Emissions.AI crea un gemelo digital de energía y emisiones para sus instalaciones, combinando una profunda experiencia en ingeniería y análisis avanzados con técnicas de inteligencia artificial de última generación. El software aprende del desempeño histórico de energía y emisiones, adaptándose a diversas variables dinámicas como modos de operación, cambios en los parámetros del proceso, eficiencia y degradación de equipos, y objetivos de producción. Su interfaz fácil de usar permite a los equipos monitorear el rendimiento energético y de emisiones en tiempo real, y realizar experimentos para optimizar configuraciones de planta, identificando oportunidades de mejora (ERM, 2020).

En 2020, la empresa petrolera Canadian Natural implementó este software innovador en sus instalaciones, logrando reducir sus emisiones de CO₂ en más de 7,000 teCO₂/año (North Sea Transition Authority, 2019). Este software no solo permite medir, monitorear y visualizar los datos completos de emisiones hasta la fuente de emisión, sino que también aumenta la conciencia sobre el impacto ambiental de las configuraciones operativas. Como resultado, los equipos pueden centrarse de manera más efectiva en gestionar y reducir las emisiones, promoviendo una operación más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

4.2.2 Programas de Gestión de Energía

Es fundamental comprender que la gestión energética nos permite ahorrar energía al hacer un uso más eficiente de los recursos y eliminar desperdicios a lo largo de toda la cadena de valor en la industria petrolera. Las grandes empresas del sector continúan invirtiendo importantes recursos en la búsqueda de mayores ahorros energéticos. Muchas de estas empresas han decidido implementar programas de gestión de energía, con el objetivo de mejorar sus operaciones diarias, lograr una mayor eficiencia y reducir sus emisiones.

Desde 1970, Petrobras ha implementado su Programa de Conservación de Energía, estableciendo objetivos claros para el uso eficiente de la energía en todas sus áreas. Este programa tiene como meta principal reducir el consumo de energía y disminuir el uso de combustibles fósiles. El enfoque del programa incluye la actualización de procedimientos operativos, la optimización de la distribución de energía y vapor generados, la prevención de fugas y derrames, y la instalación de calderas de recuperación de calor y sistemas de precalentamiento de aire. Todo

esto es posible gracias a la concientización y cooperación de sus empleados, quienes juegan un papel fundamental en la implementación de estas medidas (IPIECA, 2007).

Petrobras estima que, en los 32 años de existencia del programa, ha logrado un ahorro energético de 13 mega toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe) y ha reducido las emisiones en 42 millones de toneladas de CO₂. Este éxito refleja el compromiso de la empresa con la sostenibilidad y la eficiencia energética, beneficiando tanto al medio ambiente como a la comunidad (IPIECA, 2007).

En el año 2000, ExxonMobil lanzó su innovador programa de gestión de energía para plantas químicas y refinerías, conocido como el Sistema de Gestión Energética Global (GEMS). Este programa se diseñó con el objetivo principal de mejorar la eficiencia energética, utilizando una metodología simple de tres pasos. Primero, se enfoca en operar las instalaciones de la manera más óptima y eficiente posible mediante la aplicación de mejores prácticas. Segundo, identifica oportunidades de inversión económica basadas en un análisis optimizado. Finalmente, implementa sistemas sólidos de gestión que proporcionan la disciplina y el rigor necesarios para impulsar mejoras continuas (IPIECA, 2007).

Para 2006, ExxonMobil estimó que, gracias a la implementación de GEMS, había logrado ahorros energéticos de aproximadamente 750 millones de dólares. Además, la reducción de emisiones de CO₂ alcanzó alrededor de 8 millones de toneladas. Este es un claro ejemplo de cómo los programas de gestión energética, centrados en la eficiencia, pueden tener un impacto favorable tanto en términos económicos como ambientales (IPIECA, 2007).

4.3 Hidrogeno

En los últimos años, el hidrógeno ha ganado popularidad debido a su versatilidad y, principalmente, a su papel como vector energético. Aunque no es una fuente primaria de energía, el hidrógeno almacena y transporta energía obtenida de otras fuentes. La ventaja más destacada es que no genera emisiones de CO₂, ya que al quemarse solo libera agua. Esto lo convierte en una opción de energía limpia y atractiva para muchas industrias que buscan reducir su huella de carbono. Existen varios tipos de hidrógeno según su fuente de obtención:

- **Hidrógeno verde.** Se obtiene mediante un proceso de electrólisis que usa únicamente agua y electricidad proveniente de fuentes renovables. De este proceso resulta en una energía completamente limpia.
- **Hidrógeno azul.** Se produce a partir del gas natural, que se mezcla con vapor de agua a altas temperaturas. El proceso genera hidrógeno y dióxido de carbono, pero el CO₂ se captura y almacena en lugar de liberarse a la atmósfera, reduciendo así su huella de carbono.
- **Hidrógeno gris.** Es el tipo de hidrógeno más producido y utilizado actualmente. Proviene del gas natural mediante un proceso llamado reformado con vapor, donde se mezcla el gas natural con vapor de agua a altas temperaturas. A diferencia del hidrógeno azul, las emisiones de este proceso se liberan directamente a la atmósfera, contribuyendo significativamente a los gases de efecto invernadero. Aunque su producción es más económica, no es viable ambientalmente debido a su alta huella de carbono.

La industria petrolera tiene la oportunidad de reducir significativamente su huella de carbono mediante la implementación del hidrógeno. Esto se puede lograr de dos maneras principales: utilizando gas natural para producir hidrógeno azul con captura y almacenamiento de carbono (CAC), y empleando energías renovables para generar hidrógeno verde.

El hidrógeno tiene grandes ventajas, pero también presenta desafíos. Al ser una molécula tan ligera, su almacenamiento y transporte son complicados y costosos. Producir hidrógeno verde o azul sigue siendo más caro que el hidrógeno gris, lo que lo hace menos atractivo desde un punto de vista económico. Sin embargo, muchas empresas petroleras están innovando y trabajando arduamente para superar estos obstáculos y llevar a cabo proyectos de hidrógeno en sus instalaciones, demostrando un compromiso con la transición energética y la sostenibilidad.

ExxonMobil está desarrollando una planta a escala mundial para la producción de hidrógeno en su refinería en Baytown, Texas. Se espera que esta planta produzca alrededor de 1000 millones de pies cúbicos diarios de hidrógeno a partir de gas natural. Además, se prevé capturar y almacenar bajo tierra el 98% del CO₂ generado, lo que podría reducir las emisiones de la refinería en un 30% respecto a los niveles actuales (Exxon Mobil, 2023).

Adicionalmente, Exxon Mobil se ha asociado con Zeeco, una empresa líder en el diseño y fabricación de soluciones avanzadas de combustión y medio ambiente, para desarrollar y probar quemadores industriales capaces de funcionar con hasta un 100% de hidrógeno. Se espera que estos quemadores ayuden a reducir significativamente las emisiones mientras facilitan la transición del uso de gas natural al hidrógeno (Exxon Mobil, 2024).

Por otro lado, Shell está invirtiendo en hidrógeno verde y ha iniciado proyectos en Europa, como el Holland Hydrogen I en los Países Bajos, que será la mayor planta de producción de hidrógeno renovable de Europa para el 2025. Esta planta utilizará un electrolizador de 200 MW y energía proveniente de un parque eólico offshore para producir alrededor de 60,000 kg de hidrógeno por día (Shell, 2022). BP también está avanzando en el campo del hidrógeno, con planes para desarrollar instalaciones de hidrógeno azul en el Reino Unido, como el proyecto Teesside, que busca producir aproximadamente 160.000 toneladas de hidrógeno con bajas emisiones de carbono al año y capturará y enviará para su almacenamiento seguro a largo plazo aproximadamente dos millones de toneladas de CO₂ al año (BP, 2023).

En este contexto global, Colombia ha tomado medidas significativas hacia una economía basada en hidrógeno. En 2021, el país publicó su Hoja de Ruta del Hidrógeno, destacando el papel crucial de la industria petrolera en esta transición. Gracias a su infraestructura y experiencia en el manejo de gases, esta industria está en una posición privilegiada para liderar la producción de hidrógeno azul, que se genera a partir del gas natural y la captura de carbono. Además, se espera que las empresas petroleras inviertan en tecnología y proyectos de hidrógeno verde, el cual se produce mediante la electrólisis del agua utilizando energía renovable. Esta diversificación de su matriz energética no solo ayudará a reducir las emisiones de carbono, sino que también permitirá una transición energética más sostenible y competitiva (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

En línea con este enfoque global y nacional, la Agencia Internacional de Energía, en su informe "The Future of Hydrogen," presenta siete recomendaciones clave para expandir el uso del hidrógeno. Estas recomendaciones se detallan a continuación (IEA I., 2019):

- 1. Integrar el hidrógeno en estrategias energéticas a largo plazo:** Es esencial que los gobiernos en todos los niveles, así como las empresas, establezcan objetivos claros para el uso del hidrógeno en sus industrias clave.
- 2. Fomentar la demanda de hidrógeno limpio:** Se necesitan políticas que creen mercados sostenibles para el hidrógeno limpio y que incentiven a los proveedores, distribuidores y usuarios a invertir, lo que, a su vez, podría reducir costos mediante el aumento de las cadenas de suministro.
- 3. Mitigar riesgos de inversión inicial:** Las nuevas aplicaciones del hidrógeno y los proyectos de infraestructura están en etapas muy tempranas y riesgosas. Herramientas financieras como préstamos y garantías pueden ayudar al sector privado a invertir y compartir los riesgos y beneficios.
- 4. Apoyar la I+D para reducir costos:** La investigación y desarrollo son cruciales para mejorar el rendimiento y reducir costos en tecnologías relacionadas con el hidrógeno. Los fondos públicos son vitales para establecer agendas de investigación y atraer capital privado para la innovación.
- 5. Eliminar barreras regulatorias y armonizar normas:** Es importante reducir los obstáculos regulatorios y estandarizar normas a nivel internacional para facilitar el desarrollo de proyectos de hidrógeno. Esto incluye armonizar requisitos en equipos, seguridad y certificación de emisiones.
- 6. Colaborar internacionalmente y monitorear avances:** La cooperación internacional es clave para compartir buenas prácticas y desarrollar infraestructura transfronteriza. Es fundamental realizar un seguimiento y reportar el progreso en la producción y uso del hidrógeno.

- 7. Focalizar en oportunidades clave para la próxima década:** Convertir puertos industriales en centros de hidrógeno con bajas emisiones. Utilizar infraestructura de gas existente para nuevos suministros de hidrógeno limpio. Establecer rutas marítimas para el comercio internacional de hidrógeno.

Es crucial entender que, aunque el hidrógeno por sí solo no puede descarbonizar completamente el sector, ofrece soluciones valiosas en áreas donde otras alternativas son menos efectivas. Por ejemplo, el hidrógeno puede servir como un combustible alternativo que reduce las emisiones al ser quemado. Aunque actualmente no contamos con la infraestructura necesaria para depender exclusivamente del hidrógeno, una solución viable es mezclarlo con gas natural. Esta mezcla puede disminuir considerablemente las emisiones de CO₂, proporcionando una transición más limpia y eficiente hacia un futuro energético sostenible.

4.4 Energías Renovables

Las energías renovables son aquellas que se obtienen de recursos naturales que se regeneran de manera continua y que no se agotan con su uso, como la energía solar, eólica, hidroeléctrica y de biomasa. A diferencia de los combustibles fósiles, que tienen un impacto ambiental significativo y se agotan con el tiempo, las energías renovables ofrecen una alternativa sostenible que contribuye a la reducción de emisiones contaminantes y al cuidado del medio ambiente. Estas fuentes de energía proporcionan una solución efectiva para mitigar el cambio climático y asegurar un suministro energético más limpio y sostenible.

En respuesta al creciente auge de las energías renovables, las compañías petroleras están diversificando sus actividades hacia la electricidad y las energías limpias. Aunque la participación varía entre las empresas, las grandes petroleras están comenzando a posicionarse en el mercado de energías renovables. Están formulando estrategias para capturar una parte de este mercado en expansión, evaluando cuidadosamente el equilibrio entre sus operaciones tradicionales y nuevas inversiones en energía limpia.

La Agencia Internacional de Energía en su informe World Energy Outlook 2023, menciona que la proporción de generación de energía a partir de fuentes eólicas y solares se incrementará significativamente, pasando del 12% actual a cerca del 30% para el año 2030 (IEA I. E., World Energy Outlook 2023, 2023). Este contexto nos lleva a considerar cómo algunas de las principales empresas petroleras están tomando la iniciativa al implementar proyectos de energías renovables, mostrando un camino claro hacia un futuro más sostenible.

BP ha sido pionera en el ámbito de las energías renovables desde 1980, cuando comenzó a invertir en energía eólica y solar (Pickl, 2019). Hoy en día, su filial Lightsource BP se dedica a proyectos solares a gran escala y ha logrado un crecimiento impresionante. En 2023, sus proyectos solares superaron los 60 GW, con activos desarrollados que alcanzaron los 8,8 GW. Esta producción de energía renovable ha generado más de 3,7 teravatio-hora (TWh) y ha contribuido a evitar la emisión de más de 2,3 millones de toneladas de CO₂, lo que equivale a reducir significativamente la huella de carbono a nivel global (BP, 2023).

Por otro lado, Equinor está llevando a cabo el proyecto Hywind Tampen, una innovadora iniciativa para desarrollar un parque eólico flotante en el mar del Norte, cerca de Noruega. Este parque es uno de los primeros en su tipo a gran escala y está diseñado para producir energía renovable destinada a los campos de petróleo y gas cercanos. El proyecto consta de 11 turbinas eólicas, cada una con una capacidad de 8,6 MW. Estas turbinas cubrirán aproximadamente el 35% de la demanda anual de energía de las cinco plataformas en la zona. Además, esta solución contribuirá a reducir el uso de turbinas de gas en los campos marinos y compensará 200.000 toneladas de emisiones de CO₂ y 1.000 toneladas de NO_x al año (Equinor, 2020).

TotalEnergies está firmemente enfocada en impulsar proyectos de energía renovable y en electrificar sus operaciones. Un claro ejemplo de este compromiso es la planta de Al Kharsaah en Qatar, que comenzó a ofrecer energía sostenible, asequible y limpia a partir de 2021. Con una capacidad máxima de 800 MW, se espera que cubra aproximadamente el 10% de la demanda eléctrica de Qatar y contribuya a reducir las emisiones de CO₂ en 26 millones de toneladas a lo largo de su vida útil. Este proyecto subraya el compromiso de TotalEnergies con la reducción de emisiones y expande su presencia en el sector energético (TotalEnergies, 2020).

Muchas otras empresas del sector de hidrocarburos también están invirtiendo en proyectos de energías renovables con el objetivo de electrificar sus operaciones, buscando alternativas más limpias al uso de diésel y así reducir su huella de carbono. La notable disminución en los costos de generación de energía solar y eólica en los últimos años ha hecho que estas fuentes sean cada vez más competitivas frente a las tradicionales. Estas inversiones no solo están satisfaciendo gran parte de la demanda energética de sus operaciones upstream, sino que también están generando

nuevas fuentes de ingresos al vender el exceso de energía a otras empresas. De este modo, las compañías petroleras no solo optimizan sus operaciones, sino que también contribuyen a una transición energética más sostenible, diversificando sus flujos de ingresos y fortaleciendo su posición en un mercado en evolución.

4.5 Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC)

La tecnología de Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC) tuvo sus orígenes en la década de 1970, cuando la industria petrolera comenzó a utilizar dióxido de carbono (CO₂) para inyectarlo en yacimientos de petróleo con el fin de mejorar la recuperación de crudo, en un proceso conocido como recuperación mejorada de petróleo (EOR). Esta técnica permitía extraer más petróleo de los yacimientos agotados al inyectar CO₂, lo que aumentaba la presión y facilitaba la extracción del recurso.

En los últimos años, la tecnología de Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC) ha ganado relevancia por su capacidad para mitigar el cambio climático. Sin embargo, su implementación ha avanzado lentamente, limitando su impacto en la reducción de las emisiones globales de CO₂. La Agencia Internacional de Energía destaca que la CAC es crucial para gestionar las emisiones de CO₂ generadas en el procesamiento del gas natural. Esta necesidad es especialmente importante dado el continuo uso del gas natural en el sistema energético durante las próximas décadas (IEA I. E., Energy Technology Perspectives 2020, 2020).

El proceso de CAC se compone de tres etapas clave: primero, el CO₂, junto con otros gases de combustión, se captura antes de ser liberado a la atmósfera mediante técnicas de absorción química. Luego, el CO₂ capturado se transporta a través de tuberías y se almacena en formaciones geológicas adecuadas, como yacimientos de petróleo o gas agotados, acuíferos salinos profundos, cuencas de carbón no explotadas, o formaciones geológicas permeables situadas a una profundidad mínima de 1,000 metros. Por debajo de esta profundidad, el CO₂ se mantiene en condiciones supercríticas, lo que facilita su almacenamiento seguro y efectivo.

Esta tecnología, aunque prometedora, aún no es una solución completamente confiable para reducir las emisiones de CO₂ a gran escala. Según la IEA (2023) se estima que será necesario eliminar casi 5 gigatoneladas de CO₂ de la atmósfera cada año en la segunda mitad de este siglo para alcanzar los objetivos climáticos, especialmente el de limitar el calentamiento global a 1.5 °C (pp. 17). Sin embargo, las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono enfrentan desafíos significativos, tanto en términos de costos elevados como de incertidumbres sobre su capacidad para operar a la escala requerida.

Uno de los principales desafíos de esta técnica es su uso predominante en la industria petrolera como Método de Recobro Mejorado (EOR). La Agencia Internacional de la Energía (IEA) ha señalado que, aunque esta tecnología tiene el potencial de ser una herramienta eficaz para mitigar las emisiones, su aplicación en el EOR puede comprometer los beneficios climáticos. En lugar de reducir significativamente las emisiones, gran parte del CO₂ capturado se utiliza para extraer más petróleo, lo que, irónicamente, genera más emisiones de carbono al quemarse el petróleo adicional. De hecho, en su informe "Energy Technology Perspectives 2020", la IEA reveló que, hasta esa fecha, el 73% de los proyectos de CAC en operación utilizaban el CO₂

capturado en EOR, en lugar de almacenarlo de manera permanente (IEA I. E., Energy Technology Perspectives 2020, 2020).

Algunos proyectos de CAC han demostrado ser menos efectivos de lo esperado. Un ejemplo es la planta de energía Petra Nova en Texas, un destacado proyecto de CAC en EE.UU. Este proyecto utilizaba un sistema de absorción basado en aminas para capturar el CO₂ de los gases de escape y convertirlo en líquido. El CO₂ capturado se transportaba 130 km al campo petrolero West Ranch, donde se vendía para mejorar la recuperación de petróleo y luego se almacenaba a unos 1500 metros de profundidad. Sin embargo, la planta suspendió sus operaciones en 2020 debido a la caída de los precios del petróleo durante la pandemia de COVID-19. Aunque el proyecto prometía capturar el 90% de las emisiones de CO₂, en realidad solo logró capturar el 17% antes de su cierre (Kristoff, 2022).

Otro ejemplo es el proyecto Gorgon en Australia, un importante yacimiento de gas que comenzó a exportar gas natural licuado (GNL) a Asia en 2016. Para obtener la licencia gubernamental, se exigió a Chevron y sus socios, que implementaran un proyecto de captura y almacenamiento de carbono (CAC) como parte de sus operaciones. Sin embargo, desde que el proyecto de CAC comenzó en 2019, ha enfrentado numerosos desafíos técnicos que han impedido la captura del CO₂ en las cantidades previstas. Como resultado, los operadores se vieron obligados a comprar 5,23 millones de créditos de carbono para compensar las emisiones no capturadas, reflejando las dificultades que ha enfrentado el proyecto en cumplir con sus objetivos ambientales (Zero Carbon Analytics, 2024).

Aunque no todos los proyectos de captura y almacenamiento de carbono (CAC) han sido exitosos, el proyecto de Sleipner destaca como un ejemplo notable en este ámbito. Desde su inicio en 1996, Sleipner se convirtió en el primer proyecto comercial de CAC que empleó una estructura geológica específica para el almacenamiento de CO₂. Con el paso de los años, ha conseguido capturar y almacenar de forma segura grandes cantidades de CO₂, sin que se hayan registrado fugas o impactos negativos en el entorno. Este éxito demuestra que, con la tecnología adecuada y un marco regulatorio sólido, es posible desarrollar soluciones efectivas de CAC que contribuyan a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global (Kristoff, 2022).

Por otra parte, grandes empresas petroleras están apostando por la Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC) como parte de su estrategia para reducir las emisiones de CO₂. Shell, por ejemplo, lidera el proyecto Quest en Canadá, donde captura hasta 1 millón de toneladas de CO₂ al año (Shell, 2021). ExxonMobil maneja el proyecto LaBarge en EE. UU., capturando entre 6 y 7 millones de toneladas anualmente (Exxon Mobil, 2021), mientras que TotalEnergies está desarrollando Northern Lights en Noruega para almacenar CO₂ bajo el Mar del Norte (Total Energies, 2020). Asimismo, BP y Equinor impulsan el proyecto Net Zero Teesside en el Reino Unido, que busca capturar hasta 2 millones de toneladas al año (Net Zero Teesside, 2024).

Uno de los principales desafíos de la CAC es que, aplicada en la industria upstream (exploración y producción de petróleo), se percibe como un método para prolongar el uso de combustibles fósiles, en lugar de facilitar la transición hacia energías limpias, lo que contradice los objetivos de descarbonización de la IEA. Aunque tiene mayor potencial en sectores industriales

pesados como refinerías, acero y cemento, su adopción sigue siendo costosa y compleja. Para que sea viable, los proyectos deben alinearse con las capacidades operativas y financieras de las empresas, o los altos costos seguirán limitando su expansión.

5. Evaluación de la Aplicabilidad de los Casos Estudiados en la Industria Petrolera Colombiana









Con base en los compromisos adquiridos por Colombia en el Acuerdo de París, reafirmados durante la COP26, para reducir en un 51% sus emisiones de gases de efecto invernadero para 2030 y alcanzar la neutralidad de carbono en 2050, se evaluó la aplicabilidad de las iniciativas previamente estudiadas en la industria petrolera del país. El objetivo es contribuir a la reducción de la huella de carbono de este sector y apoyar los compromisos nacionales.

Para realizar una evaluación cualitativa de la viabilidad del proyecto, se emplearon preguntas clave que alinean los criterios del PMA en Colombia con la sostenibilidad y viabilidad en la industria petrolera. Como parte de este análisis, se implementó un cuadro de semáforo que asigna colores según el nivel de viabilidad o riesgo asociado a cada aspecto. Los colores representan lo siguiente: “Verde” indica que el aspecto es muy favorable, sin requerir intervenciones adicionales significativas; “Amarillo” señala aspectos aceptables que necesitan seguimiento o mejoras; “Rojo” refleja aspectos problemáticos que requieren intervenciones significativas para ser viables. En caso de que una pregunta no sea aplicable, no se asignará ningún

color. En las tablas 2,3,4,5,6,7 y 8, se muestra la información destacada de cada una de las iniciativas estudiadas anteriormente y su viabilidad.

Tabla 2

Información iniciativa Unidades de Recuperación de Vapor VRU

	Criterio	Preguntas Clave	Evaluación Cualitativa	Viabilidad
Reducción de Metano: Unidades de Recuperación de Vapor VRU	Viabilidad Técnica	¿El proyecto es técnicamente viable dentro de las capacidades de la empresa?	Sí, la tecnología de VRU es adecuada para la industria petrolera y la mayoría de las empresas del sector tienen la capacidad técnica para implementarla.	
		¿Es aplicable con la infraestructura existente?	Sí, pueden adaptarse a la infraestructura petrolera existente con ajustes menores.	
		¿Son fáciles de adquirir?	Sí, las unidades de recuperación de vapor son comercialmente disponibles a través de múltiples proveedores.	
		¿Pueden darles un segundo uso?	Sí, las VRU son reutilizables. Pueden ser trasladadas y utilizadas en otros campos petroleros si ya no son necesarias en un sitio específico, lo que maximiza su valor a largo plazo.	
	Impacto Ambiental	¿El proyecto contribuye significativamente a la reducción de la huella de carbono?	Sí, las VRU capturan el metano que de otro modo se liberaría a la atmósfera, reduciendo significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero.	
		¿Se mitigarán otros impactos ambientales negativos?	Sí, se puede mejorar la calidad del aire al reducir los compuestos orgánicos volátiles (COV) asociados con la extracción de petróleo.	
		¿Se genera algún tipo de contaminación?	Pueden existir pequeñas emisiones derivadas de la operación del equipo, pero son mínimas en comparación con las emisiones de metano que se previenen.	
	Impacto en el Personal	¿Se requiere aumentar o reducir personal?	Una vez en funcionamiento, el mantenimiento regular requiere una cantidad limitada de personal adicional.	









	¿Es necesario personal calificado?	Sí, se necesita personal calificado para la instalación, operación y mantenimiento de las VRU.	
Costos y Viabilidad Económica	¿El costo del proyecto es viable en relación con los beneficios esperados en la reducción de emisiones?	Aunque la inversión inicial puede ser alta, los beneficios esperados en términos de reducción de emisiones y posibles ingresos por la captura y reutilización del gas capturado hacen que el proyecto sea viable a largo plazo.	
	¿Se generan beneficios económicos a largo plazo?	Los beneficios económicos incluyen la venta del gas capturado o su reutilización para alimentar otros procesos internos.	
Sostenibilidad a Largo Plazo	¿El proyecto es sostenible a largo plazo desde el punto de vista económico, técnico y ambiental?	Se considera que el proyecto es sostenible a largo plazo, ya que permite una reducción continua de emisiones, recuperación de gas valioso, y cumple con las expectativas regulatorias y de sostenibilidad ambiental en la industria.	
Cumplimiento Normativo	¿El proyecto cumple con las regulaciones ambientales y de carbono actuales en Colombia?	Sí, el proyecto está alineado con las normativas ambientales colombianas, que exigen la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y el cumplimiento con estándares de sostenibilidad y responsabilidad ambiental en el sector petrolero.	

Tabla 3

Información iniciativa Reemplazar Sistema de Antorchas

	Criterio	Preguntas Clave	Evaluación Cualitativa	Viabilidad
Reducción de Metano:	Viabilidad Técnica	¿El proyecto es técnicamente viable dentro de las capacidades de la empresa?	La mayoría de las empresas petroleras ya tienen experiencia con el manejo de antorchas, por lo que el proyecto puede implementarse con relativa facilidad dentro de sus capacidades operativas.	

	¿Es aplicable con la infraestructura existente?	Sí, las antorchas más eficientes pueden integrarse a la infraestructura existente, aunque pueden requerirse algunas modificaciones menores	
	¿Son fáciles de adquirir?	La adquisición puede ser relativamente sencilla si se elige el proveedor adecuado.	
	¿Pueden darles un segundo uso?	No es común reutilizar las antorchas después de su ciclo de vida en un campo petrolero.	
Impacto Ambiental	¿El proyecto contribuye significativamente a la reducción de la huella de carbono?	Reemplazar las antorchas menos eficientes por otras más avanzadas y tecnológicamente eficientes puede reducir significativamente las emisiones de metano y otros gases de efecto invernadero, lo que contribuye a la reducción de la huella de carbono de la empresa.	
	¿Se mitigarán otros impactos ambientales negativos?	Pueden minimizar la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV) y partículas.	
	¿Se genera algún tipo de contaminación?	Aunque las antorchas más eficientes minimizan la contaminación en comparación con las tradicionales, aún se generan algunas emisiones de CO2 y otros subproductos de la combustión.	
Impacto en el Personal	¿Se requiere aumentar o reducir personal?	No se requiere un aumento significativo de personal.	
	¿Es necesario personal calificado?	Sí, se necesita personal capacitado para operar y mantener las antorchas más eficientes.	
Costos y Viabilidad Económica	¿El costo del proyecto es viable en relación con los beneficios esperados en la reducción de emisiones?	Aunque los costos iniciales pueden ser elevados, el ahorro a largo plazo en términos de reducción de emisiones y la mejora de la eficiencia energética hacen que el proyecto sea viable.	
	¿Se generan beneficios económicos a largo plazo?	No se tiene certeza sobre eso.	







	Sostenibilidad a Largo Plazo	¿El proyecto es sostenible a largo plazo desde el punto de vista económico, técnico y ambiental?	Desde el punto de vista técnico y ambiental es viable porque reduce emisiones y mejora la eficiencia. En la parte económica no se tiene certeza.	
	Cumplimiento Normativo	¿El proyecto cumple con las regulaciones ambientales y de carbono actuales en Colombia?	Sí, el proyecto está alineado con las regulaciones colombianas que exigen la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y el uso de tecnologías más eficientes en operaciones petroleras.	

Tabla 4

Información iniciativa Softwares de Eficiencia Energética

	Critero	Preguntas Clave	Evaluación Cualitativa	Viabilidad
Eficiencia Energética: Softwares		¿El proyecto es técnicamente viable dentro de las capacidades de la empresa?	Sí, la mayoría de las empresas petroleras cuentan con la infraestructura digital necesaria para implementar software de eficiencia energética.	
	Viabilidad Técnica	¿Es aplicable con la infraestructura existente?	Sí, en general estos softwares están diseñados para integrarse con la infraestructura y los sistemas de monitoreo y control existentes en los campos petroleros.	
		¿Son fáciles de adquirir?	Sí, hay múltiples opciones disponibles en el mercado.	
		¿Pueden darles un segundo uso?	Sí, el software puede ser reutilizado o adaptado para otros proyectos o instalaciones dentro de la empresa, siempre que se mantenga actualizado y compatible con las tecnologías implementadas.	

















Impacto Ambiental	¿El proyecto contribuye significativamente a la reducción de la huella de carbono?	Sí, un software de eficiencia energética puede optimizar el uso de energía, reducir el consumo innecesario, y como resultado, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que contribuye a una reducción de la huella de carbono.	
	¿Se mitigarán otros impactos ambientales negativos?	Indirectamente, sí. Al optimizar el uso de energía, el software puede reducir el uso de combustibles fósiles.	
	¿Se genera algún tipo de contaminación?	No, el software en sí no genera contaminación directa.	
Impacto en el Personal	¿Se requiere aumentar o reducir personal?	Es probable que a largo plazo podría reducir la necesidad de personal operativo al automatizar ciertos procesos.	
	¿Es necesario personal calificado?	La capacitación del personal existente puede ser necesaria.	
Costos y Viabilidad Económica	¿El costo del proyecto es viable en relación con los beneficios esperados en la reducción de emisiones?	Sí, aunque el costo inicial del software puede ser considerable, los beneficios derivados de la reducción del consumo de energía y las emisiones lo hacen económicamente viable a largo plazo.	
	¿Se generan beneficios económicos a largo plazo?	Sí, la optimización del consumo energético reduce los costos operativos y mejora la eficiencia, lo que genera ahorros significativos a largo plazo.	
Sostenibilidad a Largo Plazo	¿El proyecto es sostenible a largo plazo desde el punto de vista económico, técnico y ambiental?	Sí, el software de eficiencia energética es sostenible a largo plazo. La tecnología es adaptable y escalable, y su implementación continuará generando beneficios económicos y ambientales a medida que se optimicen los procesos energéticos.	
Cumplimiento Normativo	¿El proyecto cumple con las regulaciones ambientales y de carbono actuales en Colombia?	Sí, este tipo de proyectos cumple con las regulaciones ambientales y de carbono de Colombia, que fomentan la reducción de emisiones y el uso eficiente de los recursos energéticos en la industria.	

Tabla 5

Información iniciativa Programa de Gestión de Energía

	Criterio	Preguntas Clave	Evaluación Cualitativa	Viabilidad
Eficiencia Energética: Programas de Gestión de Energía	Viabilidad Técnica	¿El proyecto es técnicamente viable dentro de las capacidades de la empresa?	Sí, los programas de gestión de energía suelen ser técnicamente viables dentro de las capacidades de las empresas petroleras.	
		¿Es aplicable con la infraestructura existente?	Sí, los programas de gestión de energía están diseñados para adaptarse a la infraestructura existente.	
		¿Son fáciles de adquirir?	Sí, los programas de gestión de energía están disponibles en el mercado a través de diversas consultorías especializadas y proveedores de soluciones energéticas, que pueden ajustarse a las necesidades específicas del sector petrolero.	
		¿Pueden darles un segundo uso?	Sí, los principios y herramientas de un programa de gestión de energía pueden aplicarse en otras áreas de la empresa o en otros campos, facilitando su reutilización y adaptación a diferentes contextos.	
	Impacto Ambiental	¿El proyecto contribuye significativamente a la reducción de la huella de carbono?	Sí, al optimizar el uso de energía y mejorar la eficiencia operativa, los programas de gestión de energía reducen el consumo energético, lo que disminuye la huella de carbono.	
		¿Se mitigarán otros impactos ambientales negativos?	No se tiene certeza sobre eso.	
		¿Se genera algún tipo de contaminación?	No, los programas de gestión de energía en sí no generan contaminación.	
Impacto en el Personal	¿Se requiere aumentar o reducir personal?	No se requiere aumentar el personal.		














	¿Es necesario personal calificado?	Sí, se requiere personal calificado para implementar y supervisar el programa de gestión de energía.	
Costos y Viabilidad Económica	¿El costo del proyecto es viable en relación con los beneficios esperados en la reducción de emisiones?	Sí, los costos iniciales de implementación suelen verse compensados por los ahorros energéticos a largo plazo y la reducción de emisiones.	
	¿Se generan beneficios económicos a largo plazo?	Sí, los programas de gestión de energía generan beneficios económicos a largo plazo mediante la reducción de los costos operativos y energéticos.	
Sostenibilidad a Largo Plazo	¿El proyecto es sostenible a largo plazo desde el punto de vista económico, técnico y ambiental?	Sí, estos programas son sostenibles a largo plazo ya que mejoran la eficiencia energética, reducen costos y apoyan el cumplimiento de las metas ambientales y de carbono de la empresa.	
Cumplimiento Normativo	¿El proyecto cumple con las regulaciones ambientales y de carbono actuales en Colombia?	Sí, los programas de gestión de energía están alineados con las regulaciones colombianas que promueven la reducción de emisiones de carbono y la mejora de la eficiencia energética en la industria, cumpliendo con las normativas ambientales vigentes.	

Tabla 6

Información iniciativa Hidrógeno






	Criterio	Preguntas Clave	Evaluación Cualitativa	Viabilidad
Hidrógeno	Viabilidad Técnica	¿El proyecto es técnicamente viable dentro de las capacidades de la empresa?	Las capacidades técnicas necesarias para la producción, almacenamiento y utilización de hidrógeno pueden requerir inversiones en nuevas tecnologías y formación técnica, lo cual puede ser un desafío, pero no insuperable si se alinean recursos y capacidades.	

	¿Es aplicable con la infraestructura existente?	La infraestructura actual de los campos petroleros no está diseñada para manejar el hidrógeno, por lo que sería necesario realizar adaptaciones significativas en cuanto a almacenamiento, transporte y uso del hidrógeno. La conversión de infraestructuras existentes sería un proceso costoso y técnico.	
	¿Son fáciles de adquirir?	Las tecnologías de producción y almacenamiento de hidrógeno son accesibles, pero suelen ser costosas y en algunos casos limitadas en su disponibilidad.	
	¿Pueden darles un segundo uso?	No se tiene certeza sobre eso.	
Impacto Ambiental	¿El proyecto contribuye significativamente a la reducción de la huella de carbono?	Sí, si se produce utilizando energías renovables (hidrógeno verde), este proyecto puede reducir significativamente las emisiones de carbono.	
	¿Se mitigarán otros impactos ambientales negativos?	Sí, el uso de hidrógeno verde puede ayudar a reducir otros impactos ambientales, como la contaminación del aire por partículas y la dependencia de recursos fósiles.	
	¿Se genera algún tipo de contaminación?	Si el hidrógeno se produce mediante procesos no renovables como el reformado de gas natural (hidrógeno gris o azul), se generarán emisiones de CO2.	
Impacto en el Personal	¿Se requiere aumentar o reducir personal?	Es probable que se necesite personal adicional o altamente calificado para operar las tecnologías relacionadas con el hidrógeno.	
	¿Es necesario personal calificado?	Sí, el manejo de tecnologías de hidrógeno requiere personal altamente calificado.	

Costos y Viabilidad Económica	¿El costo del proyecto es viable en relación con los beneficios esperados en la reducción de emisiones?	Los costos iniciales pueden ser elevados debido a la infraestructura, las tecnologías y el personal necesario. Sin embargo, los beneficios a largo plazo, en términos de reducción de emisiones y la posible integración del hidrógeno en mercados energéticos emergentes, pueden justificar la inversión si las políticas de carbono continúan favoreciendo las tecnologías limpias.	
	¿Se generan beneficios económicos a largo plazo?	Sí, a largo plazo, la producción y uso de hidrógeno podrían generar beneficios económicos importantes, especialmente si se alinean con incentivos gubernamentales, reducción de impuestos o mercados de carbono.	
Sostenibilidad a Largo Plazo	¿El proyecto es sostenible a largo plazo desde el punto de vista económico, técnico y ambiental?	Sí, siempre que el proyecto utilice fuentes renovables para la producción de hidrógeno (hidrógeno verde), será sostenible ambientalmente. Económicamente, la viabilidad dependerá de la evolución de los precios del hidrógeno y de las políticas energéticas y de carbono. Desde un punto de vista técnico, la sostenibilidad dependerá de la inversión continua en tecnología y mantenimiento.	
Cumplimiento Normativo	¿El proyecto cumple con las regulaciones ambientales y de carbono actuales en Colombia?	Sí, los proyectos de hidrógeno están alineados con las metas de reducción de emisiones de Colombia, que buscan fomentar las energías limpias y cumplir con los compromisos del Acuerdo de París.	

Tabla 7

Información iniciativa Energías Renovables

	Criterion	Key Questions	Qualitative Evaluation	Viability
Energías Renovables		¿El proyecto es técnicamente viable dentro de las capacidades de la empresa?	Sí, muchas empresas petroleras ya están explorando la integración de energías renovables (como solar o eólica) en sus operaciones. Sin embargo, la viabilidad técnica depende de la capacidad de la empresa para integrar estas fuentes con sus operaciones actuales.	
	Viabilidad Técnica	¿Es aplicable con la infraestructura existente?	Aunque las infraestructuras actuales están diseñadas para el uso de combustibles fósiles, las energías renovables pueden integrarse, pero es probable que se necesiten adaptaciones o instalaciones adicionales.	
		¿Son fáciles de adquirir?	Las tecnologías para energías renovables como paneles solares y turbinas eólicas están ampliamente disponibles en el mercado, pero la adquisición de grandes sistemas puede implicar costos iniciales elevados y depender de la ubicación geográfica y los recursos disponibles.	
		¿Pueden darles un segundo uso?	Sí, las infraestructuras de energías renovables, como paneles solares o turbinas eólicas, pueden ser utilizadas en otros campos o proyectos, o incluso vendidas si ya no son necesarias en la operación original.	
	Impacto Ambiental	¿El proyecto contribuye significativamente a la reducción de la huella de carbono?	Sí, la integración de energías renovables reduce directamente las emisiones de carbono al disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, contribuyendo significativamente a la reducción de la huella de carbono de las operaciones petroleras.	
















	¿Se mitigarán otros impactos ambientales negativos?	Sí, además de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, el uso de energías renovables puede reducir la contaminación del aire y la dependencia de recursos no renovables.	
	¿Se genera algún tipo de contaminación?	Durante la operación, las energías renovables no generan contaminación directa. Sin embargo, la fabricación e instalación de los equipos puede generar algunos impactos ambientales.	
Impacto en el Personal	¿Se requiere aumentar o reducir personal?	A largo plazo podría haber una reducción en las necesidades operativas de personal convencional.	
	¿Es necesario personal calificado?	Sí, es necesario capacitar al personal actual en las nuevas tecnologías implementadas.	
Costos y Viabilidad Económica	¿El costo del proyecto es viable en relación con los beneficios esperados en la reducción de emisiones?	A largo plazo, los beneficios derivados de la reducción de emisiones, la mejora de la eficiencia energética y los incentivos gubernamentales compensan el costo inicial elevado del proyecto. Las energías renovables tienden a ser una inversión rentable con el tiempo.	
	¿Se generan beneficios económicos a largo plazo?	Sí, los proyectos de energías renovables suelen generar ahorros operativos considerables a largo plazo, ya que se espera que los costos de energía sean más bajos y estables en comparación con los combustibles fósiles.	
Sostenibilidad a Largo Plazo	¿El proyecto es sostenible a largo plazo desde el punto de vista económico, técnico y ambiental?	Sí, las energías renovables son sostenibles tanto económica como ambientalmente. Una vez instalados, los sistemas de energía renovable tienen bajos costos de operación y mantenimiento, y continúan generando energía limpia durante muchos años.	
Cumplimiento Normativo	¿El proyecto cumple con las regulaciones ambientales y de carbono actuales en Colombia?	Sí, los proyectos de energías renovables cumplen con las normativas ambientales de Colombia, que promueven la reducción de emisiones y la transición hacia fuentes de energía más limpias.	

Tabla 8

Información iniciativa Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC)

	Criterion	Key Questions	Qualitative Evaluation	Viability
Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC)		¿El proyecto es técnicamente viable dentro de las capacidades de la empresa?	Dependerá de la experiencia de la empresa en tecnologías de captura de carbono. La CAC es una tecnología avanzada que puede requerir la integración de nuevos procesos y conocimientos técnicos. Si la empresa cuenta con personal capacitado o puede asociarse con especialistas en CAC, el proyecto es técnicamente viable.	
	Viabilidad Técnica	¿Es aplicable con la infraestructura existente?	En muchos casos, se necesitarían modificaciones o instalaciones adicionales para implementar CAC, como plantas de captura y sistemas de transporte de CO ₂ . La infraestructura existente podría ser adaptada en parte, pero se requerirían inversiones en nueva tecnología.	
		¿Son fáciles de adquirir?	La tecnología de captura y almacenamiento de carbono está disponible, pero puede ser costosa y su implementación aún es relativamente novedosa en muchas partes del mundo.	
		¿Pueden darles un segundo uso?	Las infraestructuras utilizadas para la captura y almacenamiento de carbono podrían tener aplicaciones adicionales, como la inyección de CO ₂ en campos maduros para mejorar la recuperación mejorada de petróleo.	
	Impacto Ambiental	¿El proyecto contribuye significativamente a la reducción de la huella de carbono?	Aunque en teoría el CAC puede contribuir de manera significativa a la reducción de la huella de carbono, hay incertidumbres sobre su verdadera eficacia y la magnitud de su impacto, lo que debe ser considerado en la evaluación de su aplicabilidad.	

	¿Se mitigarán otros impactos ambientales negativos?	No se tiene certeza de eso.	
	¿Se genera algún tipo de contaminación?	El proceso de captura de carbono puede generar algunos residuos o subproductos dependiendo del método utilizado. Además, existe un riesgo ambiental en cuanto al almacenamiento subterráneo de CO ₂ , que debe ser cuidadosamente gestionado para evitar fugas.	
Impacto en el Personal	¿Se requiere aumentar o reducir personal?	El proyecto probablemente requerirá un aumento de personal, particularmente en áreas técnicas especializadas en captura y almacenamiento de carbono	
	¿Es necesario personal calificado?	Sí, se necesita personal calificado con experiencia en tecnologías de captura de carbono.	
Costos y Viabilidad Económica	¿El costo del proyecto es viable en relación con los beneficios esperados en la reducción de emisiones?	El costo de los proyectos de CAC es alto, tanto en la inversión inicial como en los costos operativos. Dado que muchos proyectos en el mundo no han alcanzado las metas de captura propuestas, el costo puede no ser completamente justificable en términos de reducción de emisiones.	
	¿Se generan beneficios económicos a largo plazo?	Los beneficios económicos a largo plazo dependen en gran medida de la capacidad del proyecto, si la captura de CO ₂ no alcanza los niveles proyectados, los beneficios económicos podrían ser menores y el proyecto podría tener dificultades para justificar sus altos costos a largo plazo.	
Sostenibilidad a Largo Plazo	¿El proyecto es sostenible a largo plazo desde el punto de vista económico, técnico y ambiental?	El proyecto podría ser sostenible si se abordan los desafíos técnicos y financieros, pero en el estado actual de la tecnología, su sostenibilidad está en duda.	

	Cumplimiento Normativo	¿El proyecto cumple con las regulaciones ambientales y de carbono actuales en Colombia?	Los proyectos de CAC cumplen en principio con las regulaciones ambientales y de carbono en Colombia, ya que se alinean con los objetivos del país para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.	
--	-------------------------------	---	--	---

Para establecer un orden de elegibilidad de las iniciativas para la reducción de la huella de carbono, se llevó a cabo un análisis semicuantitativo. Basándonos en el cuadro semáforo presentado anteriormente, se asignaron los siguientes valores: verde: 3, amarillo: 2 y rojo: 1. Estos valores se sumaron sin aplicar ponderaciones, asumiendo que todas las variables tienen la misma importancia en cuanto a su aplicabilidad, como se muestra en la Tabla 9. El objetivo de este ejercicio es simplemente proporcionar un ranking semicuantitativo que permita determinar un orden de viabilidad, de mayor a menor, como se muestra en la Figura 11.

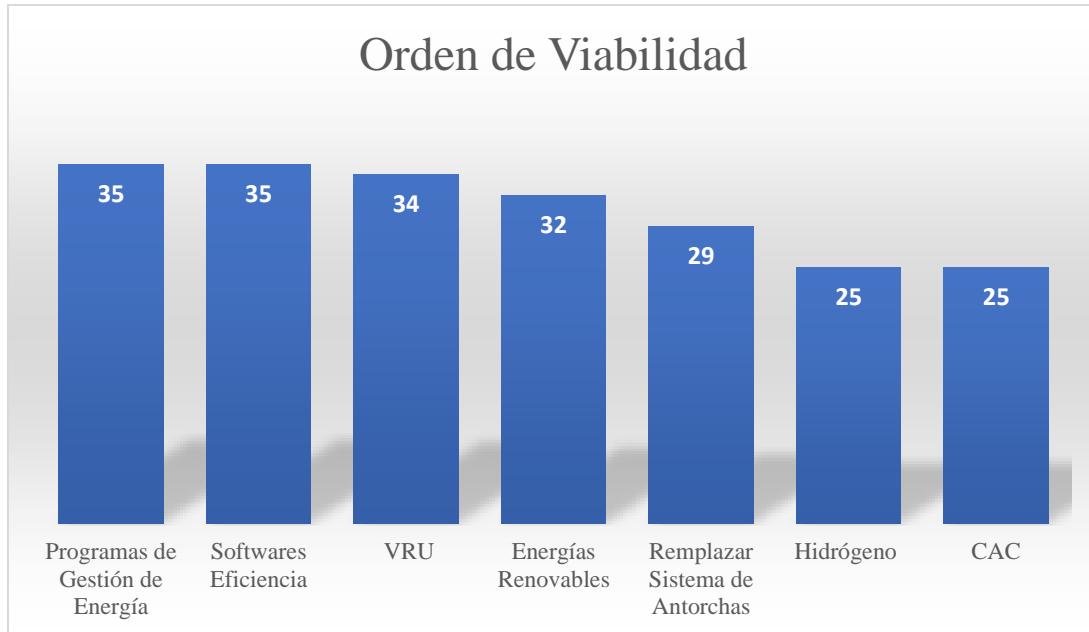
Tabla 9

Ponderación semicuantitativa de las iniciativas para reducción de huella de carbono

Iniciativas	Viabilidad												Total	
Unidades de Recuperación de Vapor VRU	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3	3	34
Remplazar Sistema de Antorchas	3	3	3	1	3	2	2	2	3	2	0	2	3	29
Softwares Eficiencia	3	3	3	3	3	2	3	2	2	2	3	3	3	35
Programas de Gestión de Energía	3	3	3	3	3	0	3	2	3	3	3	3	3	35
Hidrógeno	2	1	2	0	2	2	2	2	3	2	2	2	3	25
Energías Renovables	2	2	2	3	3	2	2	2	3	2	3	3	3	32
Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC)	2	2	2	2	3	0	2	2	3	1	2	1	3	25

Figura 11

Orden de viabilidad iniciativas reducción huella de carbono



La iniciativa líder es la implementación de programas de gestión de energía, que se presenta como la opción más práctica y de bajo costo frente a otras alternativas. Su efectividad en la reducción de la huella de carbono ha sido probada en diversas industrias, lo que la convierte en una opción altamente viable. De igual manera, los softwares de eficiencia energética también destacan como una excelente opción. No solo permiten un ahorro significativo de energía y la reducción de emisiones, sino que su implementación es sencilla y existen múltiples opciones en el mercado a costos relativamente bajos en comparación con otras tecnologías avanzadas. Esta combinación de factores hace que ambas soluciones sean atractivas y viables para las empresas del sector.

En cuanto a las unidades de recuperación de vapor, aunque requieren una inversión inicial más elevada y posibles adaptaciones en las instalaciones de los campos petroleros, representan una

alternativa eficaz para la reducción de las emisiones de metano, un gas con un impacto significativo en el cambio climático. A pesar de los retos iniciales, su capacidad para capturar emisiones hace que valga la pena considerarlas.

Las energías renovables, aunque son ampliamente reconocidas por su potencial para generar energía limpia, aún enfrentan desafíos debido a sus altos costos y la necesidad de adaptaciones en las instalaciones. A pesar de su popularidad y su contribución a la reducción de la huella de carbono, estas tecnologías todavía requieren un análisis cuidadoso antes de su implementación a gran escala en la industria petrolera.

De igual manera, la sustitución del sistema de antorchas por versiones más eficientes es otra opción viable. Con cambios menores en las instalaciones existentes y un costo relativamente moderado, esta iniciativa podría ayudar significativamente a reducir las emisiones de carbono en campos que aún dependen de la quema de gas, ofreciendo una mejora considerable en la sostenibilidad operativa.

El hidrógeno, en particular el hidrógeno verde, surge como una opción prometedora para la descarbonización del sector. Sin embargo, su alto costo y la necesidad de que la tecnología madure o reciba incentivos gubernamentales hacen que su implementación sea menos viable en el corto plazo, aunque su potencial futuro es indudable.

Finalmente, la captura y almacenamiento de carbono, a pesar de ser una tecnología prometedora, aún no ha alcanzado el éxito esperado en los proyectos existentes. Además de ser

costosa, su viabilidad a largo plazo es cuestionable bajo las condiciones actuales, lo que la sitúa como la opción menos viable para implementar en este momento.

Aunque las iniciativas mencionadas son cruciales para reducir la huella de carbono en la industria petrolera, es igualmente fundamental que las empresas implementen y mantengan un inventario detallado de sus gases de efecto invernadero (GEI). Si bien muchas compañías ya realizan este tipo de inventarios, es esencial que se mejoren y se hagan más específicos, incluyendo la medición de la intensidad de emisiones por barril producido. Este enfoque detallado no solo permitirá un seguimiento más preciso de los avances en la reducción de emisiones, sino que también proporcionará una base sólida para la toma de decisiones y la implementación de tecnologías que realmente marquen una diferencia en la sostenibilidad del sector.

6. Estrategias para Reducir la Huella de Carbono desde los Diferentes Actores del Modelo de Desarrollo de la Cuádruple Hélice

Considerando el modelo de desarrollo de la Cuádruple Hélice, que integra al Estado, la academia, la industria y la sociedad, cada actor desempeña un rol fundamental en el avance de la sostenibilidad en el sector de hidrocarburos. El Estado, representado por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), es responsable de supervisar, regular, controlar y fiscalizar todas las actividades dentro de la cadena de valor de los hidrocarburos, garantizando el cumplimiento de las normativas ambientales y promoviendo políticas que favorezcan la transición energética. La

academia, conformada por universidades y centros de investigación, juega un papel crucial en la generación de conocimientos y el desarrollo de tecnologías innovadoras.

La industria, está representada por las compañías operadoras y de servicios en el sector de hidrocarburos. Finalmente, la sociedad, representada por ciudadanos y organizaciones no gubernamentales, tiene un rol vital en influir en la agenda pública y en exigir transparencia y responsabilidad a los demás actores. A través de la participación activa en debates públicos y la promoción de prácticas sostenibles, la sociedad civil puede impulsar cambios significativos en la manera en que se gestionan los recursos naturales y energéticos del país.

Así, comprendiendo las funciones de cada actor en el modelo de la Cuádruple Hélice, se presentan a continuación en las tablas de la 9 a la 16, las acciones que cada uno de ellos podría emprender para que estas iniciativas y tecnologías se implementen efectivamente en la industria petrolera colombiana.

Tabla 10

Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia inventario de emisiones

Inventario de Emisiones

Actor	Acciones Recomendadas
Industria	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar y estandarizar metodologías para la medición de emisiones en cada fase de operación, incluyendo la intensidad de carbono por barril producido. • Implementar sistemas de monitoreo, como softwares, para la recolección de datos de emisiones. • Capacitar al personal en la gestión y reporte de emisiones.

Estado	<ul style="list-style-type: none"> • Crear y actualizar regulaciones que obliguen a las empresas a reportar sus emisiones de manera transparente y precisa. • Establecer un marco normativo claro para el control y la fiscalización de las emisiones. • Facilitar plataformas tecnológicas para la recopilación y análisis de datos de emisiones. • Promover incentivos para la reducción de emisiones, como exenciones fiscales o créditos de carbono.
Academia	<ul style="list-style-type: none"> • Ofrecer programas de formación y capacitación en gestión ambiental y de emisiones. • Colaborar con la industria en proyectos de investigación aplicada para la reducción de emisiones. • Desarrollar estudios e investigaciones que mejoren las metodologías de medición de emisiones.
Sociedad	<ul style="list-style-type: none"> • Actuar como vigilantes para asegurar que las empresas y el estado cumplan con sus compromisos de reducción de emisiones. • Crear campañas de sensibilización sobre la importancia del control de emisiones. • Colaborar con la academia y el estado para desarrollar políticas públicas orientadas a la sostenibilidad

Tabla 11

Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia programa de gestión de energía

Programa de Gestión de Energía

Actor	Acciones Recomendadas
Industria	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar y priorizar áreas de operación con mayor potencial de ahorro energético. • Implementar sistemas de monitoreo y control de consumo energético en tiempo real. • Establecer metas claras de eficiencia energética y desarrollar un plan de acción. • Capacitar al personal en prácticas de eficiencia energética y gestión de la energía.

Estado	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar políticas y regulaciones que promuevan y exijan la implementación de programas de gestión de la energía. • Ofrecer incentivos fiscales y financieros para la adopción de tecnologías eficientes. • Establecer estándares mínimos de eficiencia energética para las operaciones en campos petroleros. • Facilitar la creación de una plataforma para el intercambio de mejores prácticas y tecnologías entre empresas.
Academia	<ul style="list-style-type: none"> • Investigar y desarrollar nuevas tecnologías y métodos de gestión de la energía específicos para la industria petrolera. • Ofrecer cursos de formación y certificación en gestión energética para profesionales de la industria.
Sociedad	<ul style="list-style-type: none"> • Facilitar el diálogo entre la industria, la comunidad y otros actores para promover la transparencia y la responsabilidad en la gestión energética. • Crear campañas de sensibilización sobre la importancia de la eficiencia energética y su impacto ambiental.

Tabla 12

Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia softwares de eficiencia energética

Softwares Eficiencia Energética

Actor	Acciones Recomendadas
Industria	<ul style="list-style-type: none"> • Invertir en la adopción de softwares que utilicen IA para mejorar la eficiencia energética de las operaciones. • Capacitar al personal en el uso y mantenimiento de tecnologías basadas en IA. • Integrar los sistemas de IA con los sistemas de control existentes para un monitoreo eficiente.
Estado	<ul style="list-style-type: none"> • Promover alianzas entre el sector público, privado y la academia para el desarrollo de estas tecnologías.
Academia	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar investigaciones aplicadas sobre el uso de IA para optimizar la eficiencia energética en la industria petrolera. • Ofrecer programas académicos y cursos de formación especializados en IA y eficiencia energética.
Sociedad	<ul style="list-style-type: none"> • Actuar como vigilantes para asegurar que las empresas y el estado cumplan con sus compromisos de reducción de emisiones.

Tabla 13

Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia Unidades de Recuperación de Vapor

Unidades de Recuperación de Vapor

Actor	Acciones Recomendadas
Industria	<ul style="list-style-type: none"> • Instalar unidades de recuperación de vapor en instalaciones clave para capturar y reutilizar el metano que de otro modo se liberaría al ambiente. • Realizar estudios de viabilidad para identificar las áreas de mayor impacto en la reducción de emisiones. • Integrar las VRU en los sistemas de operación para maximizar la eficiencia energética y la reducción de emisiones. • Capacitar al personal en la operación y mantenimiento de las VRU.
Estado	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorear y reportar los avances en la reducción de emisiones de metano a nivel nacional. • Crear incentivos fiscales o financieros para las empresas que reduzcan proporcionalmente sus emisiones de metano.
Academia	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar investigaciones sobre la optimización de las VRU para condiciones específicas de los campos petroleros colombianos. • Colaborar con la industria para realizar pruebas y estudios piloto que mejoren la eficacia de las VRU.
Sociedad	<ul style="list-style-type: none"> • Promover la conciencia pública sobre la importancia de reducir las emisiones de metano.

Tabla 14

Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia sistema de antorchas eficientes

Sistema de Antorchas Eficientes

Actor	Acciones Recomendadas
Industria	<ul style="list-style-type: none"> • Adoptar tecnologías de antorchas más eficientes que reduzcan significativamente las emisiones de metano. • Realizar una auditoría de las antorchas existentes para identificar las necesidades de actualización. • Implementar sistemas de monitoreo y mantenimiento continuo para asegurar el óptimo funcionamiento de las nuevas antorchas. • Capacitar al personal en la operación y mantenimiento de los sistemas de antorchas eficientes.

Estado	<ul style="list-style-type: none"> • Crear un programa de certificación para las empresas que cumplan con los estándares de eficiencia de antorchas. • Regular estrictamente el uso de gas quemado, limitando al máximo su utilización, y prohibir los venteos rutinarios en operaciones petroleras.
Academia	<ul style="list-style-type: none"> • Investigar nuevas tecnologías y métodos para mejorar la eficiencia de las antorchas. • Colaborar con la industria en proyectos piloto para evaluar la eficacia de las nuevas tecnologías.
Sociedad	<ul style="list-style-type: none"> • Promover la conciencia pública sobre la importancia de reducir las emisiones de metano.

Tabla 15

Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia energías renovables

Energías Renovables

Actor	Acciones Recomendadas
Industria	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar y evaluar las oportunidades para la integración de energías renovables (solar, eólica) en las operaciones de los campos petroleros. • Invertir en la instalación de infraestructuras renovables, como paneles solares o turbinas eólicas, en los sitios de operación. • Capacitar al personal en el mantenimiento y operación de sistemas de energía renovable. • Monitorear y reportar el impacto de la transición hacia energías renovables en la reducción de la huella de carbono de las operaciones.
Estado	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer políticas y regulaciones que incentiven la adopción de energías renovables en la industria petrolera, como exenciones fiscales y subsidios. • Crear un marco normativo que facilite la integración de energías renovables en las operaciones petroleras y promueva la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. • Ofrecer programas de financiamiento accesible para la implementación de tecnologías renovables en la industria.
Academia	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar métodos para la integración eficiente de energías renovables en campos petroleros. • Ofrecer formación técnica y programas académicos sobre energías renovables aplicadas a la industria energética. • Proporcionar asesoría técnica y científica para optimizar la implementación de proyectos de energías renovables en campos petroleros.

- Sociedad**
- Colaborar con comunidades locales para asegurar que los proyectos de energías renovables en campos petroleros sean sostenibles y beneficiosos para las poblaciones cercanas.
 - Participar en iniciativas que promuevan la responsabilidad ambiental de las empresas, apoyando productos y servicios de compañías comprometidas con la transición a energías renovables.

Tabla 16

Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia hidrógeno

Hidrógeno

Actor	Acciones Recomendadas
Industria	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar las oportunidades de integración de hidrógeno como fuente de energía en las operaciones petroleras, incluyendo su producción in situ a partir de energías renovables. • Invertir en la infraestructura necesaria para la producción, almacenamiento y utilización de hidrógeno en los campos petroleros. • Desarrollar proyectos piloto para probar la viabilidad técnica y económica del uso de hidrógeno en diversas operaciones. • Capacitar al personal en la manipulación segura y eficiente del hidrógeno.
Estado	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer normativas claras para la producción, transporte, almacenamiento y utilización de hidrógeno en los campos petroleros. • Ofrecer financiamiento accesible para proyectos de hidrógeno, apoyando la investigación y la implementación a gran escala. • Crear un marco regulatorio que promueva la producción y el uso de hidrógeno en la industria petrolera, incluyendo incentivos fiscales y subsidios.
Academia	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar programas de formación y especialización en hidrógeno para ingenieros y técnicos. • Colaborar con la industria en proyectos piloto y estudios de viabilidad sobre el uso de hidrógeno en diferentes aplicaciones dentro de los campos petroleros. • Publicar estudios y análisis sobre los beneficios ambientales y económicos del uso de hidrógeno en la industria energética.
Sociedad	<ul style="list-style-type: none"> • Colaborar con comunidades locales para que los proyectos de hidrógeno tengan un impacto positivo en el desarrollo económico y social.

Tabla 17

Acciones a tomar por el modelo de la cuádruple hélice estrategia captura y almacenamiento de carbono

Captura y Almacenamiento de Carbono

Actor	Acciones Recomendadas
Industria	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar estudios de viabilidad técnica y económica para la implementación de CAC en campos petroleros, basándose en experiencias exitosas a nivel global. • Invertir en la infraestructura necesaria para la captura, transporte y almacenamiento de CO₂, asegurando la adecuación de los reservorios geológicos. • Desarrollar proyectos piloto para probar la eficacia de las tecnologías de CAC en condiciones locales, priorizando la seguridad y el monitoreo continuo. • Capacitar al personal en técnicas de captura y almacenamiento de carbono, incluyendo la operación y mantenimiento de las instalaciones.
Estado	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer un marco regulatorio claro para la implementación de proyectos de CAC, incluyendo la definición de estándares y protocolos de seguridad, monitoreo y verificación. • Crear incentivos económicos y fiscales para promover la adopción de CAC en la industria petrolera, como créditos fiscales por reducción de emisiones de CO₂.
Academia	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar investigaciones aplicadas para adaptar y mejorar las tecnologías de CAC según las condiciones geológicas y operativas de Colombia. • Colaborar con la industria en estudios de caso y proyectos piloto para evaluar la eficacia y seguridad de las soluciones de CAC implementadas.
Sociedad	<ul style="list-style-type: none"> • Fomentar la transparencia en los proyectos de CAC, promoviendo la participación de las comunidades locales y asegurando que se respeten los derechos humanos y ambientales. • Promover la conciencia pública sobre los beneficios y desafíos de la tecnología CAC, apoyando su adopción cuando sea viable y segura.

7. Conclusiones

El análisis realizado en este estudio evidencia que, aunque Colombia es responsable solo del 0,3% aproximadamente de las emisiones globales de CO₂, es importante que el país reduzca sus emisiones para cumplir con los compromisos internacionales adquiridos en materia de cambio climático. En este contexto, la industria petrolera juega un papel clave, ya que, a pesar del impulso global hacia la transición energética, los combustibles fósiles continuarán siendo fundamentales para el desarrollo económico de Colombia en el corto y mediano plazo. No obstante, es esencial reconocer que la reducción de la intensidad de carbono en la industria petrolera colombiana, por sí sola, no logrará un impacto significativo en las emisiones totales de gases de efecto invernadero del país. Este hecho no exime a la industria de su responsabilidad, sino que enfatiza la necesidad de adoptar un enfoque más amplio y colaborativo que involucre a otros sectores productivos.

Los resultados del análisis sobre la huella de carbono en la industria petrolera colombiana muestran que el país supera el estándar mundial de 18 kgCO₂e/boe en términos de intensidad de carbono. Sin embargo, es importante resaltar que las empresas operadoras Mansarovar y GeoPark se destacan por mantener intensidades de carbono muy por debajo del promedio global, con solo 10 kgCO₂e/boe y 10.9 kgCO₂e/boe, respectivamente. Por otro lado, Ecopetrol, que representa el 60% de la producción nacional, enfrenta un desafío significativo, ya que su intensidad de carbono asciende a 41.5 kgCO₂e/boe, muy por encima del estándar global. Esto implica que Ecopetrol debe adoptar medidas drásticas para reducir su intensidad de carbono y alinearse con los objetivos internacionales. Asimismo, otras empresas operadoras como Frontera Energy, Sierracol, Gran Tierra, Parex y Hocol también superan el estándar mundial, lo que resalta la importancia de que

estas compañías trabajen para ajustar sus emisiones y alinearse con las metas globales de sostenibilidad.

El análisis de iniciativas exitosas en la reducción de la huella de carbono a nivel mundial revela que los pilares clave para una reducción eficiente se alinean con las directrices de la Agencia Internacional de Energía: reducción de metano, eficiencia energética, energías renovables, hidrógeno y captura y almacenamiento de carbono. Los programas de gestión energética han sido especialmente eficaces en la industria petrolera, reduciendo emisiones y mejorando la competitividad. Ejemplos destacados incluyen a Petrobras, que en 32 años de su programa de conservación de energía ha reducido 42 millones de teCO_2 ; Exxon Mobil, que con su programa GEMS ahorró 750 millones de dólares y redujo 8 millones de teCO_2 ; y Canadian Natural, que mediante un software de eficiencia logró reducir 7,000 toneladas de CO_2 al año. Para una adopción generalizada, es necesario un cambio cultural donde la eficiencia energética se perciba como una oportunidad estratégica, más allá de una obligación regulatoria.

Como resultado de la investigación, se identificaron las estrategias más efectivas implementadas a nivel mundial que las empresas petroleras en Colombia podrían adoptar. Tras una evaluación de su aplicabilidad, se determinó que las iniciativas de eficiencia energética son las más prometedoras, liderando la lista de acciones viables. Estas estrategias son seguidas por las medidas de reducción de metano, como la implementación de unidades de recuperación de vapor para controlar y reducir las emisiones fugitivas, responsables de una parte significativa de las emisiones en la industria. Además, el reemplazo de sistemas de antorchas por modelos más eficientes se destacó como una acción clave. Aunque la integración de energías renovables, el uso

de hidrógeno, y la captura y almacenamiento de carbono también se identificaron como opciones para reducir la huella de carbono en ciertas operaciones, aún persisten barreras técnicas y económicas que dificultan su implementación a gran escala. Esto sugiere la necesidad de continuar innovando y desarrollando soluciones que puedan superar estos obstáculos para alcanzar una descarbonización más efectiva en el sector.

Finalmente, los resultados permiten concluir que, aunque la adopción de estas estrategias por parte de la industria petrolera es crucial, es indispensable un esfuerzo conjunto de todos los actores involucrados para cumplir con los acuerdos internacionales de reducción de emisiones. El Estado debe jugar un papel central estableciendo y supervisando la obligatoriedad de que las empresas reporten detalladamente sus emisiones de carbono. Este reporte no solo permitirá medir el avance en el proceso de descarbonización, sino también evaluar la efectividad de las estrategias implementadas. Además, este esfuerzo debe ser respaldado por la academia, que puede proporcionar investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, y por la sociedad, que debe mantener la presión para garantizar que la industria cumpla con sus compromisos ambientales. Solo a través de esta colaboración multisectorial se logrará una reducción significativa de la huella de carbono en la industria petrolera.

8. Recomendaciones

Se recomienda investigar y desarrollar modelos predictivos que permitan simular el impacto a largo plazo de diferentes estrategias de reducción de emisiones en la industria petrolera. Estos modelos podrían ser útiles para evaluar la efectividad de distintas iniciativas antes de su implementación, optimizando la toma de decisiones en el sector.

Se sugiere que se investigue la viabilidad de integrar fuentes de energía renovable, como la solar o eólica, en las operaciones diarias de las compañías petroleras. Este enfoque podría identificar soluciones para reducir la dependencia de combustibles fósiles en la producción y transporte de petróleo.

Se recomienda que futuros trabajos de grado exploren con mayor profundidad las tecnologías emergentes, como la captura y almacenamiento de carbono (CAC) y el hidrógeno verde, evaluando su viabilidad técnica y económica en el contexto colombiano.

Referencias Bibliográficas

- API, A. P. (2021). *COMPENDIUM OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS METHODOLOGIES*.
[https://www.api.org/~media/files/policy/esg/ghg/2021-api-ghg-compendium-110921.pdf](https://www.api.org/~/media/files/policy/esg/ghg/2021-api-ghg-compendium-110921.pdf)
- Argentina, G. T. (2023). *[Imagen de emisiones de sostenibilidad alcance 1, 2 y 3]*.
<https://www.grantthornton.com.ar/Perspectivas/articulos-y-publicaciones/emisiones-de-sostenibilidad-alcance-1-2-y-3/>
- Baker Hughes . (2021). *Measurement up, methane down: innovative flare management*.
<https://www.bakerhughes.com/company/energy-forward/measurement-methane-down-innovative-flare-management>
- BP. (2022). *bp Statistical Review of World Energy 2022*.
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
- BP. (2023). *H2Teesside*. https://www.bp.com/en_gb/united-kingdom/home/where-we-operate/reimagining-teesside/h2teesside.html
- BP. (2023). *Lightsource bp Sustainability Report 2023*.
<https://assets.lightsourcebp.com/app/uploads/2024/06/19152736/Lightsource-bp-Sustainability-Report-2023.pdf>
- Carayannis, E. G., & Campbell, D. F. (2010). Triple helix, quadruple helix and quintuple helix and how do knowledge, innovation and the environment relate to each other? A proposed framework for a trans-disciplinary analysis of sustainable development and social ecology. *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development (IJSESD)*, 1(1), 41-69.

- Ecopetrol. (25 de 03 de 2021). Grupo Ecopetrol anuncia compromiso y plan para lograr cero emisiones netas de carbono en 2050.: https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/?1dmy&page=detalleNoticias&urile=wcm:path:/ecopetrol_wcm_library/as_es/noticias/noticias+2021/reduccion-emisiones
- Ecopetrol. (2022). *Informe Integrado de Gestión*. <https://files.ecopetrol.com.co/web/esp/cargas/ecopetrol-rigs-2022-esp.pdf>
- EPA, E. P. (2021). *Greenhouse Gas (GHG) Emissions and Removals*. <https://www.epa.gov/ghgemissions>
- EPA, E. P. (2021). *Understanding the Carbon Footprint*. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- EPA, E. P. (2022). *Estimates of Methane Emissions by Segment in the United States*. <https://www.epa.gov/natural-gas-star-program/estimates-methane-emissions-segment-united-states>
- EPA, E. P. (2022). *Vapor recovery units*. <https://www.epa.gov/natural-gas-star-program/vapor-recovery-units>
- Equinor. (2020). *Hywind Tampen: the world's first renewable power for offshore oil and gas*. <https://www.equinor.com/energy/hywind-tampen>
- ERM. (2020). *emissions.AI for complex facilities*. <https://www.erm.com/emissions-ai/>
- Etzkowitz, H., & Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: From National Systems and "Mode 2" to a Triple Helix of university-industry-government relations. *Research Policy*, 29(2), 109-123.

Exxon Mobil. (2021). *ExxonMobil plans to increase carbon capture at LaBarge, Wyoming facility.*

https://corporate.exxonmobil.com/news/news-releases/2021/1021_exxonmobil-plans-to-increase-carbon-capture-at-labarge-wyoming-facility

Exxon Mobil. (30 de 01 de 2023). *Low-carbon hydrogen: Fueling our Baytown facilities and our*

net-zero ambition. <https://corporate.exxonmobil.com/news/viewpoints/low-carbon-hydrogen>

Exxon Mobil. (20 de 02 de 2024). *The heat is on Getting industry hydrogen-ready.*

<https://corporate.exxonmobil.com/what-we-do/delivering-industrial-solutions/hydrogen/zeeco-exxonmobil-hydrogen-industrial-burners>

FAO, O. d. (2019). *Climate Change and Food Security: Risks and Responses.*

<http://www.fao.org/3/ca5271en/ca5271en.pdf>

Frontera Energy. (2022). *Reporte ASG.*

<https://www.fronteraenergy.ca/content/uploads/2023/05/FRONTERA-ESG-INFORME-2022-Espanol.pdf>

GEOPARK. (2022). *Reporte Speed/ESG.* [https://www.geo-park.com/wp-](https://www.geo-park.com/wp-content/uploads/2023/04/GeoPark-Reporte-SPEED-ESG-2022.pdf)

[content/uploads/2023/04/GeoPark-Reporte-SPEED-ESG-2022.pdf](https://www.geo-park.com/wp-content/uploads/2023/04/GeoPark-Reporte-SPEED-ESG-2022.pdf)

Gobierno de Colombia. (2021). *Estrategia climática de largo plazo de Colombia E2050 para*

cumplir con el Acuerdo de París. MinAmbiente, DNP, Cancillería, AFD, Expertise France, WRI: Bogotá.: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/COL_LTS_Nov2021.pdf

Gran Tierra Energy. (2022). *Greenhouse Gas & Air Quality Report.*

<https://www.grantierra.com/books/2022-ghg-en/#page=4>

Hocol. (2022). *Energía que te Conecta: Informe de Sostenibilidad.*

<https://www.hocol.com.co/sostenibilidad/informes-de-sostenibilidad>

- IDEAM, F. N. (2021). *Tercer Informe Bienal de Actualización del Cambio Climático de Colombia*.
<https://unfccc.int/sites/default/files/resource/BUR3%20-%20COLOMBIA.pdf>
- IEA, I. (2019). *The Future of Hydrogen*. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- IEA, I. E. (2020). *Energy Technology Perspectives 2020*. Special Report on Carbon Capture, Utilisation and Storage: https://iea.blob.core.windows.net/assets/181b48b4-323f-454d-96fb-0bb1889d96a9/CCUS_in_clean_energy_transitions.pdf
- IEA, I. E. (05 de 2023). *Emissions from Oil and Gas Operations in Net Zero Transitions*.
<https://www.iea.org/reports/emissions-from-oil-and-gas-operations-in-net-zero-transitions#overview>
- IEA, I. E. (2023). *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach*.
https://iea.blob.core.windows.net/assets/13dab083-08c3-4dfd-a887-42a3ebe533bc/NetZeroRoadmap_AGlobalPathwaytoKeepthe1.5CGoalinReach-2023Update.pdf
- IEA, I. E. (2023). *World Energy Outlook 2023*.
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/42b23c45-78bc-4482-b0f9-eb826ae2da3d/WorldEnergyOutlook2023.pdf>
- IEA, I. E. (2024). *Methane tracker data explorer*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/methane-tracker>
- IPCC, I. P. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
- IIPECA. (2007). *Saving Energy in the Oil and Gas Industry*.
http://www.ingenieroambiental.com/nov/Saving_Energy.pdf

- Kristoff, M. M. (2022). *The Carbon Capture Cruc - Lessons Learned - Executive Summary*. Institute for Energy Economics and Financial Analysis. United States of America.:
<https://ieefa.org/sites/default/files/2022-09/The%20Carbon%20Capture%20Crux.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). *Ley 2169 del 22 de diciembre de 2021*.
<https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Leyes/LEY%202169%20DEL%2022%20DE%20DICIEMBRE%20DE%202021.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (27 de 07 de 2018). *Ley 1931 de 2018*.
<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/ley-1931-2018.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (02 de 08 de 2018). *Resolución 40807*.
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia*.
https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja_Ruta_Hidrogeno_Colombia_2810.pdf
- Natural Gas STAR, & EPA, E. (2003). *Installing Vapor Recovery Units on Crude Oil Storage Tanks*. https://www.globalmethane.org/documents/m2mtool/docs/ll_final_vap.pdf
- Net Zero Teesside. (2024). *Net Zero Teesside Power*. <https://www.netzeroteesside.co.uk/project/>
- North Sea Transition Authority. (2019). *Decarbonising Oil & Gas Production in the UKCS*.
<https://www.nstauthority.co.uk/media/7568/decarbonising-oil-gas-production-in-the-ukcs.pdf>
- North Sea Transition Authority. (2023). *Emissions Monitoring Report*.
<https://www.nstauthority.co.uk/media/bicn5tva/nsta-emissions-monitoring-report-2023-final-accessible.pdf>
- Parex, R. (2022). *Informe de Sostenibilidad*. https://parexresources.com/wp-content/uploads/2023/08/Spanish-2022-Sustainability-Report_sp_WEB.pdf

- Pickl, M. (2019). The renewable energy strategies of oil majors – From oil to energy? *Energy Strategy Reviews*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100370>
- Shell. (2021). *Quest Facility Spotlight: showing how large-scale CO₂ capture can be safe and effective*. <https://www.shell.com/business-customers/catalysts-technologies/resources-library/quest-carbon-capture-plant.html>
- Shell. (2022). *Hydrogen*. <https://www.shell.com/what-we-do/hydrogen.html>
- Total Energies. (2020). *Northern Lights, the First Major Carbon Capture and Storage Project in Norway*. <https://totalenergies.com/projects/carbon-capture-and-storage/northern-lights-first-major-carbon-capture-and-storage-project>
- TotalEnergies. (2020). *Total to develop Qatar's First Large-Scale (800 MWp) Solar Plant*. <https://totalenergies.com/media/news/press-releases/total-develop-qatars-first-large-scale-800-mwp-solar-plant>
- UNFCCC, U. N. (1992). *Convention on climate change*. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>
- UNFCCC, U. N. (2015). *The Paris Agreement*. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- UNFCCC, U. N. (s.f.). *About COP*. <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>
- World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development;. (2004). *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard (Revised Edition)*. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>

Zero Carbon Analytics. (02 de 2024). *A closer look at CCS: Problems and potential.*

https://zerocarbon-analytics.org/wp-content/uploads/2024/02/2024-02-A-closer-look-at-CCS_Problems-and-potential-1.pdf