

Estado del arte sobre las diversas tecnologías para el almacenamiento y utilización de dióxido de carbono (CO₂) en el marco de la sostenibilidad ambiental.

Jaider David Quintero Álvarez, María Paulina Argumedo Palis

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniería de Petróleos

Director

Nicolás Santos Santos

M.Sc.

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos
Ingeniería de Petróleos
Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Agradezco profundamente a todas las personas involucradas en el desarrollo de este escrito por su tiempo, conocimientos y recomendaciones que enriquecieron este trabajo. Sus aportaciones fueron fundamentales para el desarrollo y mejora del contenido de la investigación.

-Jaider David Quintero Álvarez

A la persona más importante de mi vida, quien me enseñó desde sumar hasta vivir. Ojalá la vida me alcance para devolverle, aunque sea una parte del amor, la paciencia y el sacrificio que me ha entregado. A Victoria Isabel Palis Navarro, con toda mi alma.

-María Paulina Argumedo Palis

Agradecimientos María Paolina Argumedo Palis

A mi madre, Ana Paulina Argumedo Palis, pilar fundamental en mi vida, ejemplo de perseverancia y amor incondicional. Gracias por ser mi fortaleza y guía constante.

A mis abuelos, Victoria Palis y Angel Argumedo, por su amor incondicional y quienes han sido como padres en mi crecimiento.

A mi tíos, Maure Argumedo y Julio Suarez, quienes me han acompañándome desde siempre en cada paso que he dado. Su presencia ha sido un regalo invaluable.

A mis hermanos, Cristina Argumedo, Isabella Argumedo, Julio Ángel Suárez y Julio Armando Suárez, quienes llenan mi vida de alegría y orgullo. Su existencia hace más feliz la mía.

A mi director de tesis, Nicolás Santos Santos, por su confianza, orientación y por compartir generosamente su conocimiento.

A mi compañero de tesis, Jaider Quintero, a quien la vida me regaló en el momento que más lo necesitaba. Con él aprendí como era la vida en la universidad, a disfrutar, reír y también a llorar. Espero que la vida nos siga uniendo para celebrar nuestros triunfos y apoyarnos en nuestras tristezas.

A Ana María Pineda e Ivonne Mendoza, consejeras y amigas, con quienes he compartido momentos de profunda alegría, risas sinceras y un apoyo incondicional que siempre atesoraré.

A quienes me acompañaron a lo largo de esta etapa, a pesar de la distancia, y que con su cariño convirtieron la tristeza en risa y la confusión en consuelo. Siempre tendrán un lugar en mi corazón: Juan José Villamizar, Lina Tapia, Eduardo Salazar, Santiago Sánchez, Mateo Arévalo, y Dana Santos.

A todos aquellos que hicieron de Bucaramanga mi segunda casa, que me abrieron las puertas de su hogar y de su familia: Edith Tobasía, Sandra Gómez y Olga Villamizar. Las recordaré siempre con profundo cariño y eterno agradecimiento.

Agradecimientos Jaider David Quintero Alvarez

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una manera u otra, me han acompañado a lo largo de este proceso de investigación y redacción de mi tesis.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi director de tesis Nicolas Santos, por su orientación, apoyo y sus consejos siempre sabios. Su compromiso y dedicación me ñ

A mis padres Wilman Quintero y Magda Alvarez, mi más profundo agradecimiento por ser el pilar fundamental de mi vida, por su amor, paciencia y comprensión durante todo este proceso. Su apoyo emocional fue esencial para mantenerme enfocado.

A mi familia, especialmente a mis hermanas, Desli Quintero y Vianey Quintero, a mis abuelos, Ana del Carmen Roperó y Nestor Quintero, a mi tía Dianeida Quintero, por su apoyo incondicional. Su amor, paciencia y palabras de ánimo que me dieron la fuerza necesaria para seguir adelante. Gracias por estar siempre a mi lado, por creer en mí y por ser mi mayor fuente de motivación en todo este proceso.

A mi compañera de tesis, María Paulina Argumedo, por ser un pilar fundamental en el desarrollo de este proyecto de investigación. Su apoyo incondicional a lo largo de toda mi trayectoria universitaria ha sido invaluable. Ha compartido conmigo innumerables momentos que

se han convertido en recuerdos que no solo forman parte de lo que soy como persona, sino también de lo que soy como profesional. Su amistad en este viaje ha sido esencial para lograrlo.

A amigas incondicionales que he conocido durante estos años, Ana María Pineda, Silvia Natalia Castro y Diana Marcela Ine, con quienes he pasado momentos de alegría, tristeza y me han demostrado que los amigos contribuyen a ser mejor persona.

Por último, agradezco a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron y me acompañaron en este trabajo y a mi desarrollo en la vida universitaria ya sea con su conocimiento, con su apoyo, con horas de esparcimiento y demás formas de apoyo. Sin su apoyo, este logro no sería tan significativo.

Tabla de Contenido

	Pág.
<i>Introducción</i> _____	16
1. Objetivos _____	18
1.1. Objetivo General _____	18
1.2. Objetivos Específicos _____	18
2. Marco teórico _____	19
2.1. Cambio climático _____	19
2.2. Cambio climático panorama mundial. _____	21
2.3. Cambio climático panorama nacional _____	23
2.4. Gases de efecto invernadero _____	26
2.5. Depósitos naturales de CO ₂ _____	30
3. Almacenamiento de CO₂ _____	32
3.1. Fuentes y oportunidades del almacenamiento de CO ₂ _____	33
3.2. Almacenamiento geológico _____	34
3.3. Tecnología para el almacenamiento _____	34
3.4. Selección de lugares idóneos de almacenamiento de CO ₂ _____	36
3.5. Análisis de la incidencia ambiental _____	38
3.6. Almacenamiento oceánico _____	41

3.6.1.	Impactos ambientales del almacenamiento oceánico CO ₂	46
3.7.	Almacenamiento en yacimientos de hidrocarburos	48
3.7.1.	Riesgos y desafíos	51
3.8.	Carbonatación mineral	52
3.8.1.	Técnicas para la optimización de la carbonatación mineral	54
3.8.2.	Energía térmica	56
3.8.3.	Proyectos de carbonatación mineral	58
4.	<i>Utilización del CO₂</i>	59
4.1.	Desarrollo del CO ₂	62
4.2.	Cadena de valor para captura y posterior utilización de CO ₂	63
4.3.	Categorías de usos de CO ₂	63
4.4.	Criterios de selección	65
4.5.	Escala TRLs	66
4.5.1.	Los niveles de TRL	67
4.6.	Tecnologías inmersas en la obtención de los productos	70
4.6.1.	Electrocatalisis del CO ₂	70
4.6.2.	Síntesis química	71
4.6.3.	Hidrogenación:	71
4.6.4.	Reacciones inorgánicas:	71
4.6.5.	Biocombustible a partir de microalgas	72
4.7.	Principales productos a partir de la conversión de CO ₂	74
5.	<i>Tecnologías de CO₂: retos y oportunidades hacia la sostenibilidad ambiental</i>	79

5.1.	Obstáculos operativos _____	79
5.2.	Barreras económicas y de mercado _____	81
5.3.	Obstáculos de carácter social _____	85
5.4.	Análisis de los desafíos y controversias del proyecto Petra Nova _____	87
5.4.1.	Desafíos técnicos: Eficiencia y Fiabilidad cuestionada. _____	90
5.4.2.	Vinculación con proceso de recobro mejorado en la industria de los hidrocarburos: desafíos 91	
5.5.	Controversias ambientales y sociales _____	92
6.	<i>Políticas públicas y estrategias a nivel mundial como a nivel nacional</i> _____	94
6.1.	Estrategias para la descarbonización _____	95
6.1.1.	Mejora en la eficiencia operativa _____	96
6.1.2.	Electrificación _____	97
6.1.3.	Procesos para tratar emisiones residuales _____	97
6.1.4.	Economía circular: fomentar la reutilización, reciclaje y reducción de residuos. _____	98
7.	<i>Contexto mundial sobre las emisiones de gases de efecto invernadero</i> _____	99
7.1.	Situación por país _____	99
7.1.1.	Estados Unidos _____	100
7.1.2.	Noruega _____	104
7.1.3.	Australia _____	107
7.1.4.	Otros países desarrollados _____	111
8.	<i>Colombia: panorama Nacional</i> _____	112
9.	<i>Conclusiones</i> _____	115

Referencias Bibliográficas _____ 117

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Vida, eficacia radiactiva y potenciales de calentamiento mundial directo (PCM)(excepto el CH₄)</i>	29
Tabla 2. <i>Proyectos de almacenamiento oceánico de CO₂</i>	42
Tabla 3. <i>Riesgos identificados en los proyectos relacionados con CO₂</i>	47
Tabla 4. <i>Técnicas para el almacenamiento de CO₂</i>	50
Tabla 5. <i>Parámetros para la eficiencia de los catalizadores térmicos</i>	58
Tabla 6. <i>Estudios de la carbonatación mineral alrededor del mundo</i>	58
Tabla 7. <i>Escala de las nuevas tecnologías</i>	67
Tabla 8. <i>Otras tecnologías para la conversión de CO₂</i>	73
Tabla 9. <i>Ventajas y limitaciones de la utilización de bonos verdes</i>	83
Tabla 10. <i>Desafíos de Proyectos relacionados con CCUS</i>	87
Tabla 11. <i>Desafíos del proyecto Petro Nova</i>	94
Tabla 12. <i>Condiciones para evaluar durante un proyecto</i>	98
Tabla 13. <i>Países avanzados en tecnologías relacionadas con el CO₂</i>	111

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Diagrama del fundamento del efecto invernadero.</i>	20
Figura 2. <i>Anomalías en temperatura terrestre. Fuente: Informe del clima NASA 2021. Nota: Adaptado de: Informe del clima NASA 2021. Describe el aumento del promedio de la temperatura a lo largo de los años</i>	22
Figura 3. <i>Emisiones mundiales de CO2 de 1995 a 2023 en millones de toneladas métricas. Fuente: Global Carbon Project</i>	24
Figura 4. <i>Porcentaje de los gases de efectos invernadero en las emisiones. Fuente: autores</i>	25
Figura 5. <i>Porcentaje de los gases de efectos invernadero en las emisiones</i>	27
Figura 6. <i>Ciclo del carbón</i>	31
Figura 7. <i>Posibles fugas del almacenamiento geológico del CO2</i>	40
Figura 8. <i>Océano como almacén de CO2. Fuente: Autores</i>	45
Figura 9. <i>Categorías del uso de CO2</i>	63
Figura 10. <i>Requerimientos técnicos para la conversión de CO2. Fuente: autores</i>	66
Figura 11. <i>Descripción en la obtención de productos a partir de síntesis química</i>	72
Figura 12. <i>Proceso para convertir el CO2 en Urea. Fuente: autores</i>	76
Figura 13. <i>Funcionamiento del Proyecto Petra Nova. Fuente: autores</i>	89

Glosario

Almacenamiento geológico: técnica que permite inyectar CO₂ en formaciones subterráneas como acuíferos salinos profundos o yacimientos de hidrocarburos agotados, con el objetivo de aislarlo permanentemente de la atmósfera.

Carbonatación mineral: proceso químico mediante el cual el CO₂ reacciona con minerales que contienen calcio o magnesio para formar carbonatos estables, facilitando su almacenamiento permanente.

Captura de carbono (CCS): conjunto de tecnologías que permiten capturar el CO₂ emitido por procesos industriales o de generación eléctrica, para su posterior almacenamiento o aprovechamiento.

CO₂ (Dióxido de carbono): gas de efecto invernadero producto de la combustión de materiales orgánicos; su acumulación en la atmósfera es uno de los principales responsables del cambio climático.

Descarbonización: reducción progresiva del uso de combustibles fósiles y de las emisiones de carbono en los procesos económicos y energéticos.

Economía circular: modelo económico que busca minimizar el desperdicio y aprovechar los recursos mediante la reutilización, reciclaje y valorización de subproductos como el CO₂.

Energía limpia: energía generada a partir de fuentes que no producen emisiones significativas de gases de efecto invernadero, como la solar, eólica, hidroeléctrica o geotérmica.

Policarbonatos: materiales plásticos que pueden ser sintetizados a partir del CO₂ capturado, usados en la industria automotriz, electrónica y de construcción.

Recobro mejorado (EOR): técnica que consiste en inyectar CO₂ u otros agentes en yacimientos de petróleo maduros para aumentar la producción de crudo.

Sostenibilidad ambiental: enfoque que promueve el uso racional de los recursos naturales para satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las de las futuras generaciones.

Urea: compuesto químico utilizado principalmente como fertilizante nitrogenado; puede ser producido a partir del CO₂ capturado, integrando procesos industriales sostenible.

Resumen

Título: Evaluación conceptual integrada sobre las diversas tecnologías para el almacenamiento y utilización de dióxido de carbono (CO₂) en el marco de la sostenibilidad ambiental.

Autor: María Paulina Argumedo Palis, Jaider David Quintero Álvarez.

Palabras Clave: CO₂, almacenamiento geológico, captura de carbono, cambio climático, sostenibilidad, economía circular, carbono mineralizado, recobro mejorado.

Descripción:

La presente tesis realiza una evaluación conceptual integrada de las tecnologías actuales para el almacenamiento y utilización del dióxido de carbono (CO₂), enmarcadas en la sostenibilidad ambiental. A partir del contexto del cambio climático, se analizan los principales métodos para mitigar las emisiones de CO₂, abordando tanto la captura como el almacenamiento geológico, oceánico y en yacimientos agotados, así como su transformación mediante carbonatación mineral. Se identifican los criterios técnicos, geomecánicos y ambientales para seleccionar sitios de almacenamiento seguros, destacando riesgos como fugas, acidificación oceánica y alteración de acuíferos. Igualmente, se estudian tecnologías emergentes que permiten el uso del CO₂ como insumo para procesos industriales, incluyendo la producción de metanol, urea y policarbonatos, con enfoques basados en economía circular y sostenibilidad. El trabajo también incluye un análisis comparativo de políticas públicas entre países desarrollados y Colombia, proponiendo lineamientos para fortalecer la regulación nacional. Se reconoce que, si bien existen retos técnicos, económicos y sociales, el aprovechamiento del CO₂ ofrece oportunidades significativas en sectores como el energético y el industrial, contribuyendo al cumplimiento de metas climáticas. La tesis concluye que una implementación estratégica de estas tecnologías, acompañada de políticas claras, educación ambiental y desarrollo tecnológico, puede posicionar al CO₂ no como residuo, sino como recurso útil para un desarrollo bajo en carbono

Trabajo de grado

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director Nicolas Santos

Abstract

Title: Integrated Conceptual Evaluation of Various Technologies for Carbon Dioxide (CO₂) Storage and Utilization within the Framework of Environmental Sustainability

Author: María Paulina Argumedo Palis, Jaider David Quintero Álvarez

Key Words: CO₂, geological storage, carbon capture, climate change, sustainability, circular economy, mineralized carbon, enhanced recovery

Description

This thesis presents an integrated conceptual evaluation of current technologies for the storage and utilization of carbon dioxide (CO₂), framed within environmental sustainability. Within the context of climate change, it analyzes the main methods to mitigate CO₂ emissions, covering both capture and storage techniques such as geological, oceanic, and depleted reservoir storage, as well as transformation through mineral carbonation. The work identifies technical, geomechanical, and environmental criteria for selecting safe storage sites, highlighting risks such as leaks, ocean acidification, and aquifer alteration. Emerging technologies for CO₂ utilization are also examined, including its use as a feedstock in the production of methanol, urea, and polycarbonates, emphasizing circular economy and sustainability approaches. Additionally, a comparative analysis of public policies between developed countries and Colombia is presented, proposing recommendations to strengthen national regulatory frameworks. The study recognizes that, despite technical, economic, and social challenges, the valorization of CO₂ offers significant opportunities in sectors such as energy and industry, contributing to climate goals. The thesis concludes that strategic implementation of these technologies—supported by clear policies, environmental education, and technological advancement—can reposition CO₂ not as a waste product but as a valuable resource for low-carbon development

Trabajo de grado

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director Nicolas Santos

Introducción

Las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera han incrementado de manera constante desde la era industrial, superando actualmente los 30 mil millones de toneladas métricas anuales (International Energy Agency [IEA], 2023). Este crecimiento acelerado ha sido reconocido como uno de los principales responsables del calentamiento global, algunas de las consecuencias que conlleva, son el aumento de la temperatura promedio del planeta, variaciones extremas en los patrones climáticos, pérdida de biodiversidad y afectaciones a la seguridad alimentaria y energética mundial (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021). Pese a los compromisos asumidos en el Acuerdo de París de 2015 por 196 países, los cuales tienen como objetivo limitar el aumento de la temperatura global a 1,5 °C respecto a los niveles preindustriales, la reducción efectiva de emisiones sigue siendo insuficiente.

La transición hacia fuentes renovables de energía se plantea como la mejor opción a largo plazo, sin embargo, para su implementación existen limitaciones en diferentes aspectos, como; económicos, tecnológicas y sociales los cuales retrasan su implementación, especialmente en países en desarrollo. En el caso colombiano, la matriz energética continúa dependiendo en gran medida de los hidrocarburos, lo cual dificulta alcanzar los objetivos de descarbonización en los plazos establecidos (Gutiérrez Guerrero, 2025). Lo anterior refuerza la necesidad de investigar medidas complementarias que permitan mitigar las emisiones en el corto y mediano plazo.

Considerando todo lo expuesto previamente, las diferentes tecnologías de captura, almacenamiento y utilización de carbono (CCUS, por sus siglas en inglés) se perfilan como una alternativa viable para reducir las emisiones netas de CO₂, incluyendo métodos de captura, el

transporte mediante ductos o buques, el almacenamiento en formaciones geológicas profundas como yacimientos agotados y acuíferos salinos, así como la utilización en procesos industriales o proyectos de recobro mejorado de petróleo (Abbas et al., 2023). Sin embargo, la aplicación de CCUS enfrenta desafíos significativos: altos costos energéticos y financieros en los procesos de captura (Zhang et al., 2023), limitaciones geológicas en la disponibilidad de formaciones adecuadas para almacenamiento seguro (IntechOpen, 2022), vacíos regulatorios y de política pública que dificultan su implementación (Gutiérrez Guerrero, 2025), y la necesidad de garantizar eficiencia y pureza en los procesos de utilización (Springer, 2025).

El desarrollo de esta investigación se distribuye en los siguientes capítulos: objetivos, marco teórico, almacenamiento, utilización, tecnologías de CO₂, políticas públicas: estrategias a nivel nacional y mundial, contexto mundial sobre las emisiones de GEI, Colombia: panorama nacional y conclusiones. En el desarrollo de estos capítulos se hablará sobre las tecnologías de almacenamiento y utilización de CO₂, conceptos, cuáles son las más utilizadas, retos y estrategias para la implementación de ellas, todo esto tomando referencia de países que han implementado algunas de ellas y comparándolo con el panorama colombiano para así analizar cómo es el futuro de la implementación en Colombia.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Revisar conceptualmente las tecnologías disponibles para el almacenamiento y el uso de dióxido de carbono (CO₂), con el fin de proporcionar una base sólida para el aprovechamiento de este de recurso.

1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las tecnologías de almacenamiento y utilización del CO₂ por medio de la revisión bibliográfica.
- Identificar los desafíos y oportunidades para la implementación de las tecnologías de almacenamiento y utilización del CO₂ en el marco de la sostenibilidad ambiental.
- Analizar el rol de las políticas públicas energéticas y ambientales relacionadas con estas tecnologías a nivel nacional.

2. Marco teórico

Se analizará a detalle diferentes aspectos de los gases de efectos invernaderos, enfocándose en el CO₂ y las diferentes tecnologías para la disminución de este de la atmosfera.

2.1.Cambio climático

El cambio climático se caracteriza por la variación en periodos de tiempo de las condiciones climáticas promedios de la tierra, esto gracias a tanto a procesos naturales como, principalmente, a las actividades humanas (IPCC, 2021). Se evidencia significativamente en el aumento sostenido de la temperatura global, por ejemplo; la temperatura de la atmosfera y los océanos.

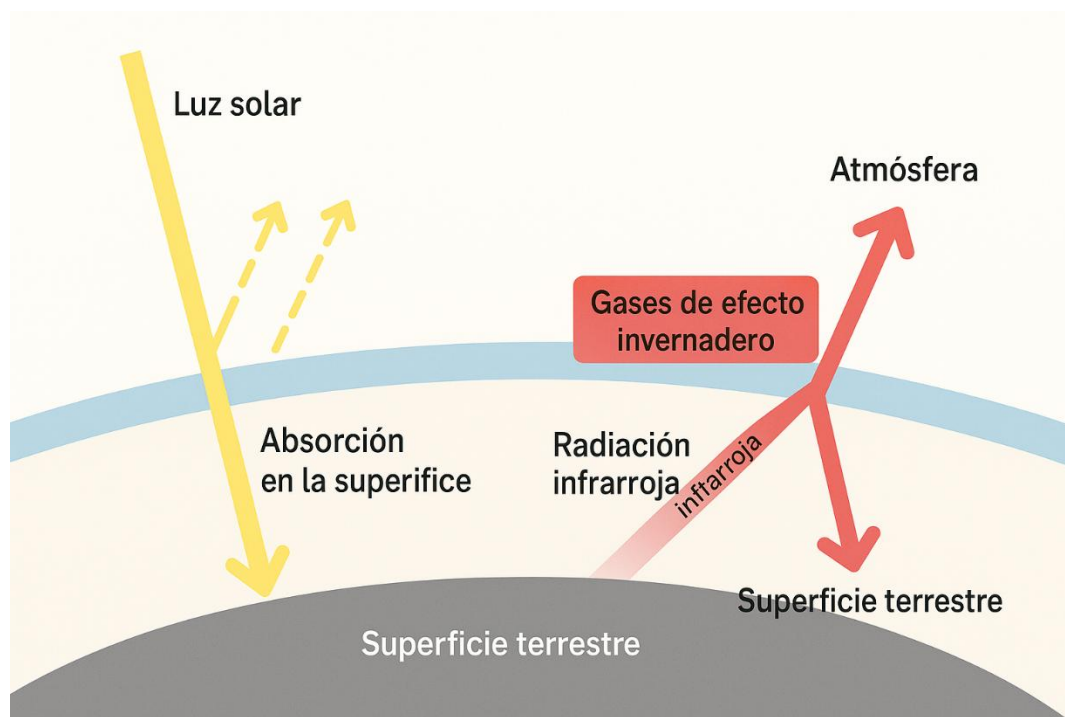
Un aspecto clave para comprender este fenómeno es el papel que desempeñan los gases de efecto invernadero (GEI). Estos compuestos, presentes en la atmosfera, son capaces de retener parte de la radiación térmica proveniente de la superficie terrestre, generando lo que se conoce como efecto invernadero. Entre los principales GEI se encuentran el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los gases fluorados, los cuales se encuentran relacionados con la actividad humana, tales como la quema de combustibles fósiles, los procesos industriales y las actividades agropecuarias según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2019).

Otra causa que contribuye a este fenómeno es la deforestación. Este proceso implica la pérdida de la cobertura forestal en grandes áreas, lo cual intensifica el efecto invernadero debido a que disminuye de manera considerable el efecto invernadero (FAO, 2020). Según estimaciones de la Organización de las Naciones Unidas, para el año 2050 la población mundial podría alcanzar

los 9.700 millones de personas, lo que aumentará la demanda de alimentos, agua y energía, y con ello se incrementarán también las emisiones de GEI (ONU, 2019).

En la siguiente imagen se evidencia como actúa los gases de efecto invernadero, como su nombre lo indica, estos retienen el calor y evitan que las radiaciones salgan de la atmosfera, sin embargo, este fenómeno se explicara con mayor profundidad conforme avance el proyecto.

Figura 1. Diagrama del fundamento del efecto invernadero.



Nota: Adaptado de: <https://geoconocimientos.blogspot.com/2017/07/el-efecto-invernadero.html> .

Esquema de los efectos de los gases de efecto invernadero.

Las consecuencias del cambio climático abarcan múltiples dimensiones. Entre ellas se encuentra el aumento del nivel del mar debido al deshielo de masas gélidas como los glaciares y el hielo marino del Ártico. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, el grosor del hielo marino en esta región se ha reducido de 4 metros hace 40 años a 1,5 metros en la

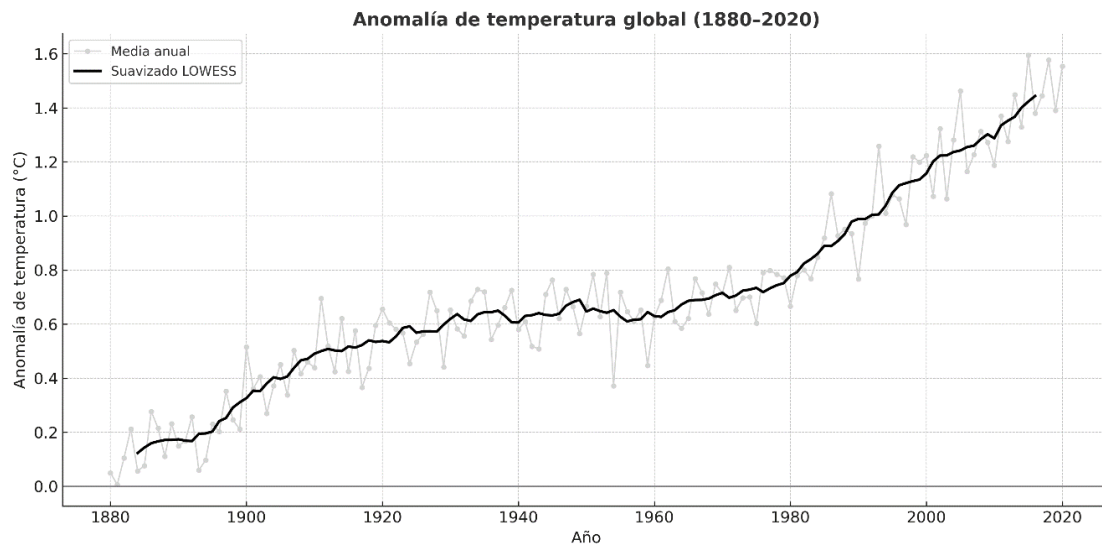
actualidad (PNUMA, 2021). La pérdida de glaciares compromete además el suministro de agua dulce, esencial para millones de personas alrededor del mundo.

Los impactos también se extienden a la biodiversidad. Las especies que no logren adaptarse a las nuevas condiciones ambientales corren un alto riesgo de extinción. Un ejemplo es el blanqueamiento de los corales: se estima que el 30 % ya se encuentra en estado crítico y cerca del 60 % podría perderse para el año 2030 (WWF, 2020). Asimismo, se intensifican los eventos meteorológicos extremos como las olas de calor, las sequías y las inundaciones, los cuales tienen repercusiones directas en la salud humana, la seguridad alimentaria y las economías locales.

Finalmente, el cambio climático genera otros efectos adicionales como la acidificación de los océanos, la pérdida de biodiversidad en áreas tropicales y la afectación de diferentes sectores productivos. Todos estos impactos hacen evidente la necesidad de avanzar hacia un modelo de desarrollo más sostenible y resiliente (IPCC, 2021). Cambio climático panorama mundial.

2.2. Cambio climático panorama mundial.

La constante búsqueda de soluciones ante la crítica situación del cambio climático ha azotado las diferentes industrias, el año 2024 y los siguientes a este son un periodo crítico, con proyecciones alarmantes destacando el aumento de las temperaturas y las consecuencias de estas. El año 2024 se presenta como un periodo crítico en la lucha contra el cambio climático, con proyecciones alarmantes sobre el aumento de las temperaturas y sus consecuencias. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes del estado actual del cambio climático a nivel global.

Figura 2. Anomalías en temperatura terrestre. Fuente: Informe del clima NASA 2021.

Nota:

Nota: Adaptado de: Informe del clima NASA 2021. Describe el aumento del promedio de la temperatura a lo largo de los años

En la imagen anterior, se evidencia el aumento paulatino de la temperatura terrestre a lo largo de los años, se observa así que esta viene en un aumento acelerado en los últimos 60 años comparado con los anteriores, esto debido a múltiples factores; desde crecimientos poblacionales hasta procesos industriales. Con el análisis de los datos de aumento de temperatura, se prevé que para un periodo entre 2024 a 2028 la temperatura siga presentando una tendencia de crecimiento, superando la media de los años anteriores, llegando por primera vez a oscilar entre 1,5°C y los cercanos a este (OMM, 2023).

Finalmente, el Acuerdo de París contempla la financiación climática, que busca garantizar que los países en desarrollo cuenten con los recursos necesarios para implementar medidas de mitigación y adaptación. Según lo establecido, los países desarrollados deben movilizar al menos 100.000 millones de dólares anuales en apoyo financiero. No obstante, diversos informes han

señalado dificultades en la distribución equitativa de estos fondos y en el cumplimiento de los compromisos pactados (PNUMA, 2022).

2.3. Cambio climático panorama nacional

El cambio climático es un fenómeno global, el cual genera diferentes impactos en los ecosistemas y en los sistemas socioeconómicos de cada país. Colombia, debido a su ubicación geográfica y a su alta biodiversidad, se considera especialmente vulnerable frente a sus consecuencias. Los principales sectores afectados son los recursos hídricos, la agricultura, la biodiversidad marina y las zonas costeras.

En primer lugar, la agricultura enfrenta un riesgo creciente en la calidad y disponibilidad de los alimentos. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2020) señala que cultivos de alta importancia nacional como la yuca, el arroz y la papa presentan una alta sensibilidad a las variaciones del clima. El incremento de la temperatura y la alteración de los patrones de lluvia hace disminuir los nutrientes de los suelos, generando pérdidas en la productividad agrícola y afectando la seguridad alimentaria del país.

Por otro lado, la ubicación geográfica de algunas regiones incrementa su nivel de exposición. Departamentos y territorios como el archipiélago de San Andrés y Providencia, Vaupés y Amazonas están entre las zonas más vulnerables (MADS, 2020). En las áreas costeras, el aumento de la temperatura del agua genera cambios en las corrientes marinas y en las mareas, lo que a su vez provoca erosión costera. Este proceso se ha identificado de manera crítica en lugares como Cartagena, donde la pérdida de playas representa un riesgo para el turismo y la economía local.

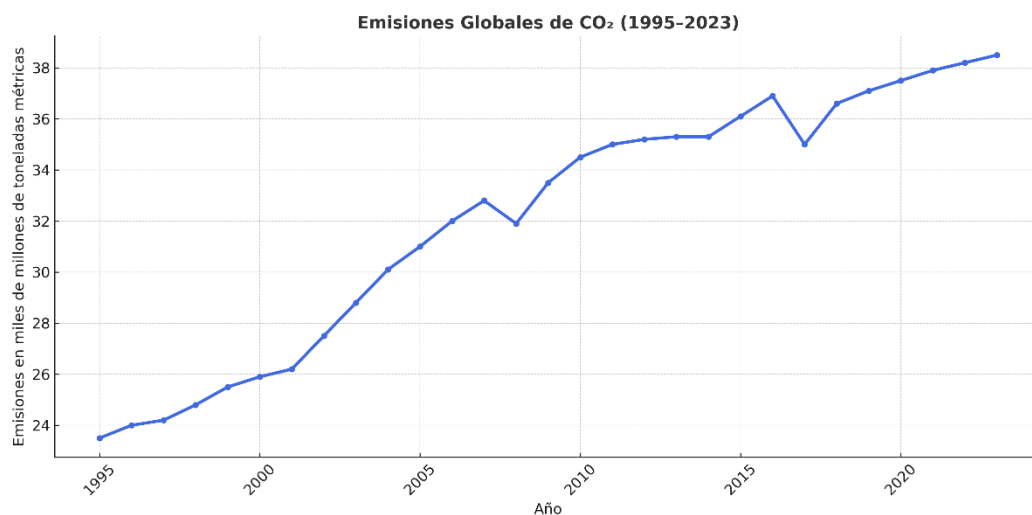
En relación con la vida marina, el blanqueamiento de corales constituye una de las mayores amenazas. Según la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA,

2023), entre el 70 % y el 80 % de los arrecifes coralinos en Colombia presentan signos de blanqueamiento debido a las olas de calor marinas registradas en el Caribe y el Pacífico. Esto ha afectado zonas como San Andrés, Providencia, el Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo, el arrecife de Varadero en Cartagena, el Parque Nacional Natural Tayrona, el Urabá chocoano y áreas coralinas como el Santuario de Fauna y Flora de Malpelo.

Frente a estos riesgos, el gobierno colombiano ha implementado instrumentos de planificación, políticas públicas e instrumentos económicos y financieros con el objetivo de mitigar los impactos del cambio climático y fomentar la participación ciudadana en la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI). Si bien Colombia solo aporta alrededor del 0,6 % de las emisiones globales de CO₂ (Banco Mundial, 2022), el país se ha comprometido con metas de mitigación alineadas con los compromisos internacionales, como el Acuerdo de París.

Figura 3. Emisiones mundiales de CO₂ de 1995 a 2023 en millones de toneladas métricas.

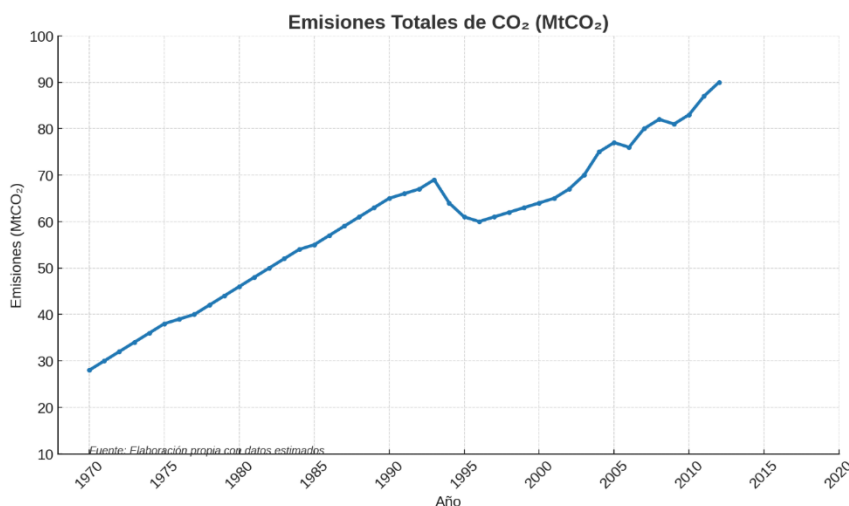
Fuente: Global Carbon Project



Nota: Adaptado de: Informe del clima NASA 2021. Describe las emisiones totales en el tiempo.

Centrándose sobre las emisiones de Colombia a través de los años, se tiene la siguiente gráfica, la cual se encuentra en tonelada métrica por año, en la cual se evidencia el aumento significativo de las emisiones de CO₂ a lo largo de los años. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible junto con la última actualización de los indicadores de Naturgas, destaca que el sector de la agricultura es el que contribuye de manera significativa a las emisiones del país, con un porcentaje de alrededor del 59% mientras que la industria energética fue de alrededor del 14% para el año 2020. Actividades como la ganadería, la agricultura y el uso del suelo en actividades como la deforestación generan el mayor número de emisiones de CO₂ en Colombia. Por otro lado, es importante destacar que la ganadería, tratamiento y eliminación de aguas residuales abanderan las emisiones del gas metano, perteneciente a los gases de efecto invernadero. El desarrollo de estas actividades si bien es cierto, son importante para la economía colombiana de la misma manera que las actividades llevadas a cabo en el sector energético, por lo cual están deben realizar esfuerzos pertinentes para tener presente en su desarrollo la importancia de descarbonizarse con la finalidad de cumplir los parámetros impuestos por el gobierno encaminándose a lograr sus objetivos para el año 2050.

Figura 4. *Porcentaje de los gases de efectos invernadero en las emisiones.*



Nota: Fuente: Adaptado por autores.

2.4.Gases de efecto invernadero

En la actualidad, el cambio climático es un fenómeno que ha venido azotando toda la población a nivel mundial, por eso es necesario entender cómo se desarrolla este, para poder tomar acciones de mitigación. A partir de lo anterior, se destaca que el cambio climático va de la mano con los gases de efecto invernadero. Estos se encargan de retener el calor en la atmosfera, manteniendo así el planeta más cálido, entre estos gases se pueden identificar el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso y el vapor de agua. El primero de este, es el encargado de estabilizar la atmosfera terrestre, sin embargo, en altas concentraciones contribuiría al aumento drástico de la temperatura de la tierra. Con el fin de entender el proceso del calentamiento global, se profundizará sobre los diferentes gases de este grupo

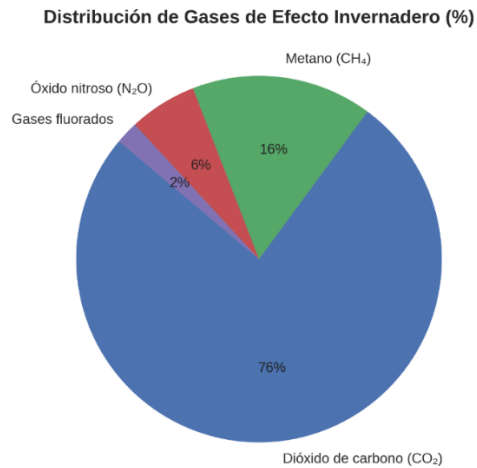
- Dióxido de carbono (CO₂), este ingresa a la atmosfera por medio de las diferentes actividades como la quema de combustibles fósiles, residuos sólidos, árboles y diferentes materiales biológicos, este también se emite a la atmosfera por los diferentes procesos químicos de las industrias.
- Metano (CH₄), este se obtiene mediante procesos industriales como la producción y el transporte de combustibles fósiles, como, por ejemplo; carbón, gas natural y el petróleo. Otro fuerte generador de gas metano, son las actividades de agricultura y ganadería, esto debido a la descomposición de los diferentes residuos orgánicos en rellenos sanitarios.
- Óxido nitroso (N₂O), este se emite durante las diferentes actividades de carácter agrícola e industrial, también se encuentra ligado a las actividades de

combustión de combustibles fósiles y residuos sólidos durante las etapas de tratamiento de agua residuales

- Gases fluorados, dentro de estos se encuentran diferentes clases, tales como los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos, el hexafluoruro de azufre y el trifluoruro de nitrógeno, estos hacen parte de los gases de efectos invernaderos, sin embargo, son de carácter sintéticos, los cuales son obtenidos y emitidos por medio de procesos industriales. Estos gases generalmente son emitidos en pequeños porcentajes comparados con los otros, pero su capacidad para actuar en la contribución del calentamiento global es potente, por lo cual son conocidos como gases de alto potencial de calentamiento global.

El potencial de un gas de efecto invernadero radica en el cálculo de cuánto tiempo este permanece en la atmósfera y su capacidad de absorber energía, aquellos con un potencial alto absorben mayor energía por kilogramo que los que tienen un bajo potencial, por lo tanto, los primeros afectan más al calentamiento de la tierra. En la siguiente gráfica, se evidencia el porcentaje de los diferentes tipos de gases de efecto invernadero presente en la atmósfera

Figura 5. *Porcentaje de los gases de efectos invernadero en las emisiones.*



Nota: *Realizado por autores*

La concentración de emisiones de gases de efecto invernadero generalmente se expresa en partes por millón (ppm), sin embargo, puede representarse en partes por mil millones (ppb) o incluso en partes por billón (ppt), según el nivel de detalle requerido. Para dimensionar estas unidades, puede compararse una parte por millón con una sola gota de agua diluida en aproximadamente 50.000 mililitros de líquido.

Las altas concentraciones de estos gases resultan nocivas para el desarrollo de los ecosistemas terrestres. Además, su permanencia en la atmósfera varía desde unos pocos años hasta varios miles, lo que les da el tiempo suficiente para mezclarse de manera uniforme en la

capatmosférica. En consecuencia, su concentración es prácticamente la misma en cualquier lugar del mundo, sin importar el origen de las emisiones.

Esto explica por qué el cambio climático y el control de las emisiones constituyen una problemática global que requiere la atención de toda la población.

En la siguiente tabla se presentan las principales características de estos gases, incluyendo aspectos como su vida media, eficiencia radiactiva y potencial de calentamiento global.

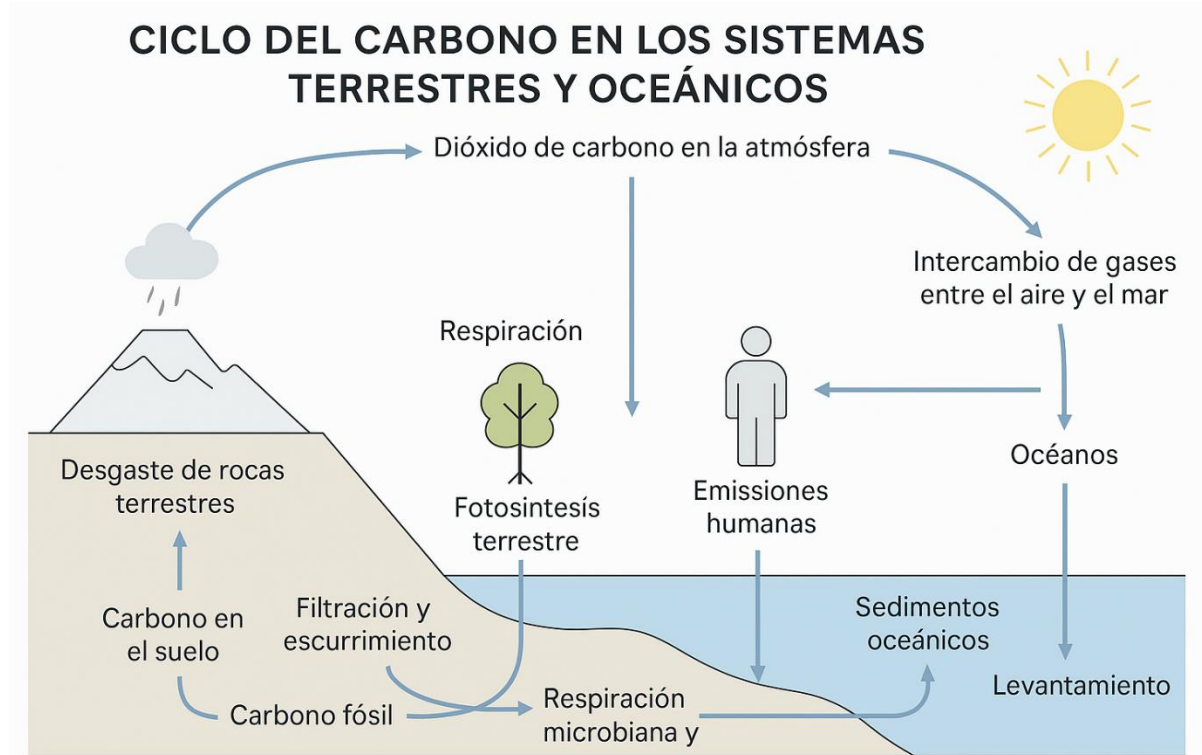
Tabla 1. Vida, eficacia radiactiva y potenciales de calentamiento mundial directo (PCM)(excepto el CH₄)

Nombre industrial (o común)	Fórmula química	Vida en la atmósfera (años)	Eficiencia radiactiva (W m ⁻² ppb ⁻¹)	Potencial de calentamiento mundial para el tiempo dado de horizonte
			W:	20-años
Dióxido de carbono	CO ₂	12	1,37	81
Metano	CH ₄	12	0,0037	84
Óxido nitroso	N ₂ O	121	0,030	264
Sustancias controladas por el Protocolo de Montreal				
CFC-11	CFCl ₃	52	0,25	6900
CFC-12	CF ₂ Cl ₂	102	0,32	11,400
H0.11	CH ₃ F	–	0,18	690
Halon	CH ₂ Cl ₄	38	0,18	500
Tetracloruro de carbono	CCl ₄	33	0,18	2060
Cloroformo de metilo	CH ₃ Cl	33	0,18	280
CH₃Cl	CH ₃ Cl	31	0,11	2060
HFClorhoro de metilo	CH ₃ ClF	33	0,08	2060
HFC-243c	CH ₃	–	0,13	114
Hidrofluorocarbonos				
HFC-23	CHF ₃	226	0,19	12300
HFC-32	CH ₂ F ₂	5,4	0,11	0,12
HFC-125	C ₂ HF ₅	0,11	0,17	233
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	13	0,47	660

HFC-134a	CH ₂ FCF ₂	0,73	0,46	677
HFC-137	CH ₃ CF ₃	0,14	0,88	829
HFC-134a	CH ₃ CF ₃	0,10	0,67	677
HFC-134c	CH ₃ FCFF ₃	0,03	0,57	88
CF₄	CF ₄	0,10	0,10	4890
Compuestos perfluorados				
CF₄	CF ₄	50,000	0,10	4880
C₂F₈	C ₂ F ₈	100,000	0,27	8280
C₄F₁₀	C ₄ F ₁₀	2600	0,47	685
O₆F₁₄	O ₆ F ₁₄	1000	0,57	866
SF₆	SF ₆	–	0,30	7620
NF₃	NF ₃	–	0,24	–
Compuesta halogenoide	HFC-245fa	5,5	0,28	856

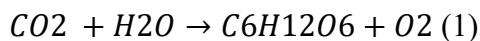
2.5. Depósitos naturales de CO₂

Dentro de los ciclos regulatorios que suceden en la tierra, se tiene el ciclo de carbono, el cual permite regular las emisiones de este, uno de los factores preponderantes en este ciclo son los depósitos naturales o sumideros de carbonos; este no es más que un depósito que está en la capacidad de absorber el carbono de la atmosfera, contribuyendo a la reducción de CO₂ del aire, sin embargo, las diferentes actividades industriales no facilitan este proceso, al contrario, los sumideros naturales no se ven en capacidad de absorber toda la concentración con tal velocidad, lo cual lleva al consecuencias como el calentamiento global. Dentro de los sumideros naturales de CO₂ se pueden destacar los ecosistemas terrestres y oceánicos los cuales atrapan gran porcentaje de emisiones producidas por el ser humano. Todo este proceso de captura natural de carbono hace parte del ciclo biogeoquímico de este, donde ocurre un intercambio del carbono entre la atmosfera de la tierra, mares y suelos, esto sucede gracias a los diferentes seres vivos presentes en estos ecosistemas.

Figura 6. *Ciclo del carbón*

Nota: *Adaptado de: autores*

los sumideros naturales como el océano y terrenos boscosos pueden absorber alrededor del 31% de los gases emitidos a la atmósfera, a través de formas de vida tales como las algas, los corales o el plancton por medio del conocido proceso denominado como fotosíntesis, de igual manera funcionan las zonas terrestres. Con el fin de entender profundidad cómo funcionan los procesos de secuestro de carbono a través de los sumideros, es necesario explicar el proceso de la fotosíntesis; el cual mediante la utilización de dióxido de carbono y energía solar se produce oxígeno y carbohidratos siendo de gran ayuda para la vida en la tierra. En la siguiente ecuación se evidencia el proceso químico que ocurre con este fenómeno, usando como catalizador del proceso la luz sola



3. Almacenamiento de CO₂

En la actualidad, el almacenamiento de CO₂ se ha convertido en un mecanismo crucial para reducir las consecuencias de los gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre. Este proceso se centra en la captura del CO₂ y su posterior almacenamiento. En este capítulo, se analizarán las distintas técnicas de almacenamiento de CO₂, considerando aspectos como el impacto ambiental, estimaciones de costos y otros factores relevantes que son influyentes.

El almacenamiento de CO₂ tiene un impacto positivo en las consecuencias que trae consigo las altas concentraciones de los gases de efectos invernadero, donde se destaca una mejor calidad del aire, reducción del efecto invernadero, prevención de fenómenos como la acidificación oceánica. Es importante destacar que las tecnologías de almacenamiento de CO₂ son técnicas “maduras” debido a que están basadas en las desarrolladas a lo largo de los años en la industria de los hidrocarburos, Aparte de la funcionalidad que se le puede dar a estos en ramas como las del recobro mejorado, por lo tanto, el almacenamiento y posterior utilización del CO₂ son tecnologías preponderantes para el desarrollo de la industria de hidrocarburos y sostenibilidad ambiental del planeta tierra.

Dentro de las principales opciones para el almacenamiento, se encuentran algunas como el almacenamiento geológico y oceánico, la carbonatación mineral, los cuales serán profundizado posteriormente.

3.1. Fuentes y oportunidades del almacenamiento de CO₂

En la actualidad existen innumerables fuentes que contribuyen diariamente a las altas concentraciones de CO₂ en la atmosfera, especialmente las zonas de carácter industrial o próximas a estas. A partir de lo anterior, es importante relacionar geográficamente el concepto de las fuentes y las oportunidades de almacenamiento. Por lo cual se plantean los siguientes conceptos claves para entender esta relación (fuente-oportunidades);

- La distribución mundial en la que se encuentran las grandes fuentes de emisiones de CO₂ se relacionan con las áreas de influencia industrial, entre las cuales se destaca aquellas que generan energía y las opciones para almacenamiento geológico.
- La proximidad entre las fuentes y los sitios destinados para almacenar CO₂ es crucial en el desarrollo de manera eficiente del almacenamiento. Para esto es importante remitirse inicialmente a las fuentes, tales como centrales eléctricas y/o plantas industriales que se pueden encontrar en un radio cercano al lugar donde las condiciones son propicias para el almacenamiento, disminuyendo no solo costos, si no todos los riesgos asociados al transporte.
- Evaluación geológica detallada con la finalidad de analizar las zonas idóneas de almacenamiento, teniendo en cuenta datos petrofísicos del yacimiento, tales como la porosidad, la permeabilidad, estabilidad de las formaciones, entre otras características.

Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente, la cercanía de las fuentes de emisiones de CO₂ junto con la evaluación de los posibles lugares de almacenamiento, constituyen un factor clave en el desarrollo de esta técnica, debido a que puede reducir significativamente ciertos riesgos asociados a la operación.

3.2. Almacenamiento geológico

Existen diferentes zonas las cuales cumplen con las características necesarias para el idóneo almacenamiento, entre estas principalmente se destacan los yacimientos de hidrocarburos, formaciones salinas profundas y las capas de carbón inexplorable. Estos son considerados debido a la presencia de porosidades en las rocas, lo cual les da la capacidad de retener, un ejemplo claro de esto, son aquellos yacimientos que previo a su explotación almacenaban hidrocarburos o salmuera. Estas formaciones, pueden aparecer en cuencas sedimentarias marítimas y terrestres, las capas de carbón también son zonas en las cuales con la permeabilidad suficiente y sin futuras explotaciones cumplen con los criterios para el almacenamiento de CO₂.

3.3. Tecnología para el almacenamiento

Dentro de los mecanismos por los cuales es posible que el CO₂ sea almacenado en las diferentes zonas idóneas para su retención, se encuentra la inyección en las diferentes formaciones geológicas, debido a que forma parte de los mecanismos utilizados en la industria de los hidrocarburos, constituyendo así una técnica ampliamente utilizada. Para el almacenamiento se tiene en cuenta algunas técnicas como; la perforación de pozos, inyección de fluidos y la creación de modelos de simulación para determinar la dinámica de aquellos prospectos a depósitos, así mismo se incluye el monitoreo y vigilancia, con el fin de observar los diferentes factores que afectan el depósito.

Dentro de las diferentes técnicas que ofrecen un apoyo a la curva de aprendizaje de la inyección del CO₂ en formaciones geológicas, es posible encontrar; el almacenamiento de gas natural, la inyección de fluidos líquidos que inicialmente eran desechados porque no cumplían un papel relevante en los procesos de la explotación de hidrocarburos y la eliminación de aquellos

gases ácidos, los cuales ofrecen el ambiente necesario para la corrosión, dentro de los cuales se encuentran el CO_2 y H_2S .

A partir de lo expuesto anteriormente, en términos generales se espera que para el almacenamiento de CO_2 se encuentren predispuestos depósitos de hidrocarburos depletados o en su defecto domos salinos. Los domos salinos son formaciones constituidas por sal, generando un gran reto para la inyección de fluidos. Es importante recalcar que una profundidad estimada para el óptimo almacenamiento es de alrededor de los 800 metros de profundidad, debido a parámetros relevantes como la presión y la temperatura, los cuales se estima que estarán lo suficientemente elevados para que el CO_2 se encuentre en estado líquido o supercrítico. La densidad del CO_2 a estas condiciones puede oscilar entre los valores del 80 al 50 por ciento de la densidad del agua lo cual se puede asociar con las condiciones de densidad de algunos tipos de crudos. Esta última relación se tiene en cuenta debido a las diferentes fuerzas a las que se ven sometidos los crudos que van hacia la dirección de la superficie terrestre, donde se puede resaltar, en el caso del almacenamiento geológico la importancia de un sello que obstruya fugas en las zonas de depósitos.

Al momento de la inyección del CO_2 , este se encuentra comprimido y llena los pequeños espacios porosos a través del desplazamiento parcial de aquellos fluidos originales de la roca. En las formaciones productoras de petróleo y gas la inyección de CO_2 permite la migración de los fluidos originales haciendo más fácil su explotación, mientras que, en las formaciones salinas, las estimaciones del volumen potencial de almacenamiento son un poco más bajo, debido a la reducción de porosidad.

Analizando los posibles procesos de retención que se pueden dar en las zonas de almacenamiento, se puede destacar la retención física y geoquímica, centrándose en la primera, destacando el papel de las rocas arcillosa sobre las formaciones de almacenamiento, adicional a

esto, una contención física adicional es la que ejerce las fuerzas capilares sobre el fluido, en este caso el CO_2 . En conclusión, la retención física es toda aquella obstrucción ya sea por las diferentes formaciones o por fenómenos físico que no permiten que el CO_2 salga a superficie. De igual manera, en la retención geoquímica, se destacan todas las reacciones químicas en las cuales el CO_2 reacciona con los fluidos que se encuentran inicialmente en la formación. Dentro de los ejemplos de estas reacciones, se tiene en cuenta cuando se encuentra con presencia de agua connata, el CO_2 se disuelve en el agua, es un proceso que necesita una amplia escala de tiempo, periodos de cientos a miles de años, esta mezcla adquiere una mayor densidad, lo que permite que el CO_2 no ascienda a la superficie, sin embargo esta reacción requiere de mucho tiempo y depende de las condiciones en las que se presenten el CO_2 para diluirse en agua connata, por lo cual no es una reacción que esté presente siempre que se realicen los procesos de almacenamiento, es mejor que se considere como una retención adicional.

Otra de las reacciones que representa una retención, es cuando el CO_2 reacciona con los minerales de las formaciones formando especies iónicas, teniendo así luego de estimado periodo de tiempo los carbonatos sólidos. Otro tipo de reacción es cuando se produce la adsorción del CO_2 por forma preferencial de rocas sedimentarias formadas a partir de arcillas compactadas o por el carbón, en estos casos el fluido permanecerá contenido mientras variables como presión y temperatura se mantengan estables.

3.4. Selección de lugares idóneos de almacenamiento de CO_2

En la selección de las zonas idóneas para el almacenamiento del CO_2 es importante considerar diferentes criterios. Inicialmente se debe considerar la caracterización de la zona, donde se debe incluir variables como la profundidad, temperatura, integridad y capacidad de inyectabilidad. Para

posteriormente considerar el comportamiento de estas zonas luego de ser almacenado el CO₂, con la finalidad de seleccionar el mejor prospecto de almacenamiento.

Para el estudio de las zonas de interés, existen diferentes métodos aplicados en la industria de los hidrocarburos, utilizando tecnologías como registros de integridad, pruebas de bombeo o circulación, softwares relacionados con yacimientos, los cuales permitan modelar las variables de las diferentes formaciones en etapas de exploración, producción y depletadas. El análisis de estas zonas no es un trabajo fácil, para la correcta determinación del rendimiento del almacenamiento de CO₂ en diferentes intervalos de tiempo es importante considerar diferentes fenómenos tanto físico como químicos, incluyendo también aquellos relacionados con el subsuelo y la corteza terrestre, conocidos como geomecánicas.

Con el fin de profundizar más sobre los resultados que se desea obtener a partir de los criterios que destacan para la consideración de las zonas, se encuentra que para los almacenamientos geológicos o en yacimientos depletados; la zona prospecto para almacenamiento de CO₂ debe presentar una adecuada porosidad, lo que depende a su vez de factores como el espesor que se considera, el área en la que se pretende almacenar, la densidad del CO₂ y la eficiencia de todo el sistema para el almacenamiento. Otro factor para considerar es la presencia de las barreras naturales lo que evita las fugas, es decir, un sello competente que evita que el CO₂ almacenado salga de nuevo a la superficie. Con respecto a las características que permitan una inyectabilidad, destaca el diseño que se desarrolle para la inyección e igual de importante que se encuentre una buena permeabilidad para permitir el flujo del fluido a través de la formación geológica.

Todo lo que conlleva el análisis de los criterios planteados con anterioridad permite asegurar en la medida de los posibles la idoneidad de las zonas de almacenamiento, teniendo en cuenta las

características los procesos y fenómenos que faciliten o en su defecto, dificulten el almacenamiento del CO₂.

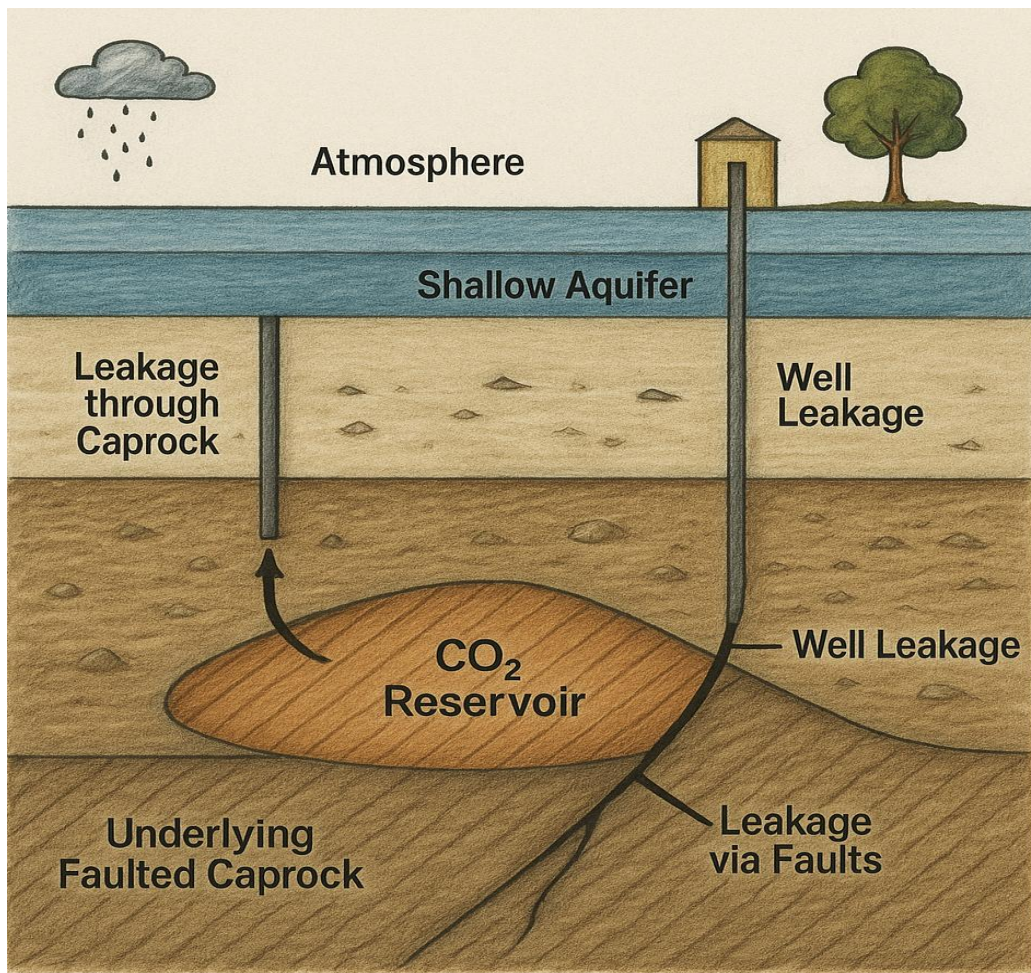
3.5. Análisis de la incidencia ambiental

Algunos de los riesgos que destacan por las grandes fracciones de CO₂ en atmosfera terrestre son el acelerado calentamiento global y todas las consecuencias que la anterior acarrea, por lo cual las diferentes técnicas para disminuir estas emisiones se encuentran tan relevantes en los últimos años, dentro de las cuales se destaca el almacenamiento. Es así como se hará el análisis de los posibles riesgos ambientales del almacenamiento de CO₂.

El principal riesgo que se encuentra asociado al almacenamiento de CO₂, es la presencia de fugas en las zonas de depósitos geológicos, en este tipo de riesgos existen dos alcances; globales y locales. Para el alcance de carácter global se definen la liberación del CO₂ de las formaciones en fracciones considerables a la atmosfera. Mientras que, si hablamos de efectos más puntuales, las pequeñas fugas ocasionadas por la densidad del CO₂, debido a diferentes escenarios; dentro de los cuales se encuentran las formaciones con un sello ineficiente o las fracturas permeables. Lo anterior trae riesgos no solo para los seres humanos, también para los diferentes ecosistemas y las aguas subterráneas.

Realizando un análisis del impacto local los riesgos del almacenamiento del CO₂, los posibles fallos en las zonas de inyección o las fugas ascendentes producen liberaciones rápidas de este fluido, las altas concentraciones de CO₂ en las fugas pueden causar grandes estragos para la salud humana, por tal razón es importante el constante monitoreo y verificación de las zonas de depósito. la contención de esta liberación de fluido puede tardar intervalos de tiempo imprecisos, desde horas hasta incluso días, de acuerdo con las condiciones presentadas.

Otro escenario en el cual es importante profundizar, es las fugas producidas por las falla o fracturas las cuales generalmente no están previstas en el diseño del almacenamiento. En esta situación el riesgo es inminente para los acuíferos aledaños y los ecosistemas en los que el CO₂ se acumule en superficie, para la primera, si el acuífero es de agua potable, el CO₂ y los desplazamientos de otros fluidos debido a este, como por ejemplo la salmuera desplazada puede afectar las reservas de aguas potables, también se habla de la posibilidad de la acidificación de los suelos por el mismo desplazamiento de algunos fluidos. Por todos los riesgos que implica las fugas en el almacenamiento de CO₂, es indispensable tener un plan eficaz de contingencia, incluso tratando de recrear las posibles rutas de escape en formaciones que no deberían tener permeabilidad.

Figura 7. Posibles fugas del almacenamiento geológico del CO₂

Nota: Adaptado de: Autores

La importancia del diseño del almacenamiento y de su implementación de manera minuciosa es la prevención de errores que lleguen a la migración de grandes concentraciones, sin embargo, existen diferentes tecnologías para monitorear la presencia de fugas para disminuir riesgos. Según los diferentes tipos de fugas existen distintos métodos para mitigarlas, así mismo existen técnicas para la eliminación de CO₂ de la superficie terrestre y las aguas subterráneas, pero

no es lo mejor llegar a esas instancias debido a que los precios son muy elevados y la eficacia no es tan alta.

Un punto de relevancia luego de la etapa del diseño e implementación es la verificación y monitoreo del almacenamiento de CO₂ para evitar fugas. Algunos de los parámetros que se deben tener en cuenta para el monitoreo de las zonas a almacenar son los índices de inyección y la presión de los pozos de la inyección más los diferentes estudios sísmicos. Otra manera de seguimiento para determinar la migración del CO₂ en la superficie es la utilización de sensores de carácter fijos o móviles para la detección de fugas. Para el seguimiento de manera subterránea se tiene como tecnologías la perforación de pozos de control con el fin de identificar anomalías, también es importante destacar la toma de registros eléctricos; la cual es una técnica no invasiva que permite determinar cambios en la presencia de CO₂. También es posible encontrar el monitoreo sísmico que se realiza a través de ondas sísmicas, las cuales tienen la capacidad de detectar los diferentes cambios en las estructuras geológicas o un método más eficaz, monitorear las ondas sísmicas generadas por los procesos de inyección de CO₂, analizando así su migración y distribución. Se destaca el análisis e interpretación de las sustancias que se encuentran en las diferentes formaciones como el de las aguas subterráneas o las diferentes sustancias que se presentan en los acuíferos para que indiquen la presencia de CO₂.

Todo lo anterior con el fin del correcto monitoreo de estas zonas que almacenan CO₂ así evitando o disminuyendo las probabilidades de fugas.

3.6. Almacenamiento oceánico

Una de las zonas más consideradas para la retención del CO₂ es el almacenamiento oceánico, que consiste en inyectar el CO₂ almacenado directamente en el fondo oceánico, en el cual quedaría

aislado durante amplios periodos de tiempo, esto puede lograrse a través del transporte del CO₂ por gaseoducto al lugar de almacenamiento, lo que se quiere es que el CO₂, luego de ser disuelto y disperso se convierta en parte del ciclo del carbono.

El almacenamiento oceánico continua hoy en día en fase experimental debido a los riesgos que implicarían para los ecosistemas oceánicos, sin embargo, se han hecho innumerables estudios teóricos, de laboratorio y simulaciones del almacenamiento oceánico del CO₂.

La superficie oceánica cubre un gran porcentaje de la superficie terrestre, alrededor del 70% y presenta una profundidad promedio de alrededor de 3.800 metros. El dióxido de carbono es un fluido soluble en agua, se produce así intercambios naturales de CO₂ entre las aguas en la superficie oceánicas y la atmosfera hasta estabilizarse. Los océanos se encuentran en la capacidad de absorber el CO₂ de la atmosfera.

“los océanos han absorbido alrededor de 500 Gt de CO₂ (140 Gt de C) de un total de 1 300 Gt de CO₂ (350 Gt de C) de emisiones antropógenas liberadas en la atmósfera durante los últimos 200 años. Como resultado del aumento de las concentraciones atmosféricas de CO₂ causadas por actividades humanas relativas a niveles preindustriales, actualmente los océanos absorben CO₂ con una intensidad de unas 7 Gt de CO₂ al año (2 Gt de C al año)”

En el siguiente cuadro comparativo se evidencia la capacidad de absorción oceánica a lo largo de los años según los diferentes estudios realizados por diferentes entes según las tendencias de últimas décadas recalculadas en los diferentes estudios:

Tabla 2. *Proyectos de almacenamiento oceánico de CO₂*

Investigación	/ Fecha	Conclusiones	Metodología
Proyecto			
Gruber et al. (Science)	2003-2013	Los océanos absorben >30% del CO ₂ antropogénico, con estabilidad porcentual, pero aumento absoluto.	Mediciones globales de CO ₂ y propiedades físico-químicas en profundidades de hasta 6 km.
Proyectos 4C y RINGO	1992-2018	Absorción anual podría ser 0.8-0.9 gigatoneladas mayor que estimaciones previas.	Corrección de datos de superficie oceánica con satélites y temperatura subsuperficial.
Estudio NASA/NCAR (Science)	2009-2018	El océano Austral absorbe significativamente más CO ₂ en verano, confirmando su rol clave.	Mediciones aéreas de gradientes verticales de CO ₂ y turbulencia atmosférica.
Müller et al. (ETH Zurich)	30 años (hasta 2020)	Disminución del 15% en la sensibilidad del sumidero oceánico, indicando debilitamiento.	Análisis de almacenamiento de carbono antropogénico en capas oceánicas profundas.
Investigación			
Proyecto			
Gruber et al. (Science)	2003-2013	Los océanos absorben >30% del CO ₂ antropogénico, con estabilidad porcentual, pero aumento absoluto.	Mediciones globales de CO ₂ y propiedades físico-químicas en profundidades de hasta 6 km.

Proyectos 4C y RINGO	1992-2018	Absorción anual podría ser 0.8-0.9 gigatoneladas mayor que estimaciones previas.	Corrección de datos de superficie oceánica con satélites y temperatura subsuperficial.
Estudio NASA/NCAR (Science)	2009-2018	El océano Austral absorbe significativamente más CO ₂ en verano, confirmando su rol clave.	Mediciones aéreas de gradientes verticales de CO ₂ y turbulencia atmosférica.
Müller et al. (ETH Zurich)	30 años (hasta 2020)	Disminución del 15% en la sensibilidad del sumidero oceánico, indicando debilitamiento.	Análisis de almacenamiento de carbono antropogénico en capas oceánicas profundas.

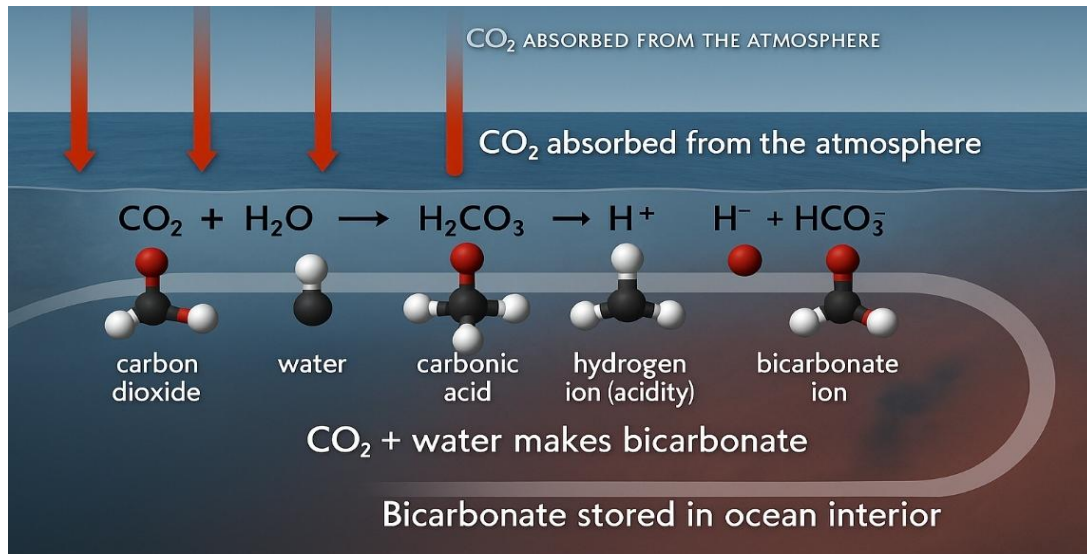
Nota: Descripción de los proyectos de almacenamiento oceánico de CO₂ más importantes

Según las tendencias de últimas décadas recaladas en los diferentes estudios se encuentran en contradicción con los diferentes estudios recientes que sugieren que la absorción podría ser de alrededor 20%, esto gracias a la evolución de las metodologías, sin embargo, todavía se encuentra en estado de prueba. Existen contradicciones sobre los estudios realizados a las oportunidades para disminuir el CO₂ de la atmosfera terrestre, uno que afecta negativamente es el debilitamiento de los sumideros, según el estudio realizado el 17 de agosto del año 2023 por el doctor Jes Daniel Müller (ETH Zurich) la eficiencia oceánica disminuye por efectos de la saturación química y los cambios climáticos.

También son importantes factores para considerar como la variabilidad regional, zonas como el océano austral es un sumidero relevante debido a que es el responsable del 40 % del CO₂

absorbido globalmente, sin embargo, este nivel de absorción no es el mismo en todas las zonas oceánicas mundiales.

Figura 8. *Océano como almacén de CO₂. Fuente: Autores*



Nota: Adaptado por autores.

Es importante recalcar que no existe un límite estipulado físico de la cantidad de CO₂ antropógeno que es posible almacenar en el océano, esta cualidad se verá atada al equilibrio oceánico con la atmósfera;

“La estabilización de las concentraciones atmosféricas de CO₂ entre 350 y 1 000 ppm su pondría que, con el tiempo, habría entre 2 000 y 12 000 Gt de CO₂ en el océano si no se realizara una inyección de CO₂ intencional”

De lo anterior es posible concluir que esta última cifra se considera el límite superior del océano para una inyección activa, lo cual también se puede ver afectado por los diferentes factores ambientales y el cambio de pH que se puede admitir. Esta fracción que se encuentra inyectada en

el fondo oceánico puede durar intervalos de tiempos bastantes amplios. En el contexto ambiental en el que se encuentra el mundo actualmente en el marco medioambiental, surge la siguiente pregunta ¿es posible aumentar la inyección teniendo en cuenta el tiempo que necesita para equilibrarse el océano? Incrementando la fracción retenida a través de la formación de hidratos de CO₂ en el fondo oceánico dando lugar a la opción de disolución de minerales alcalinos, los cuales se utilizan para neutralizar el CO₂ que se encuentre ácido. Esta disolución de los carbonatos puede aumentar la escala cronológica del almacenamiento a intervalos de miles años, disminuyendo riesgos de alterar el pH oceánico y la presión parcial de dióxido de carbono.

3.6.1. Impactos ambientales del almacenamiento oceánico CO₂

La inyección de CO₂ en los fondos oceánicos puede producir cambios en la composición química, ahora si esta incrementa de manera considerable pasando de pocas gigatoneladas de CO₂ a cientos de estas, el cambio será muy evidente, desde la zona de inyección hasta un amplio radio causando consecuencias en el volumen oceánico.

Se han realizado variedad de estudios enfocados a la viabilidad en el marco ambiental sobre las posibilidades de inyección oceánica del CO₂, en la siguiente tabla se evidencia los nombres de los diferentes proyectos, los años en los que se llevaron a cabo y los principales riesgos identificados:

Estudio/Proyecto	Año	Riesgos identificados	Metodología
Gary Shaffer (Nature Geoscience)	2010	Acidificación del agua, daños a la cadena alimenticia marina y riesgo de fugas masivas por corrientes	Simulación de almacenamiento a largo plazo y análisis químico
Proyecto ECO2	2012-2016	Fugas a través de sedimentos marinos, impacto en ecosistemas abisales y contaminación por pozos abandonados	Expediciones marinas y modelización de emplazamientos en mar del Norte
CNRS (Nature)	2023	Reducción de la capacidad de absorción por calentamiento global, a pesar de mayor capacidad estimada	Estudio del plancton y dinámica de "nieve marina" en columnas oceánicas
Análisis Universidad Sevilla	2023	Mortalidad inmediata en organismos cercanos a puntos de inyección y efectos crónicos no cuantificados	Revisión de experimentos a pequeña escala y modelización de fugas

Tabla 3. Riesgos identificados en los proyectos relacionados con CO₂

Dentro de los hallazgos que se presentaron a partir del análisis de las diferentes investigaciones se encuentran los siguientes;

- El impacto ambiental es crítico debido a la acidificación oceánica, afectando a la fauna y flora oceánica como los corales y moluscos, en las zonas claves para la inyección se observó el alto porcentaje de mortalidad de las especies bentónicas a 300 metros de profundidad.
- Las posibles fugas que se pueden presentar anualmente, representando entre el 1 y 3% del CO₂ almacenado, a través de fenómenos naturales como las chimeneas geológicas, la presencia de fallas estratigráficas y la turbulencia oceánica
- No se tiene claro la capacidad de almacenamiento, debido a que estudios sugieren que el almacenamiento puede incrementar 20%, sin embargo, esto hace que se reduzca la capacidad de solubilidad del CO₂ en las aguas superficiales, de donde surge el conflicto, el cual se puede denominar “eficiencia vs capacidad”
- No se ha estandarizado los niveles de máximos de acidificación permitida, los protocolos ante las fugas y consecuencias y el monitoreo de las profundidades oceánicas.

3.7. Almacenamiento en yacimientos de hidrocarburos

Esta se considera una estrategia relevante para reducir las emisiones de CO₂ en la atmósfera. En el desarrollo de esta técnica se saca provecho sobre las diferentes estructuras geológicas de gran profundidad aplicando los métodos de la industria Oil & Gas.

Algunos de los factores preponderantes con el fin de que realizar un buen almacenamiento es el de mantener condiciones de profundidad, temperatura y presión aptas para que el CO₂ se encuentre en condiciones supercríticas. Teniendo en cuenta lo antes planteado, los yacimientos

agotados de hidrocarburos cuentan con las estructuras necesarias como los sellos naturales que en su momento evitaron el paso de los hidrocarburos a la superficie.

- Profundizando sobre los parámetros necesarios para que se cumple satisfactoriamente el almacenamiento del CO₂ en yacimientos depletados, se requiere inicialmente que los yacimientos prospectos al almacenamiento presenten integridad geológica, es decir cuente con los diferentes tipos de rocas, incluyendo una roca sello apta con el fin de garantizar el confinamiento a largo plazo, evitando la posibilidad de fugas. Siguiendo a esto, se deben considerar aspectos preponderantes como la porosidad y permeabilidad, ya que la roca que funcionará como almacén debe tener suficiente porosidad para el alojamiento y la permeabilidad óptima para permitir su inyección. Con una profundidad de alrededor de los 1000 metros a condiciones de presión y temperatura mayor a los 1160 PSI y los 30°C.
- Las ventajas de la aplicación de estas prácticas es que ya se cuenta con la infraestructura existente, aprovechando así los pozos, los diferentes sistemas de inyección y los conocimientos geológicos sobre estas zonas debido a que son técnicas maduras implementadas en la industria petrolera.
- Otro punto relevante es la posibilidad y viabilidad que se ve a partir de la inyección del CO₂ en el subsuelo incrementa la presión del yacimiento lo que en teoría haría más fácil la extracción de hidrocarburos, es decir, puede ser utilizado como una técnica de recobro mejorado, sin embargo, son contados los proyectos en los que se le ve viabilidad. Algunos campos alrededor del mundo que tienen relación con esta técnica como los siguientes;
 - Campo presalino brasileño; en este se realizó un estudio utilizando la inyección miscible de CO₂ a través del modelo CMRT y corrección Koval, los cuales son claves para la simulación y viabilidad de estos proyectos. Dentro de los resultados

obtenidos se destacó que existe una producción incremental de 3865,5 barriles adicionales frente a los métodos relacionados con la inyección de agua.

- Campo Elm Coulee y Cedar Creek (Montana, EE. UU.); en este campo se desarrolla un proyecto teórico con el cual espera recuperar alrededor de los 600 millones de barriles de petróleo, con un potencial de almacenamiento de 109 millones de toneladas de CO₂.
- Campos U y T (Cuenca Oriente, Ecuador) en donde se utiliza la inyección cíclica en los reservorios maduros, con el fin de obtener la disminución de la viscosidad del crudo.
- Campo Orito (Putumayo, Colombia); en este campo se realiza un modelo dinámico con el fin de evaluar la viabilidad de la utilización del CO₂ en la formación Villeta.

Comparando las diferentes técnicas utilizadas alrededor del mundo para la utilización del CO₂ no solo para el almacenamiento si no para el aprovechamiento de este mismo, la siguiente es una tabla de los métodos mencionadas anteriormente, con las posibles limitaciones evidenciadas en los diferentes estudios y proyectos, incluyendo las ventajas que trae consigo.

Tabla 4. *Técnicas para el almacenamiento de CO₂*

Técnica	Beneficio	Controles	Factor	de
				recuperación adicional

Inyección miscible	Alta eficiencia en crudos ligeros	Requiere presiones elevadas	Hasta 26% en shale
Huff and Puff	Ideal para pozos aislados	Depende de la solubilidad del CO ₂	6-26% en yacimientos no convencionales
Inyección en shale	Adsorción competitiva (CH ₄ vs CO ₂)	Altos costos de presurización	Hasta 90% de CO ₂ almacenado

Nota: Técnicas para la inyección de CO₂ como método de recobro

3.7.1. Riesgos y desafíos

Esta tecnología de almacenamiento de CO₂ enfrenta diferentes retos tanto técnicos, económicos y regulatorios que obstruyen su implementación en proyectos a gran escala. Se pueden compactar estos desafíos en diferentes grupos, donde inicialmente rescatamos las condiciones geológicas que deben tener los reservorios para poder desempeñar el almacenamiento en estos y la heterogeneidad geológica que produce la posible migración sin control de CO₂. Teniendo en cuenta factores como la integridad de estas zonas, siempre se encuentra presente el riesgo de fuga y la alteración de la roca por procesos de la inyección.

Centrándose un poco en los procesos económicos, se destaca los costos elevados de los procesos de captura y siguiente a este del transporte, requieren inversiones desde los 50 hasta los 100 millones de dólares. Por último, en el aspecto legislativo no hay claridad en las normas para los procesos de captura, transporte y almacenamiento de CO₂ y mucho menos de las responsabilidades legales ante las fugas o daños ambientales.

También es importante destacar los retos sociales centrados en la aceptación pública debido a la desconfianza de la población ante los riesgos de contaminación y la falta de conocimientos científicos sobre estas tecnologías.

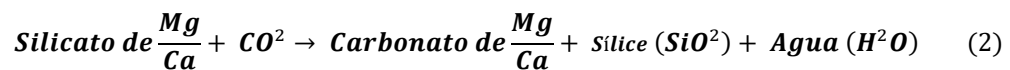
Con el fin de evitar estos riesgos se plantean diferentes perspectivas de solución incluyendo la creación de las políticas públicas y educación ambiental.

3.8. Carbonatación mineral

A partir de la necesidad de almacenar el CO₂, surge una técnica prometedora a través de la carbonatación mineral; este proceso sugiere en transformar el CO₂ en minerales estables tales como los carbonatos inorgánicos sólidos mediante diferentes procesos químicos.

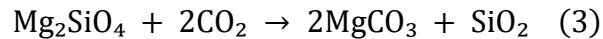
Profundizando un poco sobre la carbonatación mineral y su proceso, el cual se refiere a la fijación del CO₂, mediante el uso de óxidos alcalinos y alcalinotérreos, para esto es importante la inicial selección del mineral, generalmente se utilizan silicatos de calcio (Ca) o magnesio (Mg) por la capacidad que poseen de ser propensos a reaccionar con el CO₂, dentro de las cuales se pueden destacar las rocas de silicatos como olivina ((Mg,Fe)₂SiO₄), serpentina (Mg₃Si₂O₅(OH)₄) y wollastina (CaSiO₃) en las cuales están presentes el óxido de magnesio (MgO) y el óxido de calcio (CaO). El resultado de estas reacciones son compuestos químicos como el carbonato cálcico (CaCO₃) y el carbonato de magnesio (MgCO₃).

Los procesos químicos por los cuales ocurre la carbonación mineral se llevan a cabo mediante la siguiente reacción



La carbonación mineral da como resultado sílice y carbonato los cuales se mantienen estables en intervalos amplios de tiempo. Algunos ejemplos específicos de las reacciones son:

➤ Olivina



Esta reacciona con el CO_2 cuando se encuentra en presencia del agua dando como resultado carbonato de magnesio y sílice. Detallando sobre la reacción, inicialmente el CO_2 se disuelve en el agua para formar ácido carbónico (H_2CO_3), el anterior se disocia en iones de bicarbonato (HCO_3^-) y protones de hidrogeno. Luego de esto los iones de la reacción atacan la Olivina, liberando los iones de magnesio y sílice y en la etapa final de la reacción general se hace la formación de carbonato al reaccionar los iones de magnesio con los del bicarbonato, teniendo como resultado carbonato de magnesio.

➤ Serpentina



Otro ejemplo, es el de la serpentina, sin embargo, la reacción es similar, por lo tanto, no se profundizará sobre esta.

Gracias a los procesos de carbonatación la disminución del CO_2 en la atmosfera, el proceso de carbonatación mineral se puede producir como fenómeno natural denominado como

“meteorización” este es un proceso muy lento, por lo que para ser viable es necesario la optimización del tiempo para que se complete este fenómeno y transformarlo en un medio de almacenamiento para el CO₂ de fuentes antropógenos. Los diferentes estudios e investigaciones se centran en encontrar tecnologías para acelerar las reacciones, donde se destacan el uso de la molienda ultrafina.

3.8.1. Técnicas para la optimización de la carbonatación mineral

➤ Molienda ultrafina

La tecnología de la molienda ultrafina se encuentra caracterizada por la disminución del tamaño de las partículas a escalas de micrones provocando así el aumento del área de contacto, también reduce las barreras energéticas y aumenta la velocidad de los procesos para que se dé la carbonatación, todo lo anterior con el fin de mejorar la eficiencia para las reacciones químicas y por ende optimiza la captura de CO₂.

Dentro de los procesos para la molienda ultrafinas se destaca las mecánicas, los cuales son molinos de altas energía, en donde prima la aplicación de fuerzas de impactos y la fricción. También se encuentra la molienda húmeda la cual reduce el diámetro de las partículas a partir de la suspensión líquida, minimizando la aglomeración y teniendo el control preciso sobre el tamaño de las partículas.

Algunos de los desafíos que se encuentran con esta tecnología son el alto consumo energético, el control de los parámetros para la molienda con el fin de evitar la aglomeración de partículas y el mantenimiento de equipos especializados. Dentro de las diferentes tecnologías en

el uso de la molienda se destacan las asistidas por ultrasonidos, las que combinan los procesos mecánicos y químicos y aquellas que usan aditivos para el control de los procesos.

➤ Uso de catalizadores

Los catalizadores son sustancias que tienen como finalidad acelerar la velocidad de una reacción química haciendo que disminuya la energía la cual es necesaria para que suceda dicha reacción, teniendo el previo concepto en cuenta el uso de catalizadores en la carbonatación mineral es una técnica importante para que se dé la interacción entre el CO_2 y los minerales.

Existen diferentes tipos de catalizadores que son eficientes para la reacción que se necesita, dentro de los cuales se encuentran;

- Los ácidos orgánicos, dentro de los cuales se destacan el ácido oxálico ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$) o el ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) estos son capaces de formar complejos solubles en los iones de calcio y magnesio, provocando así la estructura mineral.
- Catalizadores inorgánicos; el cloruro de sodio (NaCl), bicarbonato de sodio y sulfatos, los cuales tienen el propósito de aumentar la concentración de los iones en la solución lo que acelera la disolución del mineral.
- Catalizadores biológicos, como las enzimas presentes en los microorganismos, un ejemplo de este es la anhidrasa carbónica, acelerando la conversión del CO_2 en iones bicarbonato dando paso a la reacción con los metales, generalmente son usados en los procesos relacionados a bio minerales.

El uso de los catalizadores y de sus resultados dependen de las condiciones del medio en el que sean utilizados, factores que se deben tener en cuenta son la temperatura; la cual debe estar en los rangos de 50 a 200°C esto con el fin de activar las zonas reactivas del mineral. También es

necesario considerar la presión, la cual debe ser moderada para que se realice una correcta disolución de CO₂, para esto debe estar entre los 145 a 725 psi. Por último, otro punto a considerar es el medio en el que se realice toda la reacción de los catalizadores.

El fin del uso de estos catalizadores se ve centrado en la reducción significativa del tiempo de la reacción, lo que se asocia a un aumento de la eficiencia y un menor consume energético. Dentro de los posibles retos asociados a los catalizadores en los procesos de carbonatación mineral se destaca los costos y el impacto ambiental debido a que esta técnica que puede generar residuos corrosivos.

El futuro de la implementación de la carbonatación mineral se ve centrado en la investigación de catalizadores nanoestructurados y en los sistemas que combinan el uso de calor y ácidos, buscando el uso de la carbonatación mineral industrializado.

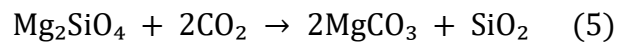
3.8.2. Energía térmica

El uso de la energía térmica para la carbonatación mineral ofrece como resultado la superación de las barreras cinéticas mejorando así el proceso. El papel de la energía térmica se hace evidente al momento de activar las reacciones que forman carbonatos más estables, esta energía se encuentra elevada para la activación de los minerales vírgenes que la forman por lo que el calor agregado reduce estas barreras, facilitando que se dé la ruptura de los enlaces químicos acelerando el proceso de la liberación de los iones Mg²⁺ o Ca²⁺.

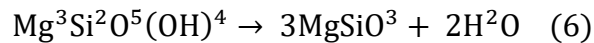
Existen diferentes técnicas para el uso de la energía térmica en la reacción, donde es posible destacar las siguientes

- Carbonatación directa, la cual actúa con una temperatura desde los 100 hasta los 200°C lo cual hace que aumente la movilidad molecular, acelerando el proceso de la disolución del CO₂ y a su vez la reacción con los minerales.

Un ejemplo de este con la Olivina y el uso de la energía térmica como acelerador del proceso es que usando una temperatura de alrededor de 150°C la reacción aumenta su velocidad de diez a cien veces más que a temperatura ambiente.



Pretratamiento térmico, este consiste en agregar energía térmica para eliminar los grupos de hidroxilo (OH), un ejemplo de este proceso es con el mineral serpentina, este se deshidrata como se puede ver en la siguiente reacción



También es posible encontrar métodos combinados con el fin de optimizar aún más este proceso, un ejemplo de esto es el uso combinado de catalizadores con el fin de mejorar la eficiencia de los ácidos orgánicos.

La inyección en sitios geotérmicos consiste en aprovechar el calor natural del subsuelo con el fin de acelerar los intervalos de tiempo de la mineralización del CO₂ en basaltos.

La carbonatación mineral y el uso de aceleradores en este proceso, como es el caso de la energía térmica contribuye principalmente con la disminución de la reacción de años a días, de igual manera ofrece que el 90% del CO₂ pueda mineralizarse en las condiciones requeridas.

Al momento de analizar la viabilidad del uso de la energía térmica se definen algunas limitaciones como el costo que esta implica, debido a que el calentamiento requiere de mucha energía y más en procesos industriales, también es posible destacar que las temperaturas que no se encuentren moderadas pueden desestabilizar los carbonatos formados.

Tabla 5. *Parámetros para la eficiencia de los catalizadores térmicos*

Parámetro	Rango Típico
Temperatura (directa)	100–200°C
Temperatura (indirecta)	500–700°C (pretratamiento)
Eficiencia de captura	70–90% (en condiciones óptimas)

Nota: En la tabla se discrimina los rangos de temperatura

3.8.3. *Proyectos de carbonatación mineral*

A lo largo de los años se han realizado diferentes estudios, desafíos encontrados y avances científicos relacionados con esta tecnología

Tabla 6. *Estudios de la carbonatación mineral alrededor del mundo*

Proyecto	Objetivos	Resultados	Eficiencia
Carbon dioxide disposal in carbonate minerals (estudio)	Planteó por primera carbonatación mineral como método de almacenamiento de CO ₂	Se demostró que minerales como la serpentina y la olivina están en la capacidad de capturar a gran escala el CO ₂	-
CarbFix Islandia (Proyecto)	Almacenar CO ₂ en formaciones	El 95% del CO ₂ inyectado en un tiempo de dos años muchísimo	95 %

basálticas mediante mejor al estipulado inicialmente
 inyección en el (siglos)
 subsuelo Energía geotérmica como
 catalizador de las reacciones

Wallula EE.UU (Proyecto)	Inyectar CO2 en formaciones de basalto en Washington	El CO2 se convierte en carbonato en un tiempo de dos años, validando la viabilidad de la carbonatación in situ	85 %
Accelerated carbonation of Ca/Mg-bearing minerals (estudio del MIT)	Reducción de tiempo de reacción de meses a horas	Usó catalizadores ácidos y nanopartículas para reducir el tiempo de reacción de meses a horas	90 %

Nota: Descripción de estudios realizados a nivel mundial

4. Utilización del CO₂

Diversos acuerdos han tratado de regular las emisiones de los gases de efecto invernadero para prevenir el calentamiento del planeta y así reducir posibles consecuencias negativas en el ámbito ambiental, social y cultural de los diferentes países del mundo. Algunos de estos acuerdos y los más conocidos son el Protocolo de Kioto adoptado en 1997 y el Acuerdo de Paris puesto en funcionamiento en 2015 tras el vencimiento del Protocolo de Kioto en 2020, de estos se utiliza el Acuerdo de Paris como guía para la reducción de GEI y la prevención del calentamiento global.

Algunos de los aspectos más importantes del Acuerdo de Paris es limitar el incremento global de la temperatura debajo de los 2°C con referencia a la temperatura de inicio de la era

preindustrial, así mismo el intercambio de reducción de emisiones entre países, el monitoreo y reporte de las acciones realizadas, las transferencias de tecnologías y adaptación a los nuevos desafíos ambientales constituyen desafíos que son críticos. Los aspectos mencionados permiten trabajar en la reducción de GEI para ayudar a reducir el calentamiento global.

A partir del Acuerdo de París los países de todo el mundo han adoptado diferentes tecnologías en múltiples ámbitos para disminuir las emisiones de GEI en las industrias a nivel mundial, es así como la mayoría de las tecnologías utilizadas están enfocadas en la captura y el almacenamiento de CO₂ para posteriormente transportarlo y así convertir esta materia prima en otros subproductos con un valor añadido que tienen menos impacto que el CO₂ directamente emitido, este proceso de conversión de CO₂ es denominado como utilización de CO₂. Los usos de CO₂ son una de las herramientas más importantes en la prevención de las emisiones debido a que se restringe y disminuye la circulación de los gases en el mundo y así se evitan diversos tipos de problemas que traen consigo estas emisiones.

Es así como se han implementado tecnologías para convertir el CO₂ en diferentes productos que se utilizan en el día a día de diferentes industrias, lo que ocasiona un aprovechamiento de un recurso que llega a ser contaminante en otra materia que ayuda a realizar diferentes procesos. Dichos procesos van de la mano de la sostenibilidad ambiental, economías circulares y distintos procesos que permiten denominar la utilización del CO₂ producido como un proceso verde para el medio ambiente

El concepto de sostenibilidad ambiental va de la mano con todo lo relacionado en la prevención del calentamiento global y con las emisiones de GEI, esto debido a su definición que se presenta como la “la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”

concepto dado por la Comisión Mundial sobre Medio ambiente y Desarrollo de la Organización en 1987. Es así como el concepto toma un valor muy importante en todo el tema de utilización de CO₂ ya que se debe tener un equilibrio en el desarrollo de la tecnología con la economía y la influencia directa e indirecta en la sociedad.

De igual manera se debe tener en cuenta el concepto de economía circular que es un modelo de producción y consumo que implica compartir, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales existentes para crear un valor añadido. De esta manera se aplica el concepto a la utilización de CO₂ en diferentes procesos porque permite utilizar una materia prima para producir otro producto con un valor mejorado.

Estos dos conceptos deben entrelazarse para mejorar el proceso de reincorporación de CO₂ a partir de diferentes usos en procesos industriales optimizando cada uno de los procedimientos involucrados.

Para profundizar en la conversión de CO₂ debemos tener en cuenta la captura como proceso primordial. En este trabajo de investigación se hablarán de tecnologías para almacenamiento y usos de CO₂, sin embargo, hablar sobre la captura como proceso inicial no representa inconvenientes. La captura de CO₂ es el proceso inicial para evitar las emisiones de los GEI hacia la atmosfera. Las tecnologías para la Captura de CO₂ pueden ser variables y depende del proceso al que se quiere aplicar.

Los procesos inmersos en las CCUS son variados y se están desarrollando para llegar a tener una viabilidad económica y ambiental que ayuden a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Algunos de ellos convierten el CO₂ en productos con valor añadido que se pueden usar de manera satisfactoria en otros procesos. Para la conversión de CO₂ existen diversos procesos que dan como resultado dichos productos alternativos, algunos de ellos son las reacciones

químicas conocidas como síntesis química, de igual manera se da la conversión mediante la electrocatálisis que utiliza un catalizador para aumentar la velocidad de reacción. Así mismo existen tecnologías que generan policarbonatos y combustibles fósiles.

4.1. Desarrollo del CO₂

En el contexto de la utilización de CO₂, siendo un proceso de contribución a la mitigación del cambio climático y así mismo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero es necesario abordar algunos procesos de conversión que se definen a partir de los procesos involucrados con el manejo de CO₂. Estos son:

Aquellos que necesitan una gran cantidad de energía intensiva por la existencia de los enlaces carbono-oxígeno de la molécula de CO₂ realizando este proceso con Hidrogeno para dar paso a la creación de combustibles y productos químicos. Algunos de los productos del proceso son los combustibles e-fuel que se producen a partir del Hidrogeno y CO₂ presentando una alternativa limpia que se enmarca en la sostenibilidad ambiental abordada en el trabajo de investigación.

La implementación de tecnologías para darle diversos usos al CO₂ no es una opción tan confiable para la reducción de emisiones de GEI debido a los factores que pueden ocasionar que el CO₂ se incorpore de nuevo en la atmosfera. Uno de estos factores es que algunos de los productos que se obtienen, a largo plazo pueden no retener el CO₂ de acuerdo con su función, de igual manera, la necesidad de energía para separar la molécula de dióxido de carbono genera procesos energéticamente

Sin embargo, todo lo relacionado con CCUS y en especial la utilización del CO₂ representa una buena alternativa para abordar las emisiones y así contribuir a la reducción de emisiones de

GEI y así se puede posicionar como una estrategia válida en el contexto de una economía circular, en el que podemos reutilizar esta materia prima en otros subproductos tratando de manejar la sostenibilidad ambiental.

4.2. Cadena de valor para captura y posterior utilización de CO₂

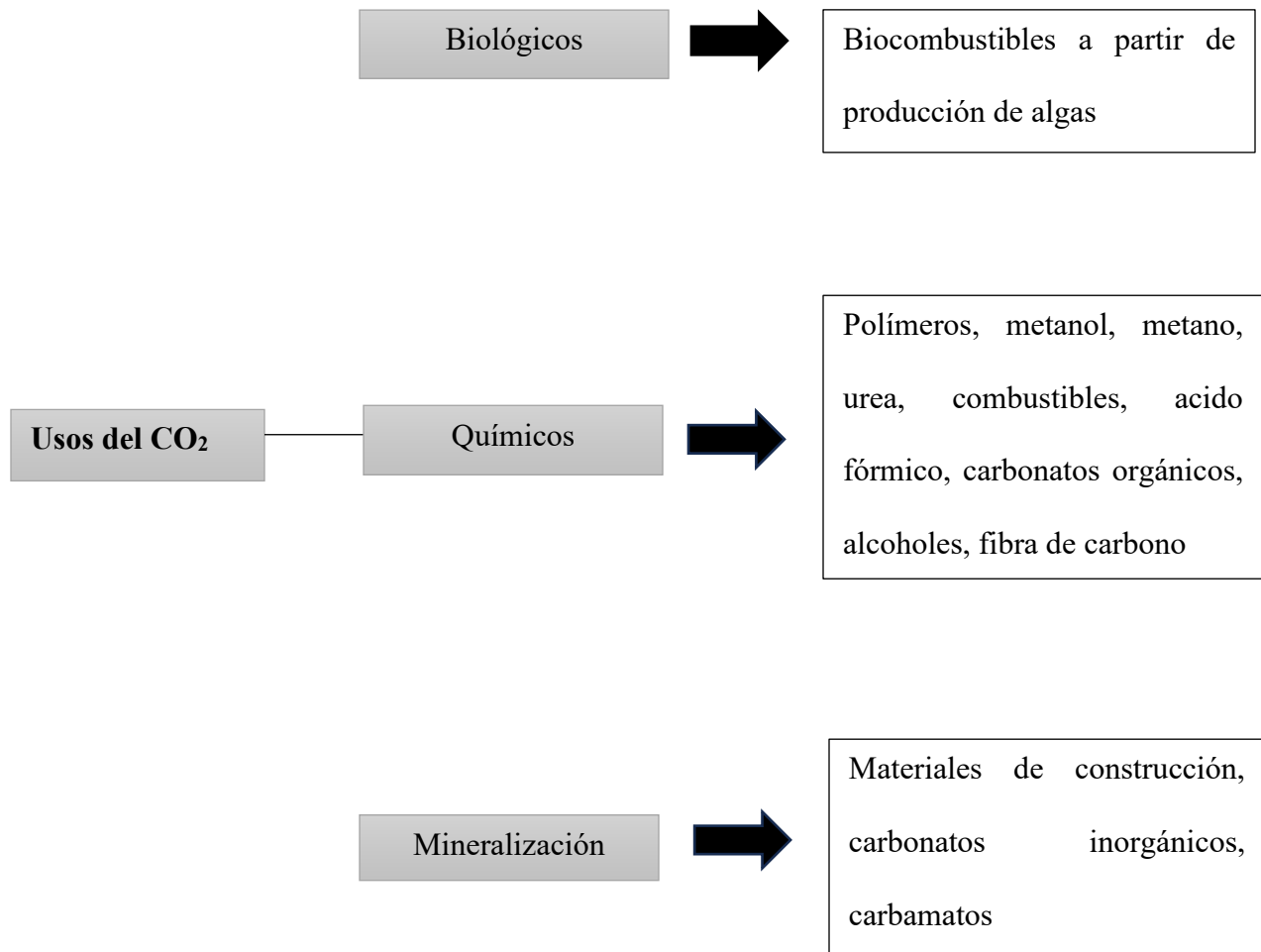
En la captura del CO₂ se necesitan ciertas características del gas para poder realizar de buena manera los procesos de conversión, además de una reducción de los costos, se deberán obtener elevadas concentraciones de CO₂ y reducidos niveles de impurezas como el H₂S.

Este proceso de conversión requiere energía y un agente reductor. El suministro de energía idealmente debe provenir de una fuente de energía renovable para así implementar el concepto de sostenibilidad ambiental, de esta manera, se puede requerir el almacenamiento de energía o hidrogeno como agente reductor. Aunque hay que tener en cuenta el desarrollo de las energías renovables para implementarlas en el proceso.

4.3. Categorías de usos de CO₂

Para todo el proceso de utilización de CO₂ después de un proceso de captura se dividieron 3 categorías principales de acuerdo con la tipología del proceso y así clasificar los usos a partir de los productos potencialmente obtenidos. Estas categorías se describen a continuación:

Figura 9. *Categorías del uso de CO₂*



En la figura 9 se muestran tres categorías en la conversión de CO₂ y cuáles son los productos que se obtienen después de aplicar la tecnología. Cada uno de estos procesos proporciona una ruta diferente para la utilización del CO₂, como el de mineralización que ayuda con mitigación del cambio climático reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta contribución se presenta porque este proceso retiene el CO₂ en los diferentes productos que se quieren obtener. En temas económicos el mejor proceso es el químico debido a las características potenciales que presentan, mejor calidad de los productos, más mercado para su desarrollo entre otras características.

A lo largo de este capítulo se ha abordado un contexto de como las nuevas tecnologías para el uso de CO₂ contribuyen al cambio climático y a la sostenibilidad ambiental, económica que se quiere obtener planteada en diferentes acuerdos a nivel internacional. Para la selección de estas tecnologías se deben tener en cuenta ciertos criterios que son fundamentales para optimizar de la mejor manera cada proceso y así evitar que los productos con CO₂ después del proceso de conversión puedan retomar al medio ambiente y así tener consecuencias negativas.

4.4. Criterios de selección

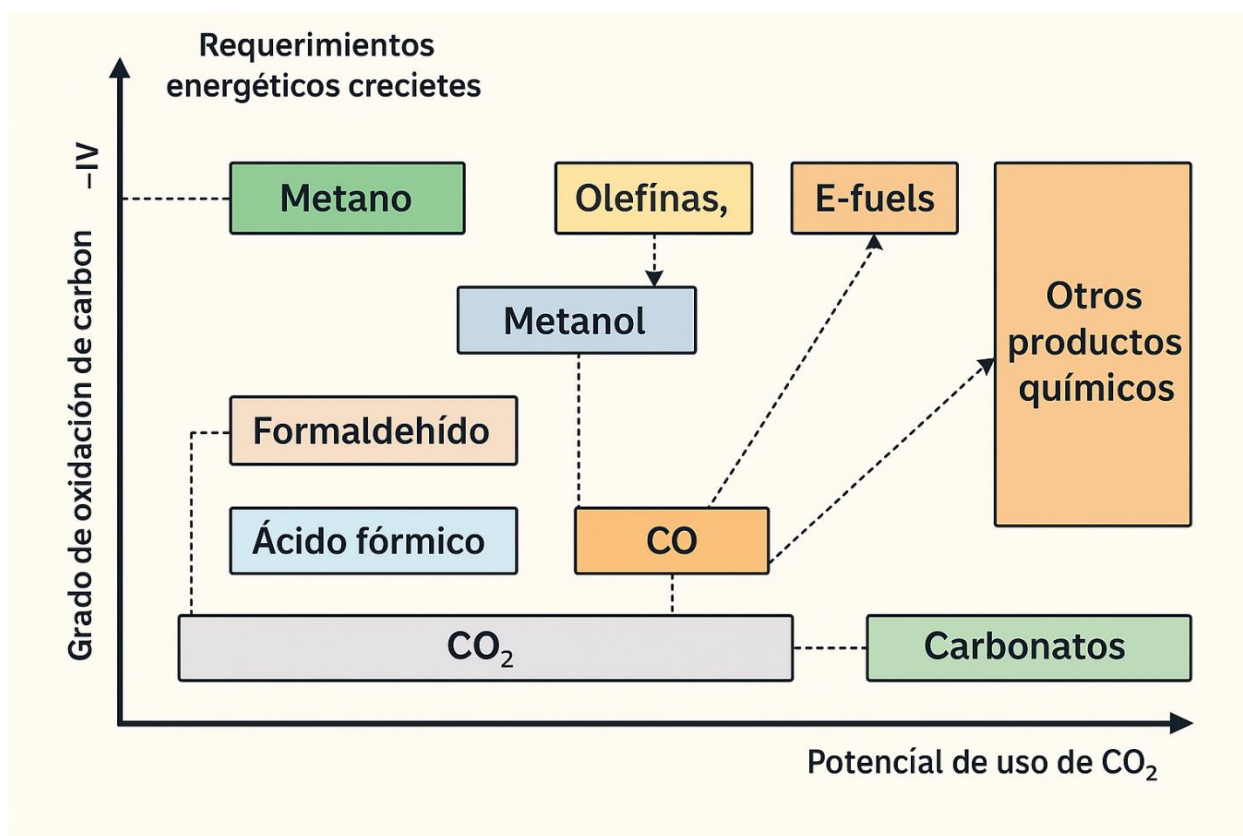
Para identificar los principales criterios de selección es necesario tener en cuenta garantías que permitan ver el potencial estratégico de cada una, de igual manera analizar las rutas de obtención de los productos a partir del CO₂. Los criterios son los siguientes

- Nivel de desarrollo de la tecnología, mediante escala de TRLs
- Valor del mercado del producto, teniendo en cuenta el precio unitario del producto, el volumen de mercado y proyección actuales
- Efectos medioambientales indirectos: reducción de impactos ambientales por sustitución de fuentes fósiles por CO₂ reciclado y aporte a la gestionabilidad y seguridad del suministro de energía eléctrica renovable
- Aspectos tecnológicos: requerimientos energéticos, consumo de H₂, pureza necesaria del CO₂ como materia prima, eficiencia del proceso y necesidades de insumos de origen local.

Estos criterios deben complementarse con una hoja de ruta que sea sostenible medioambientalmente hablando y se pueda cumplir una ruta circular para que sea rentable pero

que se pueda cuidar el medio ambiente sin generar más consecuencias negativas a partir de la conversión del CO₂ por medio de las distintas rutas.

Figura 10. *Requerimientos técnicos para la conversión de CO₂. Fuente: autores*



4.5. Escala TRLs

La escala TRLs conocida como la escala de Madurez Tecnológica es una medida que permite describir el estado de desarrollo de un proyecto. El concepto surgió en los años 70 cuando la NASA quiso evaluar que tan lejos podría llegar una de las tecnologías desarrolladas para los viajes espaciales. Es así como se configuró uno de los primeros mecanismos para identificar los requisitos mínimos de operación para llevar a cabo ciertos procedimientos. A lo largo de los años se han ido desarrollando diferentes conceptos alrededor de la idea inicial.

4.5.1. Los niveles de TRL

Para determinar esta escala y sea un proceso satisfactorio en la evaluación y utilización de nuevas tecnologías es necesario hacer una evaluación. Para hacer esta evaluación existen 9 niveles de TRL según el desarrollo

Tabla 7. *Escala de las nuevas tecnologías*

Escala	Descripción	Resultados esperados
TLR 1	Es el nivel donde el proyecto presenta un nivel de madurez bajo, acá se da inicio con la idea de innovación	Principios básicos observados
TLR 2	Se presenta una idea más aterrizada donde ya se respalda mediante la aplicación en áreas específicas	Se espera definir algunas aplicaciones con resultados validados a nivel de prueba de concepto
TLR 3	Se realizan pruebas enfocadas a determinar la viabilidad y factibilidad técnica de la tecnología	Encontrar resultados cuantitativos para observar eficiencia y eficacia de la tecnología
TLR 4	Este nivel busca identificar diferentes componentes individuales	Tener un prototipo que pueda dar

que tengan la capacidad para actuar de certeza y evaluar a manera integrada en el sistema de escalas sus ventajas. Este aplicación prototipo debe dejar medir las ventajas competitivas.

TLR 5 Se identifican los elementos básicos que innovan en ka tecnología, llegando a una configuración final de la tecnología que es muy similar, en este punto se se puede simular en una situación real

Validaciones de la simulación en un ambiente real verificando las ventajas y desventajas de la tecnología

También se definen aspectos de seguridad, limitaciones ambientales y aspectos regulatorios

TLR 6 Se tienen prototipos pilotos con capacidad para desarrollar las funciones necesarias de un sistema, superando pruebas de factibilidad a condiciones de operación o funcionamiento real

La tecnología puede funcionar en condiciones reales, por ejemplo, a nivel industrial

TLR 7	La tecnología se encuentra muy cerca de operar a escala comercial, se puede identificar los aspectos relacionados con la fabricación, evaluación económica de dicho proceso que involucra la tecnología	En este punto la tecnología se ha mejorado y existen valoraciones financieras que dan viabilidad a la tecnología, de igual manera se dan validaciones en un entorno real
TLR 8	En esta parte los sistemas se encuentran integrados y han sido probados en su parte final, en muchos casos se ha alcanzado el desarrollo final de la tecnología	Se presenta un prototipo en el cual se pueden medir resultados medibles reales a condiciones de operación
TLR 9	Por último, la tecnología está en su fase final y es operable en muchas condiciones operativas, los productos generados se encuentran disponibles para su comercialización	Entrada al mercado

Nota: descripción de los niveles para la evaluación de una nueva implementación

4.6. Tecnologías inmersas en la obtención de los productos

4.6.1. *Electrocatalisis del CO₂*

Es un proceso en el que se reduce el dióxido de carbono a partir de electrodos y catalizadores para la obtención de diferentes productos como metano, metanol, entre otros. En esta tecnología el intercambio de electricidad permite separar los productos debido a los electrodos presentes y los catalizadores permiten aumentar la velocidad de reacción. Este proceso involucra los siguientes elementos:

- **Cátodo:** es donde ocurre la reacción dando paso a los nuevos productos
- **Ánodo:** En este elemento se da la oxidación
- **Electrolito:** Es el medio conductor iónico por el cual se transmiten los iones para la transformación del CO₂
- **Catalizador:** Es el equipo que permite mejorar la selectividad y eficiencia del proceso

Este proceso sigue la siguiente ruta: el primer paso es adsorber el CO₂ en el electrocatalizador, seguido a esto se presenta la transferencia de electrones y protones ocasionando la formación de especies intermediarias como CO₂⁻. Como tercer lugar se da la conversión dependiendo la ruta de conversión. Por último, se obtiene el producto deseado. Los productos generados a partir de esta tecnología son: Monóxido de Carbono, Acido fórmico, Metano, Metanol, Etileno, Etanol, Ácido acético, n-propanol. Estos productos generan un valor añadido debido a que ayudan a reducir la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmosfera.

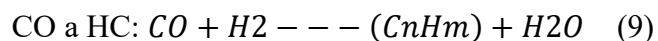
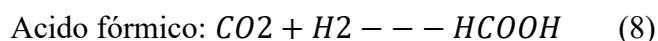
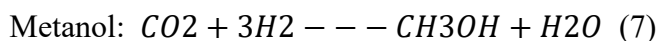
4.6.2. *Síntesis química*

En la síntesis química se da la formación de productos con valor añadido como la formación de policarbonatos, urea, PVC, entre otros. Esta ruta tecnológica permite que se dé la reacción entre CO₂ e hidrogeno molecular (H₂) muchas veces en presencia de catalizadores para mejorar la velocidad de reacción y se conoce como hidrogenación.

4.6.3. *Hidrogenación:*

A partir de esta ruta de conversión se pueden obtener productos como el metanol, de igual manera se puede obtener ácido fórmico e hidrocarburos.

Reacciones para la obtención de cada producto:



4.6.4. *Reacciones inorgánicas:*

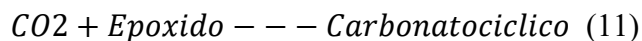
El CO₂ se puede usar para la reacción con sustancias como aminas, alcoholes o epóxido

- Producción de urea: para la producción de urea el CO₂ reacciona con amoníaco y se da mediante la siguiente reacción:



- Producción de carbonatos cíclicos: en este caso el CO₂ reacciona con epóxidos para formar carbonatos cíclicos que son de gran demanda para la fabricación de polímeros y solventes.

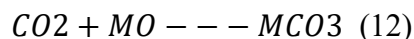
La reacción que se da es la siguiente:



➤ Materiales y solidos carbonatados

En esta se da la reacción con óxidos metálicos para la producción de carbonatos minerales.

La reacción química es la siguiente:



En este proceso se da la producción de carbonatos de calcio y magnesio. Estas diferentes rutas se resumirán en la siguiente tabla:

Figura 11. Descripción en la obtención de productos a partir de síntesis química

Ruta	Ventajas	Productos obtenidos
Hidrogenación	Alta eficiencia, procesos industriales establecidos	Metanol, Ácido fórmico
Síntesis orgánica	Sin necesidad de hidrogeno, reacción directa de CO ₂	Ureas, carbonatos, ácidos carboxílicos
Conversión Mineral	Captura de CO ₂ a largo plazo	Carbonatos solidos

4.6.5. Biocombustible a partir de microalgas

Esta alternativa para la reducción de gases de efecto invernadero en el aire se puede considerar como una tecnología debido a que permite cambiar el CO₂ por un producto de valor añadido. En este proceso, las microalgas se alimentan de dióxido de carbono, después de esto se

permite que se desarrollen las microalgas. Después de un largo proceso las microalgas crecen y su masa se convierte en biocombustible, que es una alternativa para los combustibles fósiles.

Las microalgas son organismos unicelulares polifiléticos. Presentan un metabolismo que se puede clasificar en autótrofo o heterótrofo y generalmente son eucariontes. Existen diversas especies de microalgas que crecen en presencia de carbono y con fuentes lumínicas, por lo general estas condiciones son para organismos con metabolismo heterótrofos, aunque se produce una gran cantidad de biomasa estos organismos son susceptibles a contaminación por producción de ácidos grasos

Para este tipo de tecnología de conversión de CO₂ las microalgas presentan metabolismo autótrofo en los cuales solo se requiere compuestos inorgánicos como el CO₂, sales, agua y energía lumínica para su desarrollo.

Tabla 8. *Otras tecnologías para la conversión de CO₂*

Tecnología	Descripción
Conversión biocatalítica de CO₂ en ácido láctico	<p>En esta tecnología se emplean encimas de alta eficiencia recientemente identificadas. En esta tecnología se utiliza un sistema multienzimático que presentan alcohol deshidrogenado (ADH) piruvato descarboxilasa (PDG) y lactato deshidrogenasa (LDH). Se convierte el CO₂ y el etanol en ácido láctico.</p> <p>Este producto se puede utilizar en la producción biología de hidrogeno a través de la fermentación bacteriana de desechos orgánicos</p>

Medio supercrítico En este caso se presenta un fluido supercrítico que es una condición en la que el CO₂ tiene las propiedades de un gas y un líquido al mismo tiempo. A partir de esto se utiliza como un disolvente verde en separaciones líquido-líquido a condiciones de temperatura y presión bajas.

Mediante este medio también se utiliza para la producción de plásticos o procesos de encapsulación o recubrimiento. Así mismo, se puede usar en la eliminación de extracción de tricloroanisol (TCA)

Alimentación	Se usa en la carbonatación de bebidas debido a que posee propiedades no tóxicas, es decir, es un buen aditivo alimentario
Agricultura	El CO ₂ en invernaderos genera una optimización en el proceso de fotosíntesis de las plantas presentes en los mismos

4.7. Principales productos a partir de la conversión de CO₂

En esta sección se citarán las tecnologías más usadas y que presentan mayor potencial refiriéndonos a estas como rutas de conversión del CO₂, teniendo en cuenta su posible implementación a escala industrial.

Urea

Este proceso de obtención de urea a partir del CO₂ se da mediante un proceso industrial maduro (en el que se convierte una materia prima en un producto final) en el que este se mezcla

con amoníaco (NH_3) en reactores de alta temperatura y presión. El proceso mediante el cual se obtiene la urea es el siguiente:

- Se condensan dos volúmenes de amoníaco con un volumen de dióxido de carbono a 200 °C y 200 atm
- La mezcla de reacción se expande a la presión atmosférica
- Se separa el carbamato de amonio en columnas de destilación a 70°C
- La solución de urea se evapora y esta se cristaliza en el vacío
- La urea cristalizada se centrifuga y se seca

Esta urea que se produce a partir del CO_2 se usa como fertilizante que facilita la fotosíntesis en diversos tipos de plantas para abastecer la demanda mundial de alimentos. Sin embargo, este método de conversión de CO_2 actualmente es lento y su producción conlleva un gran uso de energía que resulta en un proceso poco eficiente ocasionando problemas medio ambientales.

El proceso para la obtención de urea a partir de CO_2 de una manera más detallada se da mediante la reacción de Bazarov en la que la unión de CO_2 y CH_3 da como resultado el carbamato de amonio, obteniéndose así la reacción (1). Luego esta, se deshidrata para así obtener la urea, conocida como la reacción (2). Estas reacciones se describen a continuación:

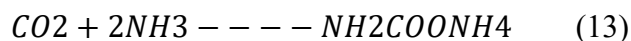
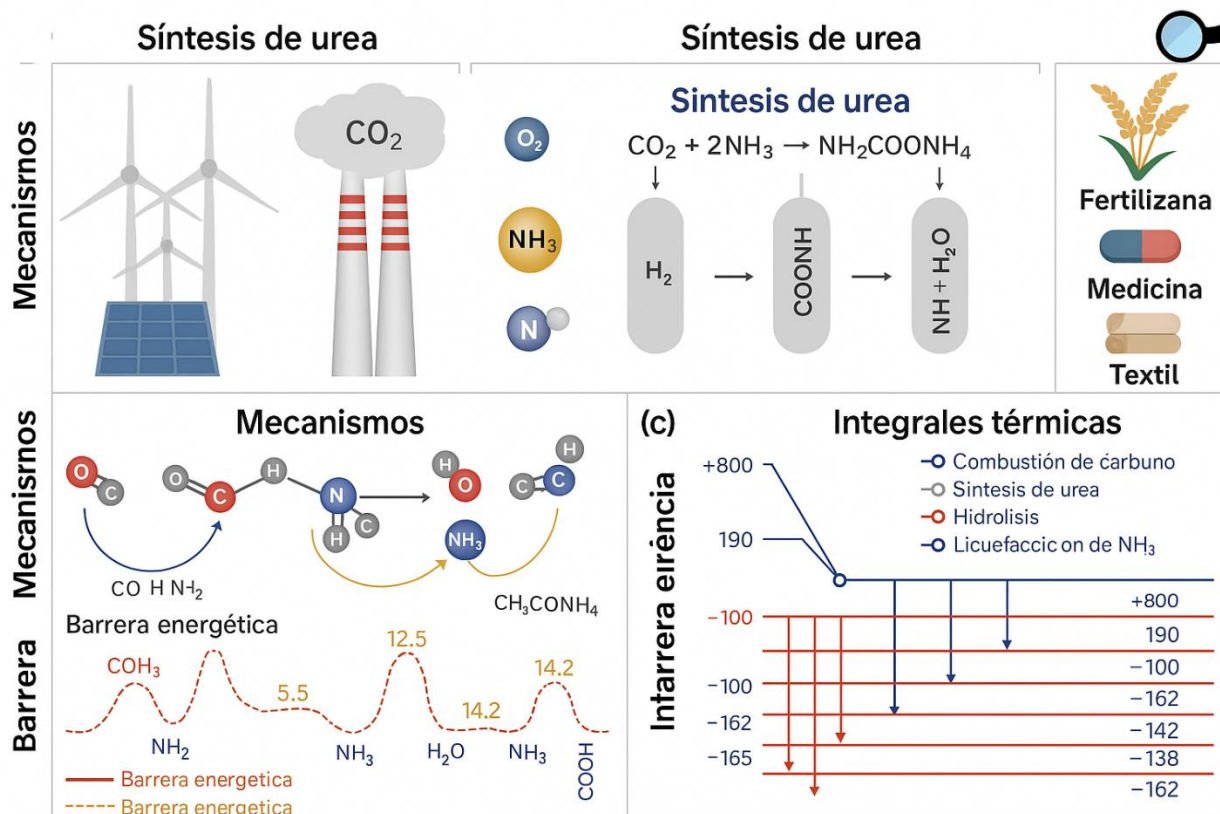


Figura 12. Proceso para convertir el CO2 en Urea. Fuente: autores



Nota: adaptado por autores

En la parte **a** se muestra cómo se produce la urea para sus usos mediante la aplicación de energía renovable y la síntesis entre el CO₂ y el CH₃ a partir de la captura del CO₂. En la parte **b** se muestran los mecanismos de transformación descritos en la parte a mediante reacciones, perfiles de energía y calor sensible presentes en todo el proceso.

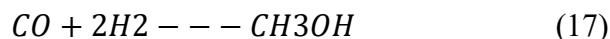
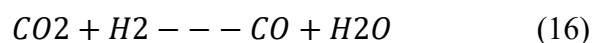
La reacción (13) es altamente exotérmica, es decir, elimina energía en forma de calor y se realiza en una torre de síntesis de urea, la reacción (14) ocurre en una torre de granulación y es un proceso endotérmico, es decir, la reacción absorbe ligeramente energía y así vez limita el rendimiento de la urea. La producción mundial de urea se estima en 175Mt/a. De igual manera se

requiere 0,73 toneladas de CO₂ para obtener una tonelada de urea, a partir de esto se necesitan 128 Mt de CO₂ al año lo que representa el 0,35 del total de emisiones de CO₂ en el mundo. En cuanto a su uso en el contexto de la sostenibilidad ambiental mediante fertilizantes como la urea este retrasa su emisión a semanas o meses.

Metanol

Este es uno de los productos derivados de CO₂ con mayor proyección a nivel mundial. Su producción se basa en la reacción de las moléculas de Dióxido de Carbono y las moléculas de Hidrogeno (H₂) a partir de una reacción catalítica entre estos gases.

El metanol es un compuesto químico que en su forma más simple se encuentra formado por un átomo de carbono con 4 enlaces simples de H y un grupo OH, la formula química es CH₃OH y representa los enlaces descritos. La producción de metanol a partir de CO₂ se da en dos etapas, una inicial conocida como hidrogenación del CO₂ y la siguiente hidrogenación de otros gases de síntesis como el CO. Las reacciones presentes en este proceso son:



Esta suele ser una reacción altamente exotérmica desde la termodinámica clásica y se realiza a bajas temperaturas y altas presiones. A partir de la obtención del CH₃OH se utiliza de diferentes maneras que ayudan a reducir el impacto producido por el CO₂. Algunas de estas aplicaciones son:

- Combustibles: se puede utilizar en casos específicos donde los motores se encuentran modificados, de igual manera se hacen parte de la materia prima para producir combustibles líquidos como la gasolina.

- **Industria química:** se utiliza ampliamente en la elaboración de productos químicos como plásticos, solventes, productos farmacéuticos y pesticidas.

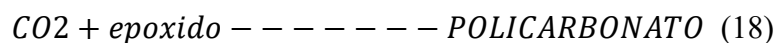
La producción mundial de metanol a partir de CO₂ se estima en 70 Millones/toneladas al año. Para producir el metanol se necesitan 1.4 toneladas de CO₂ para producir una tonelada de CH₃OH.

Estas nuevas aplicaciones a partir del **Metanol** una alternativa viable para reducir las emisiones, pero son tecnologías que están en desarrollo.

Policarbonatos

Estos compuestos tienen una función primordial en la fabricación de vidrios de seguridad, lentes ópticas y componentes electrónicos, la producción de policarbonatos regularmente se realiza con diferentes sustancias, pero para este caso hablaremos de rutas alternativas que utilizan CO₂. El proceso de producción de policarbonatos se conoce como copolimerización de CO₂ con epóxidos a partir de catalizadores. Los epóxidos son compuestos orgánicos que están formados por una estructura de anillo que tiene dos carbonos y un oxígeno. De acuerdo con su composición este tipo de compuestos son muy buenos para la síntesis de polímeros. Algunos de estos epóxidos son el óxido de propileno (PO) y el óxido de etileno (EO). La reacción que se da para la formación de los policarbonatos es la siguiente:

Catalizador



Para realizar este proceso se necesitan los catalizadores, estos son claves para mejorar la conversión de CO₂ en policarbonatos. Existen diferentes tipos de catalizadores como los metálicos, organocatalíticos y los bifuncionales. Los policarbonatos obtenidos representan algunas

propiedades a partir de su derivación de CO₂, estas propiedades se dan a partir del tipo de epóxido usado.

5. Tecnologías de CO₂: retos y oportunidades hacia la sostenibilidad ambiental

El panorama mundial acerca de los métodos comúnmente utilizados en la industria energética se ha visto nublado por las diferentes consecuencias que ha traído consigo el calentamiento global, sin embargo, a partir de estas se han utilizado alternativas que tienen como propósito minimizar el impacto que trae consigo el calentamiento global. Dentro de las diferentes propuestas de carácter internacional se encuentran las planteadas en el desarrollo de este proyecto.

El almacenamiento y los diferentes usos del CO₂ presentan diferentes desafíos no solo en el desarrollo de estos, también en el impacto ambiental mundial, es así como representan un eje crítico con el fin de proporcionar apoyo para alcanzar las metas climáticas globales. Se puede agrupar e identificar las diferentes limitaciones y viabilidad para la caracterización de estas tecnologías.

5.1. Obstáculos operativos

Considerando inicialmente el punto de vista operativo, centrándose principalmente para las diferentes áreas del almacenamiento y usos del CO₂, sin dejar por fuera consideraciones a tener en cuenta en procesos como la captura, presentan un amplio vacío, dentro de los cuales se pueden destacar el elevado precio no solo económico, sino también en términos de energías. Un ejemplo actual de esta premisa es el conocido proyecto “Petra Nova” en Texas, el cual demandó un alto consumo no solo energético sino también de recursos financieros de alrededor de 1.000 millones

de dólares estadounidenses con el fin de capturar 1,6 millones de toneladas anuales, sin embargo, conforme avance el proyecto se profundizará sobre este ejemplo.

Las diferentes técnicas relacionadas con el dióxido como una fuente de utilización a partir de la captura generan un impacto en la generación eléctrica, debido a que comparado con los procesos convencionales estos presentan un notorio incremento de 10 al 40% de energía adicional, aumentando el consumo de combustibles en centrales térmicas. Lo anterior sin destacar que en procesos de captura del CO₂ se tiene un costo en la producción de electricidad oscilando en porcentajes entre el 35 al 85 % lo que se puede relacionar directamente en unidades de 0.01-0.03USD /KWh¹, los rangos calculados para el almacenamiento son de alrededor de 1-8 USD/t CO₂ mientras que relacionado al almacenamiento geológico se tiene un monitoreo de los costos; 0.5 -8 USD/t CO₂. Otro factor para destacar en contra del desarrollo de estas operaciones es la estabilidad y materiales como el de las zeolitas las cuales no son potencialmente eficiente en ambientes con gran humedad y aquellas estructuras metal- orgánica las cuales son capaces de reducir su capacidad a la mitad debido a la exposición.

En el aspecto medioambiental siempre estará presente un potencial riesgo, desde las posibles fugas que se pueden ocasionar, lo que requiere una extensa y minuciosa etapa de monitoreo y verificaciones costosas. Otro punto a considerar en este aspecto son los sitios de almacenamiento, los cuales necesitan redes especializadas que faciliten el transporte; un ejemplo de estos son los yacimientos petroleros depletados.

Dentro de las mejoras propuesta para estas dificultades operativas es posible destacar la realización de los proyectos integrados, como los gasoductos compartidos, los cuales reducen

costos del transporte, mientras que en el aspecto político la instauración de impuestos y créditos comerciales incentivarían significativamente las inversiones en los diferentes procesos de CCUS.

Los elevados costos en operaciones y las barreras técnicas son retos críticos, los cuales, necesitan procesos de innovación y avances en materiales, eficiencia energética y en los marcos regulatorios los cuales estarían centrando el foco de atención en estas tecnologías como pilares de la descarbonización natural.

5.2. Barreras económicas y de mercado

Centrándose en la viabilidad del mercado y las posibles barreras económicas, especialmente en los procesos de almacenamiento y los diferentes usos, se hace evidente los costos de la infraestructura necesaria para llevar a cabo estas operaciones, donde se resalta que el proceso de captura y almacenamiento es el que se lleva un porcentaje más elevado dentro de la inversión, necesitando alrededor del 75% de la inversión total, con costos propensos a entrar en los rangos de 5-115 USD/tonelada CO₂². Otro factor relevante a tener en cuenta, son las consecuencias de las corrientes diluidas y su alto impacto en el aspecto financiero, estas corrientes son aquellas donde el CO₂ presenta un porcentaje menor al resto de los componentes, algunos ejemplos donde es posible identificarlo es en las emisiones industriales o en la atmosfera, existen casos, donde estos se encuentran en un proporción menor al 20% e incluso es posible llegar a fracciones iguales o menor al 2%, estos flujos elevan los costos de las operaciones en un estimado de 10 veces el original debido a la energía adicional necesaria, puesto que la separación del resto de los componentes del CO₂ presenta una mayor dificultad, por lo tanto presenta un costo más elevado desde el punto de vista energético y tecnológico. Relacionando los costos entre las corrientes diluidas y las corrientes concentradas, es que al momento de capturar el CO₂ de las segundas se

encuentran en un costo aproximado entre de los 17 a 28 USD/tonelada mientras que en las corrientes diluidas de 37 a 108 USD/toneladas. Mientras que el transporte implica el uso de gaseoductos o camiones lo cual añade a los costos de 1 a 8 USD/t CO₂ y para el almacenamiento geológico se ve implicado los costos del monitoreo de las fugas de gas se estiman alrededor de 0,6 a 9 USD/t CO₂.

Otro factor que es determinante en los proyectos relacionados con el CO₂ es la inversión que requiere y el mercado actual. Con respecto a la inversión inicial, la construcción de la infraestructura necesaria para el desarrollo de las diferentes operaciones, como las unidades de separación de CO₂ o gaseoductos requieren un potencial capital que en general las empresas no pueden cubrir al menos de la utilización de subsidios.

El mercado actual de carbono es insuficiente al mencionar los incentivos comerciales, una razón de este es que el 5% del CO₂ capturado es reutilizado para productos como combustible sintéticos o materiales de construcción, etc. Lo que hace que el resto de porcentaje se utilice para el almacenamiento, limitando los ingresos debido a que algunas partes de estos no son directas. Actualmente, los precios del carbono se encuentran entre los 80 USD/t son insuficientes para cubrir los costos totales de los procesos de captura, almacenamiento y reutilización del CO₂. Analizando la interdependencia entre los actores, es decir; capturadores, transportistas y almacenadores, existe una complicada distribución de riesgos, debido a que el fallo en cualquiera de las etapas, como una fuga en una de estas, afecta a toda la cadena, lo que trae como consecuencia disminuciones drásticas en las inversiones.

El marco legal es incierto respecto a alguno de los parámetros de los procesos llevados a cabo, no existe claridad sobre la responsabilidad de monitoreos o escenarios donde se presenten fugas y se necesite realizar reparaciones, se necesitan garantías financieras sin embargo la mayoría

de los países carecen de estos protocolos tan específicos. En general los diferentes países no poseen estándares unificados para los permisos de almacenamiento y créditos de carbono en proyectos que incluyan paso fronterizo.

Otro punto de relevancia son las diferentes limitaciones con referencia a las tecnologías en reutilización, debido a que la baja demanda, como por ejemplo el uso de los combustibles sintéticos. Acompañado de esto la conversión de CO₂ en productos de carácter químico, requiere diferentes subsidios con el fin de lograr competir con las energías convencionales.

La recuperación mejorada de petróleo es uno de los principales usos que destaca en la industria del CO₂ y de los hidrocarburos, sin embargo, la viabilidad de este depende de factores como la fluctuación de los precios del crudo.

Si bien es cierto, estas barreras que existe en los diferentes proyectos relacionados con los diferentes usos del CO₂, incluyendo los procesos de almacenamiento y utilización, se pueden ver mermadas teniendo en cuentas técnicas financieras, tales como modelos de con inversión público-privada o bonos verdes. El primero consiste en el proceso de alianza entre los gobiernos y las diferentes empresas, con el fin de compartir tanto riesgos como beneficios para llevar a cabo los proyectos que tienen como objetivo disminuir los efectos que ha traído consigo el calentamiento global y promover la sostenibilidad. El objetivo del planteamiento de estos fondos compartidos es incentivar las diferentes iniciativas que tienen impacto no solo social si no ambiental complementando los fondos públicos limitados.

Tabla 9. *Ventajas y limitaciones de la utilización de bonos verdes*

Ventajas	Desafíos
Atraen inversores institucionales (ej., fondos de pensiones)	Costos elevados de certificación y monitoreo
Mejoran reputación corporativa y acceso a mercados	Riesgo de greenwashing si no hay auditorías rigurosas
Permiten apalancar financiamiento multilateral (ej., Fondo Verde Climático)	Mercado incipiente en países emergentes, con baja liquidez.

Nota: descripción de las ventajas y desventajas de los bonos verdes.

Algunos de los mecanismos que es posible utilizar con el fin de llevar a cabo estos acuerdos son los fondos de agua; los cuales tienen el fin de proteger cuencas hidrográficas a través de servicios ambientales, es decir, usuarios privados financian la conservación a cambio de que se suministre agua limpia. Otra alternativa es la utilización de las líneas de crédito mixtas, es decir, ofrecen prestamos con garantías estatales para el desarrollo de proyectos de energías renovables.

Dentro de los ejemplos que son posibles encontrar en América Latina, cabe destacar a Argentina con su programa de biogás y eficiencia energética financiado por el BID (Banco interamericano de desarrollo) y el BICE (Banco de Inversión y Comercio Exterior S.A.) lo cual incluye seguros de ahorro energético con el fin de reducir riesgos. Otro sobresaliente se presenta en Colombia, en donde sobresale el portafolio climático el cual abarca 34 billones de dolares USD con el fin de restaurar alrededor de 750.000 hectáreas de bosque, con una inversión de carácter público privada.

Sin embargo, en el desarrollo de todos los proyectos de esta naturaleza se encuentra presenten los riesgos compartidos, debido a la interdependencia que existe entre los sectores que

intervienen, por lo cual se debe realizar la misma distribución de responsabilidades. También incide en el panorama del desarrollo del proyecto la incertidumbre existente con las políticas climáticas o los costos del carbono afectando directamente la rentabilidad.

Establecer los precios mínimos del carbono es una política que disminuiría la fluctuación y la incertidumbre de los diferentes proyectos relacionados con este, debido a que se tendría un precio base con el cual manejar la finanzas de estos.

En conclusión, aunque la captura, almacenamiento y los diferentes usos que son posibles a partir del CO₂ su escalabilidad requiere superar diverso obstáculo de carácter económico mediante marcos regulatorios sólidos, incentivos financieros y avances en los mercados de reutilización.

5.3. Obstáculos de carácter social

Como todos los procesos relacionados con la industria energética, la captura, el almacenamiento y los diferentes usos del CO₂ enfrentan no solo obstáculos operativos y financieros, también se puede presentar la resistencia comunitaria ante estas tecnologías. En diferentes zonas, como en América latina, donde existen conflictos socioambientales rodeados de desconfianzas, se percibe de manera errónea estas técnicas y su finalidad. Es posible identificar algunos de esta falta de aceptación por la sociedad en proyectos alrededor del mundo como Australia y Noruega; donde es posible destacar el proyecto como **Gorgon y Sleipner** en donde se dio la oposición local por percepción de riesgo ambiental, sobre todo por posible contaminación de acuíferos y posibles efectos nocivos contra los ecosistemas.

En general, parte de la poca aceptación que tiene estas tecnologías se debe al desconocimiento que tienen de las mismas, lo cual dificulta su posible implementación. Lo anterior se encuentra ejemplificado con una encuesta que se realizó en España con el objetivo de analizar

las tecnologías de captura y almacenamiento para evaluar la aceptación social de esta novedosa técnica de reducción de gases de efectos invernadero, en el cual se arrojó como resultado que el 68% de los españoles desconocen el funcionamiento del almacenamiento del CO₂. Por lo tanto, la aceptación social y la capacitación sobre estas nuevas técnicas relacionadas con el CO₂ se encuentran vinculadas.

Recopilando algunos de los diferentes proyectos relacionados con las tecnologías de captura, almacenamiento y usos del CO₂ y sus posibles desafíos, se obtiene el siguiente resumen

Tabla 10. *Desafíos de Proyectos relacionados con CCUS*

Proyecto	País/Región	Desafíos	Consecuencias
Petra	Estados Unidos	Oposición por	Críticas de organizaciones ambientales y comunidades por prolongar la vida útil del carbón y por la insuficiente reducción de emisiones.
Nova	Estados Unidos	legitimar el uso del carbón, riesgos ambientales y beneficio climático cuestionado.	por prolongar la vida útil del carbón y por la insuficiente reducción de emisiones.
Gorgon	Australia	Incumplimiento de metas de captura y controversias sobre eficacia y responsabilidad ambiental.	de Multas por no cumplir las metas de captura, críticas por bajo desempeño y retrasos.
Proyectos de almacenamiento oceánico	Hawai y Noruega	Oposición local y rechazo social por riesgos percibidos de fugas y daños ecológicos.	Cancelación de proyectos debido a la oposición comunitaria.
Proyecto Acorn	Escocia	Falta de apoyo gubernamental y críticas por metas especulativas y dependencia de CCUS.	Retraso indefinido en la implementación por falta de respaldo político.

5.4. Análisis de los desafíos y controversias del proyecto Petra Nova

A partir de las condiciones que se vienen presentando alrededor del mundo en el panorama medioambiental, surge el proyecto Petra Nova, el cual surge como una iniciativa para la

implementación de tecnologías de captura, utilización y almacenamiento del carbono con mayor reconocimiento alrededor del mundo.

El desarrollo de la fase inicial del proyecto se remonta al año 2014 y acabó posterior finalización en el año 2016, la primera captura de CO₂ se realizó en el tercer trimestre del anterior año, siendo así su inauguración oficial para el año 2017, con la presencia del secretario de energía de EE. UU. Este proyecto se implementó en la central eléctrica de carbón W.A. Parish, en donde su principal propósito era demostrar la viabilidad comercial de los procesos de captura de carbono a mayor escala e implementarlo en el sector energético, reduciendo las emisiones, en un porcentaje significativo, de los gases de efecto invernadero emitidos por una de las plantas más relevantes y contaminantes del País.

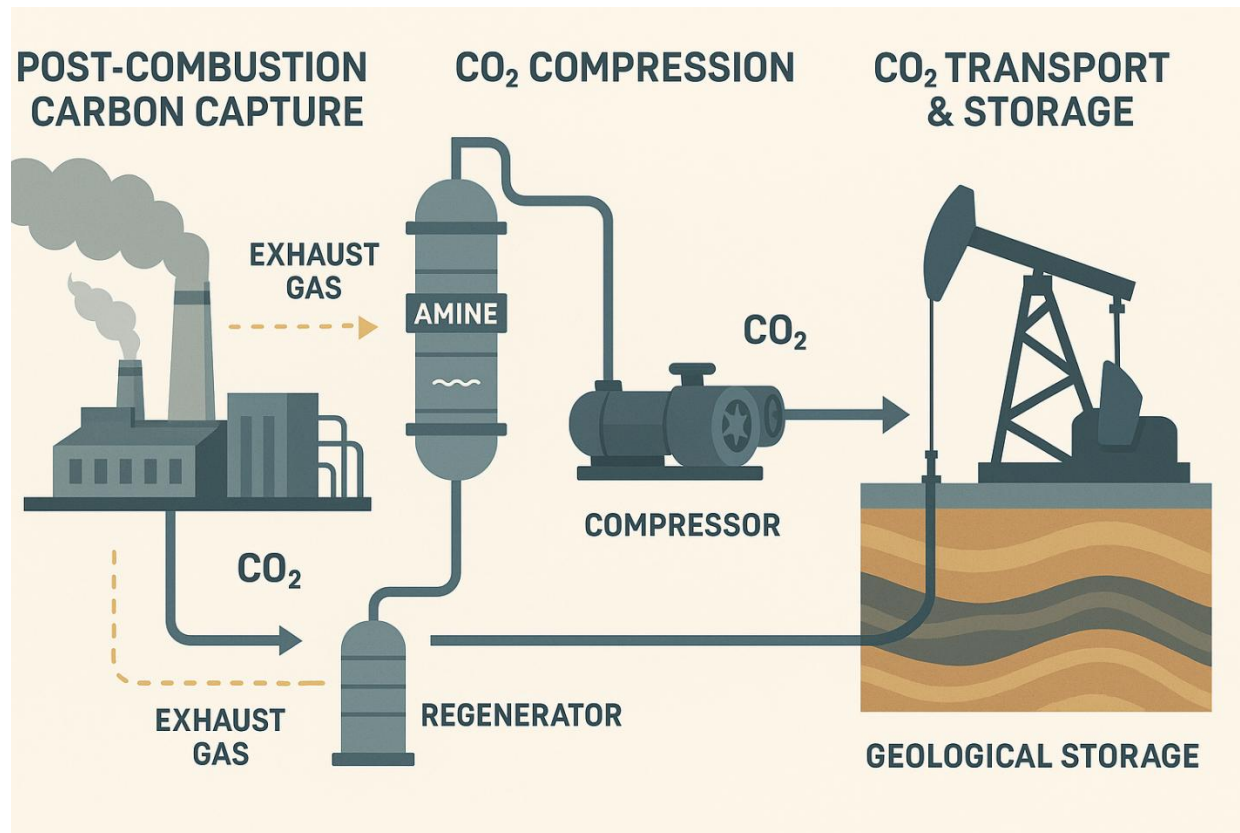
Este proyecto, utiliza una tecnología donde la captura postcombustión destaca, el gas de escape se dirige a un sistema donde se ve expuesto a una solución de aminas, que son capaces de absorber selectivamente el CO₂. A partir de lo anterior, la solución se calienta en un regenerador, liberando el CO₂ puro y comprimiéndose para su transporte, la amina se recicla en el sistema para volver a iniciar el proceso. La capacidad de capturar de esta planta es de más de 5.000 toneladas de CO₂ diario, lo cual representa un porcentaje de alrededor del 70% de este gas contenido en una corriente de gases equivalente a 240 MW de generación eléctrica.

Todo el porcentaje del CO₂ capturado es comprimido con una presión de 1885 psi y es transportado hasta el campo petrolero West Ranch, al oeste de Houston. En el campo, se utiliza el CO₂ transportado en la recuperación mejorada de petróleo, siendo inyectado con el fin de incrementar variables como la presión y disminuir la viscosidad del petróleo, facilitando así factores como la movilidad y por ende su extracción. Este proceso permite aumentar los estándares en la producción de petróleo, lo cuales venían de menos de 300 bbl diarios a 15.000 bbl. El

almacenamiento geológico de este CO₂ captado, es de manera permanente en el subsuelo, contribuyendo así a la reducción neta de emisiones de los gases de efecto invernadero, siempre que no esté contemplado su liberación.

Evaluando el desarrollo de este proyecto se tiene que, a pesar de ser un referente tecnológico en captura de carbono, no está exento a que sucedan oportunidades de mejora y desafíos tanto económicos, como técnicos y que salgan a flote diferentes controversias ambientales.

Figura 13. *Funcionamiento del Proyecto Petra Nova. Fuente: autores*



5.4.1. Desafíos técnicos: Eficiencia y Fiabilidad cuestionada.

El proyecto Petra Nova enfrentó diversas problemáticas técnicas y operativas los cuales limitaron factores como su eficiencia y rentabilidad. En base a lo anterior, se puede destacar que la tasa de captura de este proyecto prometía un porcentaje de captación de alrededor del 90% del CO₂ de los gases de combustión, mientras que la tasa real osciló entre los 65-70%⁵, la disminución de esta tasa fue gracias a los problemas que se presentaban en la planta que alimentaba el sistema de captura y la frecuencia en las paradas. Otro factor que destacó fue la baja disponibilidad operativa, debido a que la unidad operó con una capacidad del 60%, 25% menos de la capacidad proyectada, con un total de 88 días de inactividad por la presencia de fallas técnicas y eventos climáticos de alto nivel de riesgo, como el huracán Harvey.

Un factor preponderante en la organización de este proyecto es la dependencia energética y costos en la operación. Es necesario que el sistema de captura tenga una planta de gas natural independiente, es decir, una planta de cogeneración crítica con el fin de generar energía y vapor, lo que hizo el sistema no solo se vuelva más complejo, si no también lo hizo tener más puntos débiles, debido a que cualquier falla en la operación de esta planta hace que toda la operación se detenga. En cuanto a la demanda energética, la tecnología de aminas utilizadas en este proyecto necesita un alto gasto energético con el fin de generar nuevamente el solvente, disminuyendo de esta manera la eficiencia de la central eléctrica.

De las posibles limitaciones en la parte técnica y operativa, se pueden destacar diferentes oportunidades de mejora, inicialmente, en el momento de la integración energética, la dependencia a una planta de cogeneración externa lo cual se tornó en un punto crítico, por lo cual proyectos futuros deben considerar darle prioridad a la utilización de sistemas resilientes.

También es necesario tener a consideración la escalabilidad tecnológica, debido a que el uso de aminas y las tecnologías que se desempeñan con estas es madura, sin embargo, su uso en grandes escalas requiere de minuciosas mejoras tanto en la eficiencia energética y en la gestión de flujos.

5.4.2. Vinculación con proceso de recobro mejorado en la industria de los hidrocarburos: desafíos

La recuperación mejorada de petróleo (EOR) en el contexto del desarrollo del proyecto Petro Nova se lleva el foco del modelo de negocios para la justificación tecnológica y ambiental. Con base en lo anterior, se destaca el proceso de inyección, en el desarrollo del proyecto es posible observarlo empleado en el campo petrolero West Ranch, el CO₂ se inyecta en alrededor de una milla de profundidad en formaciones petroleras maduras, esto debido a que el gas incrementa la presión del yacimiento y reduce propiedades de crudo, tales como la viscosidad, lo cual favorece su extracción.

Dentro de los posibles resultados que se pueden destacar a partir de esta vinculación es el notable aumento en la producción de crudo, debido a que anterior a esto, se producía alrededor del 300 a 500 bbl de petróleo por día. Al inicio del proyecto se contempla un aumento extraordinario de la producción, proyectando picos de 15,000 bbl por días, 30 veces más que la producción inicial de campo. Puesto en marcha el proyecto la producción total superó del 4.2 millones de barriles y llegó a los 6000 bbl diarios según reportes oficiales y técnicos, sin embargo, esto se vio afectado por la variación de los factores operativos y los comportamientos del yacimiento. Los ingresos obtenidos a partir de esto, los ingresos generados por el incremento significativo de la producción

logrando relacionar de manera directa a la industria petrolera, debido a que esta puede ayudar a cubrir los altos costos de la captura y compresión de CO₂.

Sin embargo, implementando este tipo de proyecto es importante destacar que además de aumentar el factor de recuperación de hidrocarburos, una fracción significativa de CO₂ queda en la zona del subsuelo en la cual se inyectó, contribuyendo de esta manera al secuestro geológico de carbono, por lo cual, se hace necesario la presencia de un riguroso programa de monitoreo, verificación y contabilidad, el cual tiene como principal propósito rastrear el destino del CO₂ y prevenir procesos de fugas.

La perspectiva de la captura de CO₂ para procesos del recobro mejorado de hidrocarburos es vital para atraer inversiones de carácter tanto públicos como privados, lo cual ofrece un retorno financiero que hace que el proyecto se vuelva cada vez más viable al analizar los costos iniciales de la inversión, contando aspectos como la infraestructura, los procesos de capturas y el transporte.

Analizando el proyecto desde las diferentes perspectivas referentes al desarrollo de este proyecto, la escalabilidad y replicabilidad no suena como ideas lejanas, Petro nova demuestra que la vinculación con los diferentes procesos de la industria petrolera y la rentabilidad que derivan de estos demostrando su viabilidad.

5.5. Controversias ambientales y sociales

En el desarrollo de proyectos de esta índole, aunque su objeto principal es contribuir a la captura de carbono y la disminución de las consecuencias de los gases de efecto invernadero, es común que no se libren de enfrentar controversias ambientales y sociales significativas lo cual implica el cuestionamiento de su impacto y la legitimidad en la solución climática.

Dando un primer enfoque a la eficiencia y la calidad de la captura del carbón, es necesario destacar la limitación en la captura del CO₂, donde se evidenció alrededor de un 7% de las emisiones totales lo cual limita el impacto sobre el cambio climático. Mientras que dándole el enfoque hacia el panorama de la industria petrolera y el recobro mejorado el proyecto se convertía en una opción para mejorar las condiciones de la industria petrolera pero no en una solución contundente a vistas de especialistas en el cambio climático, debido a que se generan nuevas emisiones en los procesos de quema de los gases o petróleo obtenido.

Retomando, este ejemplo puntual, la planta W.A. Parish siguió con la emisión de agentes contaminantes como mercurio, arsénico, entre otras partículas, las cuales se vinculan directamente con los problemas respiratorios atribuyéndoles según estudios universitarios de la universidad rice 178 muertes prematuras anuales a esta planta.

Realizando un exhaustivo análisis dentro de los conflictos sociales la oposición comunitaria por parte de comunidades cercanas a esta zona industrial y de reconocidos grupos ambientalistas destacan el proyecto como altamente contaminante.

Petra Nova fue conocido como un rotundo "éxito" con el fin de obtener inversiones en captura de carbono, aunque su diseño dependía de la extracción de más petróleo. Por lo cual se generaron diferentes críticas por la premisa de que este proyecto retrasaría la transición energética ya que se generaría una "licencia social" para la industria de los combustibles fósiles.

En el siguiente cuadro es posible evidenciar de manera resumida los desafíos que se presentaron a lo largo del desarrollo del proyecto y en la actualidad, centrándose en los principales desafíos

Tabla 11. *Desafíos del proyecto Petro Nova*

Desafío	Impacto
Baja tasa de captura (65-70%)	Reducción del beneficio climático neto y aumento de costos por tonelada.
Paradas por cogeneración	Pérdida de 88 días de operación en 3 años, afectando la rentabilidad.
Alto consumo energético	Aumento del costo operativo y dependencia de combustibles fósiles.
Vulnerabilidad al precio del crudo	Cierre temporal en 2020 por caída de ingresos vinculados al EOR.

6. Políticas públicas y estrategias a nivel mundial como a nivel nacional

Las tecnologías para el almacenamiento y los usos del dióxido de carbono (CO₂) presentan un auge en todo el mundo debido a la necesidad de reducir las emisiones de los diferentes gases de efecto invernadero, especialmente el CO₂, para así contribuir al mejoramiento de las condiciones medioambientales de todo el planeta. La mayoría de las potencias mundiales como Estados Unidos, China, Canadá y países europeos empezaron el desarrollo constante de tecnologías para que los procesos industriales se realicen de manera eficiente tanto económica como ambientalmente. Primordialmente las grandes potencias piensan en descarbonizar la economía, la industria, el transporte, la sociedad, entre otros.

El proceso de descarbonización es un sinónimo de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, es por esto que en el capítulo hablaremos sobre su definición, tipos de descarbonización y como los países más avanzados del mundo están implementando nueva

legislación, incentivos, estrategias para que el proceso de descarbonización de toda la sociedad se realice efectivamente y así se puedan cumplir los objetivos propuestos en diferentes acuerdos internacionales para la prevención del medio ambiente y la optimización de las operaciones en diferentes industrias presentes en los países.

La descarbonización es el proceso en el cual se busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que provienen de actividades humanas para así contribuir a disminuir el cambio climático. El objetivo primordial de este proceso novedoso es lograr el cero neto (net Zero) de emisiones, es decir, que las emisiones de gases de efecto invernadero se encuentre en un punto en el que se equilibran con una cantidad equivalente de CO₂ eliminada a la atmosfera. Para lograr el net Zero se necesita una activación de procesos que permitan la reducción de gases de efecto invernadero, el primer paso debe tratar de reducir las emisiones provenientes de las actividades humanas (mínimo de emisiones), de igual manera se necesitan implementar procesos para eliminar emisiones residuales, es decir, las que no se pueden eliminar fácilmente y se deben que aplicar otro tipo de procesos.

6.1. Estrategias para la descarbonización

Generalmente las organizaciones y los países formulan estrategias para llevar a cabo la descarbonización de acuerdo con las condiciones de cada uno de los sitios donde se intenta implementar, estas condiciones pueden ser económicas, culturales, demográficas, etc. Es así como hay países u organizaciones que están más adelantados en este proceso, cada uno de ellos se mencionaran más adelante en el capítulo. Es claro resaltar que la implementación de estrategias o

tecnologías para la descarbonización es un proceso que debe ser factible en múltiples factores para que así la eficiencia en la reducción de gases de efecto invernadero sea exitosa. En general los países desarrollados implementan estrategias como:

Transición energética: en la transición energética se necesita sustituir la matriz energética actual de combustibles fósiles a energías limpias como solar, eólica, hidroeléctrica, entre otras.

Eficiencia energética: en la eficiencia energética los países buscan mejorar los procesos de forma más eficiente en diferentes sectores de la economía.

Carbono neutralidad y Captura de CO₂: en esta estrategia los países implementan sistemas de captura y almacenamiento de dióxido de carbono, así como la reforestación de bosques para absorber CO₂

Economía circular: se necesita la reducción de los residuos generados por las emisiones. Para que la reducción sea efectiva es necesario reutilizar y reciclar en productos con valor añadido para prevenir las emisiones.

Precios al CO₂: la estrategia consiste en crear mercados para el CO₂ y así incentivar la reducción de emisiones mediante incentivos económicos.

Adicional se habla también de las siguientes estrategias con mayor grado de desarrollo:

6.1.1. Mejora en la eficiencia operativa

La eficiencia energética operativa se define como el máximo rendimiento tratando de tener el menor consumo posible, en otras palabras, la eficiencia energética trata de realizar actividades, operaciones de manera más inteligente para reducir el desperdicio de energía y así disminuir el impacto ambiental asociado. A partir de su definición la eficiencia energética operativa busca aumentar la eficiencia para ahorrar recursos y reducir las emisiones en el sistema energético de

diferentes procesos. De esta estrategia para la descarbonización existen diferentes ejemplos que se pueden implementar o incluso ya se están implementando en algunos lugares de Europa y América. En las diferentes industrias se puede implementar en sistemas de gestión de energía, automatización de procesos y capacitación del personal. En los vehículos se pueden utilizar vehículos más eficientes, optimizar diferentes rutas, así como la promoción del sistema de transporte público a través de buses más amigables con el medio ambiente. Así como en estos sectores se implementan estrategias en diferentes sectores se realizan procesos similares para mejorar la eficiencia de energética.

6.1.2. Electrificación

Este proceso reemplaza las tecnologías que utilizan combustibles fósiles con tecnologías que usan electricidad con fuentes de energía limpia. Algunas de estas energías limpias son la energía eólica, solar, etc. que permiten generar energía a partir de fuentes limpias y renovables.

6.1.3. Procesos para tratar emisiones residuales

Las emisiones residuales de gases de efecto invernadero son las que no se pueden eliminar mediante los esfuerzos normales de reducción debido a limitaciones tecnológicas o económicas. En este caso para cumplir el objetivo de cero emisiones, estas deben complementarse con otros métodos que lleguen a reducir de mayor manera las emisiones. Es así como la practicidad de proponer un proceso para tratar las emisiones residuales es de gran importancia.

De este proceso se hablado a lo largo de todo el trabajo de investigación y es la captura, almacenamiento, utilización y transporte de CO₂.

6.1.4. Economía circular: fomentar la reutilización, reciclaje y reducción de residuos.

Es así como estas estrategias se pueden implementar en diferentes mecanismos que permitan la descarbonización de toda la sociedad a partir de la CCUS, especialmente en la utilización y el almacenamiento para así evitar que los gases de efecto invernadero puedan dirigirse a la atmosfera. Pero para cumplir estas estrategias (cada país puede implementar las que mejor se ajusten a sus condiciones) es necesario realizar un seguimiento de cada una, es así como se pueden evaluar mediante:1

Tabla 12. *Condiciones para evaluar durante un proyecto*

Establecer una línea base	Primero que todo quien intente implementar estrategias para la reducción de gases de efecto invernadero debe entender el impacto de sus operaciones y como se medirá el proceso. Proponer una línea base permite identificar criterios claros de rendimiento de la estrategia
Crear objetivos	Es indispensable determinar los objetivos y los tiempos para cumplir

Ejecutar acciones

Es indispensable que, una vez establecidos los objetivos, ejecutar las acciones pertinentes para llegar al cumplimiento de este

Realizar seguimientos e informes sobre el desempeño

Es necesario monitorear los procesos realizados

Realizar seguimientos e informes sobre el desempeño Es necesario monitorear los procesos realizados

7. Contexto mundial sobre las emisiones de gases de efecto invernadero

En el marco de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero los países han pactado diferentes acuerdos que pretenden iniciar el trabajo para la reducción de los GEI, es así como los acuerdos internacionales y reuniones de la ONU sobre el cambio climático abren el camino para que los países implementen sus propias estrategias de reducción de emisiones.

7.1. Situación por país

La meta principal de los países desarrollados y subdesarrollados es cumplir con los objetivos propuestos en cada uno de los acuerdos firmados hasta la actualidad, es así como estos han identificado las falencias de cada uno y han implementado estrategias, tecnologías y

mecanismos a través de políticas públicas para contribuir con cumplir los objetivos y así ayudar a la sostenibilidad ambiental. A partir de esto, analizaremos los países más desarrollados en el tema de implementación de estrategias para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, así como sus políticas públicas.

7.1.1. Estados Unidos

Estados Unidos es uno de los países más desarrollados en cuanto a tecnología en el mundo, es así como siempre es referente para los demás países de cómo se podrían realizar este tipo de avances.

Contexto

Estados Unidos ha propuesto un marco legal proactivo, incentivos financieros y una infraestructura industrial y energética bien desarrollada debido al volumen de proyectos de almacenamiento y utilización de CO₂ en el país, para así lograr una economía neutra en carbono para 2050.

Marco Regulatorio y legal

En Estados Unidos la Sección 45Q del Código de Rentas Internas (Internal Revenue Code) establece entregar créditos fiscales por toneladas de CO₂ capturadas para su posterior almacenamiento o utilización. Actualmente, el crédito fiscal es de 85 USD/ton CO₂ para el CO₂ que se almacena y 60 USD/ton CO₂ que se utiliza, en este caso como técnica de recobro mejorado de petróleo. Así mismo, se creó otro crédito fiscal de 180 USD/ton de CO₂ para captura directa del aire con almacenamiento. Estos incentivos ocasionan que proyectos se conviertan en viables económicamente, lo que genera mayor propuesta de los mismo y así una mayor reducción de los gases de efecto invernadero.

De igual manera Estados Unidos implemento DOE Loan Programs Office (LPO) en el que se realiza en financiamiento de proyectos a gran escala mediante prestamos con bajo interés, lo que ocasiona mayor interés en el desarrollo de proyectos.

Otra medida implementada para incentivar el almacenamiento y la utilización de CO₂ es la Infrastructure Investment and Jobs en la que se destinan más de 12 mil millones de USD para aplicar tecnologías que permitan el almacenamiento regional de CO₂, así como tecnologías para conversión de CO₂ en productos de valor añadido. Se generan proyectos regionales de almacenamiento de CO₂ en los que su objetivo es identificar, caracterizar y desarrollar sitios de almacenamiento geológico a gran escala. Las leyes que regulan el almacenamiento y utilización de CO₂ se identifican a continuación:

Regulaciones para el almacenamiento de CO₂ en Estados Unidos

Dentro de las regulaciones establecidas por el gobierno de los Estados Unidos, se pueden destacar las siguientes:

- PA Safe Drinking Water Act (SDWA) – Class VI Wells Rule (40 CFR Part 146) es la regulación técnica de pozos para la inyección y almacenamiento de CO₂.

Los pozos clase VI fueron promulgados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y son los pozos destinados específicamente para la inyección de CO₂ y almacenamiento con propósito de largo plazo, potenciando las tecnologías de almacenamiento y usos de CO₂. Esta ley busca proteger fuentes subterráneas de agua relacionados con el almacenamiento de CO₂ a largo plazo en formaciones geológicas.

- 40 CFR Part 98 – Subparte RR regula el reporte obligatorio de emisiones de gases de efecto invernadero como el CO₂

Esta ley forma parte del Programa de Reporte de Gases de Efecto Invernadero (GHGRP) de la Agencia de protección Ambiental. Establece requisitos para el monitoreo, reporte y verificación de operaciones de almacenamiento geológico de CO₂.

La subparte RR de la norma se aplica a instalaciones que pretendan realizar proyectos de inyección de CO₂ para su almacenamiento a largo plazo en formaciones geológicas. Esta ley incluye algunas obligaciones para su cumplimiento, las cuales son: un plan de monitoreo, reporte y verificación en las que se debe delimitar el área de monitoreo, describir las actividades de control y determinar los métodos para estimar la cantidad de CO₂ almacenado.

- National Environmental Policy Act (NEPA) establece la evaluación de impacto ambiental para proyectos de almacenamiento.

La NEPA establece las regulaciones necesarias en el marco nacional estadounidense para la protección del medio ambiente. Esta, también incluye herramientas importantes para determinar los impactos ambientales en determinada actividad u operación, es así como se da la evaluación ambiental y la declaración de impacto ambiental. Como esta existen muchas leyes que en el momento se han ido desarrollando para abarcar todos los aspectos relacionados con el almacenamiento, las mostradas son las más utilizadas y las practicadas actualmente.

Regulaciones y estrategias para la utilización de CO₂ en Estados Unidos

Las siguientes son algunas de las regulaciones más importantes:

- Energy Policy Act of 2005 – Section 969^a

Este es un programa dentro de la legislación estadounidense que tiene como objetivo principal promover el desarrollo y la implementación de tecnologías avanzadas para el almacenamiento y la utilización de CO₂.

➤ Department of Energy – Carbon Utilization Program

Es un programa clave para transformar el dióxido de carbono capturado en productos útiles con un valor añadido, para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y resaltar una economía circular baja en carbono con la descarbonización de la sociedad. El programa estadounidense tiene tres metas principales que son: desarrollar tecnologías que convierten el CO₂ en productos comerciales, reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero y fomentar la investigación y el desarrollo con diferentes actores como universidades, entidades gubernamentales e industrias.

Este programa se define en diferentes áreas de investigación:

- Conversión de CO₂ en productos de valor agregado como combustibles, productos químicos y materiales de construcción
- Desarrollo de sistemas de algas que utilicen CO₂ capturado para producir bioproductos sostenibles
- Integración de tecnologías de captura y utilización de CO₂ en sistemas industriales para la reducción de contaminantes.
- Federal Procurement Policy (en desarrollo)

Prioridad en adquisición de productos derivados de CO₂. Se busca generar mercados de carbono reciclado a partir de la compra de cementos bajos en carbono, plásticos de CO₂ reutilizado, etc.

➤ Clean Air Act (CAA)

Es una ley que establece el marco integral para regular las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de distintas fuentes. Su objetivo es proteger la salud pública y el medio ambiente mediante el control de las emisiones.

Principales proyectos

- Proyecto Petro Nova es una planta que captura el CO₂, se encuentra instalada en la central de generación de energía de W.A Parish. Inicio su operación en el año 2007 y captura aproximadamente 1.6 millones de toneladas de CO₂ por año que se utiliza para EOR en el campo West Ranch. Esta planta cerro sus operaciones en 2020 por problemas económicos, pero en el año 2023 inicio de nuevo operaciones debido a los programas implementados por el gobierno estadounidense, en este caso recibieron el apoyo del IRA.
- Proyecto Archer Daniels Midland (ADM) – Illinois, es un Proyecto de captura de CO₂ destinado al almacenamiento geológico en una formación salina a 2 kilómetros de distancia de la superficie.

7.1.2. Noruega

Noruega a pesar de que es uno de los principales productores de petróleo y gas se ha consolidado como un pionero en el desarrollo de tecnologías para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante el almacenamiento y la utilización de dióxido de carbono.

Ser uno de los pioneros lo ha conseguido a partir de legislación clave, y estrategias de innovación ambiciosas que permiten que el país europeo sea pionero en la descarbonización industrial.

Contexto

A lo largo de los años Noruega ha adoptado un enfoque proactivo hacia la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para la contribución climática, interiorizando que la captura, el almacenamiento y la utilización de dióxido de carbono es primordial para reducir las. El país nórdico posee buenas formaciones geológicas debajo del Mar del Norte que ofrecen una capacidad de almacenamiento de 80 mil millones de CO₂ lo que traduce una reducción de emisiones de 1600 años en el país. Noruega con el paso del tiempo ha ganado experiencia en el manejo de CO₂ debido a la producción de gas en plataformas presentes en el Mar del Norte y su posterior reinyección como método de EOR en las formaciones submarinas. Algunos de estos proyectos son:

- La producción de gas natural en el yacimiento Sleipner Vest y posterior procesamiento de este ha separado aproximadamente un millón de toneladas de CO₂ anuales, inyectándola en la formación Utsira. Este proceso de separación del CO₂ de la corriente de gas natural producida por el campo se debe realizar con los equipos adecuados.
- A partir del año 2019, el CO₂ que se produce en el yacimiento Utgard se separa en la plataforma Sleipner Vest y se almacena en la formación Utsira
- En la planta de Snøhvit en Melkøya separa el CO₂ de la corriente de flujo, este 0se transporta de nuevo al pozo y se inyecta en una formación submarina. Normalmente se almacenan 700000 toneladas de CO₂ al año

Marco regulatorio y legal

Noruega ha desarrollado una estrategia innovadora para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y así contribuir al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.

- El país europeo promulga una ley del cambio climático en la que impulsa a ser un país en bajas emisiones. Esta ley obliga al gobierno a alinearse con los objetivos del Acuerdo de París e implementar planes anuales para la contribución a la sostenibilidad ambiental
- Noruega posee un impuesto a las industrias por cantidad de emisiones de CO₂ que se aplica a combustibles fósiles.
- Con la promulgación de la normativa Noruega ha implementado diferentes estrategias para lograr la descarbonización de la sociedad a partir de la utilización y almacenamiento de CO₂. Una de ellas es la implementación de carros eléctricos en un porcentaje mayoritario para reducir emisiones de combustibles fósiles, así mismo trabajan en la eficiencia operativa y normativas para la reducción del consumo de energía que genera emisiones como los programas Enova y Kilmasats. Enova ofrece subsidios para mejoras energéticas en edificios, Kilmasats financia proyectos para la reducción de emisiones.

Proyectos de almacenamiento y usos del CO₂ en Noruega

❖ Proyecto LanzaTech y Eramet

Este es un proyecto realizado por dos empresas que combina la captura, el almacenamiento y la utilización de CO₂. El proyecto se centra en la conversión de gases ricos en CO₂ generados en hornos pirometalúrgicos de la planta de Eramet mediante un proceso de fermentación biológica. Este CO₂ separado se puede usar para el recobro mejorado en pozos del Mar del Norte, en la conversión de combustibles, productos para el cuidado personal, entre otros. La mayoría de los

proyectos de conversión de CO₂ en productos de valor añadido se encuentran en fase de desarrollo, pero los resultados son satisfactorios. Algunos otros usos que se les da al CO₂ convertido de Noruega son la implementación en Materiales de Construcción, Gas inerte en envasado de alimentos, refrigerante ecológico, cultivo de microalgas en laboratorios de investigación y desarrollo de biotecnologías

Proyecto Longship

Este también conocido en la industria como LangsKip es una de las iniciativas climáticas más ambiciosas de Noruega y busca reducir drásticamente las emisiones de CO₂ en sectores industriales difíciles de descarbonizar como la incineración de residuos. En general este proyecto busca Capturar el CO₂ para después almacenarlo y utilizarlo en otros productos.

7.1.3. Australia

Al igual que muchos de los países del mundo Australia ha realizado esfuerzos por cumplir con lo planteado en el Acuerdo de Paris y distintos acuerdos internacionales. Es así como este país se ha convertido en un pionero en el desarrollo de estrategias para la reducción de gases de efecto invernadero como la contribución de sectores claves de la política australiana. La implementación de proyectos de almacenamiento de CO₂ como Gorgon representa una evolución clara para que la sostenibilidad ambiental del país mejore. Al ser un país comprometido con el desarrollo de tecnologías y estrategias para la reducción de emisiones posee un robusto sistema de leyes y estrategias que facilitan el camino hacia el cumplimiento de los objetivos. Las leyes más relevantes en cuanto almacenamiento de CO₂ son:

Ley de almacenamiento de gases de efecto invernadero en alta mar: Esta ley promulgada en 2006 establece todos los parámetros necesarios para el almacenamiento de gases de efecto

invernadero en el lecho oceánico. La ley también establece los diferentes procedimientos para proyectos de almacenamiento de CO₂ como permisos de evaluación de gases de efecto invernadero, licencia de inyección, entre otros. Así mismo la ley incluye disposiciones de salud, seguridad ocupacional, evaluación de riesgos ambientales y el monitoreo después de la inyección para almacenamiento.

Ley de Protección del Medio Ambiente: establece las directrices que se deben seguir para realizar la evaluación ambiental sobre los impactos generados por proyectos de almacenamiento y utilización de CO₂. En todos los proyectos es necesario que sean evaluados de acuerdo con su impacto. Esta ley establece un enfoque integral para la gestión ambiental a nivel australiano, en esta ley los proyectos se deben someter a una evaluación que combina evaluaciones por parte del Estado, declaraciones públicas de impacto ambiental y otras evaluaciones bilaterales. De igual manera establece un mecanismo legal para la prevención de impactos muy graves a los ecosistemas que rodeen los lugares donde se desarrolla la actividad de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Así como estas dos existen diferentes leyes que regulan todo el proceso de CCUS en el país, pero no solo la legislación es importante también lo son las estrategias que toma el gobierno para cumplir las leyes y reducir las emisiones, descarbonizando la industria y la sociedad. Existen dos estrategias nacionales que son pioneras en el manejo de CO₂: Low Emissions Technology Statement y Emissions Reduction Fund. Cada una de estas estrategias representa un esfuerzo del gobierno australiano por incentivar a que todas las personas reduzcan sus emisiones. Low Emissions Technology Statement (LETS) es una hoja de ruta que apoya la implementación comercial de tecnologías para la reducción de emisiones, ya sea aplicadas o no. Este programa se genera a partir de que el objetivo de Australia para 2050 de cero emisiones es contradictorio con

la idea de expandir sus operaciones para producir petróleo y gas. Australia con sus nuevos proyectos generara 1700 millones de toneladas de CO₂ lo que equivale a las emisiones generadas por 200 centrales eléctricas de carbón. A partir de esto LETS se regenera cada año para suplir necesidades nuevas que se van generando. La primera declaración de esta estrategia se produjo en 2020 y se centra en identificar desafíos de tecnologías de bajas emisiones. En sí las LETS incluyen la inversión de 1900 millones de USD australianos en tecnologías futuras para reducir emisiones. Emissions Reduction Fund es un fondo que creó el gobierno australiano como incentivo para las empresas que adopten prácticas eficientes y sostenibles para la reducción de emisiones de CO₂. El programa determina que la reducción de emisiones sea genuinas, reales y complemento de operaciones comunes, es por esto se dan los créditos de carbono. El objetivo del fondo es proporcionar incentivos para empresas, organizaciones que creen proyectos que contribuyan a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero así mismo crear un enfoque en que ese CO₂ se almacene o se convierta en productos con un alto valor añadido que se encuentre en el marco de la sostenibilidad ambiental.

Proyectos más importantes en Australia

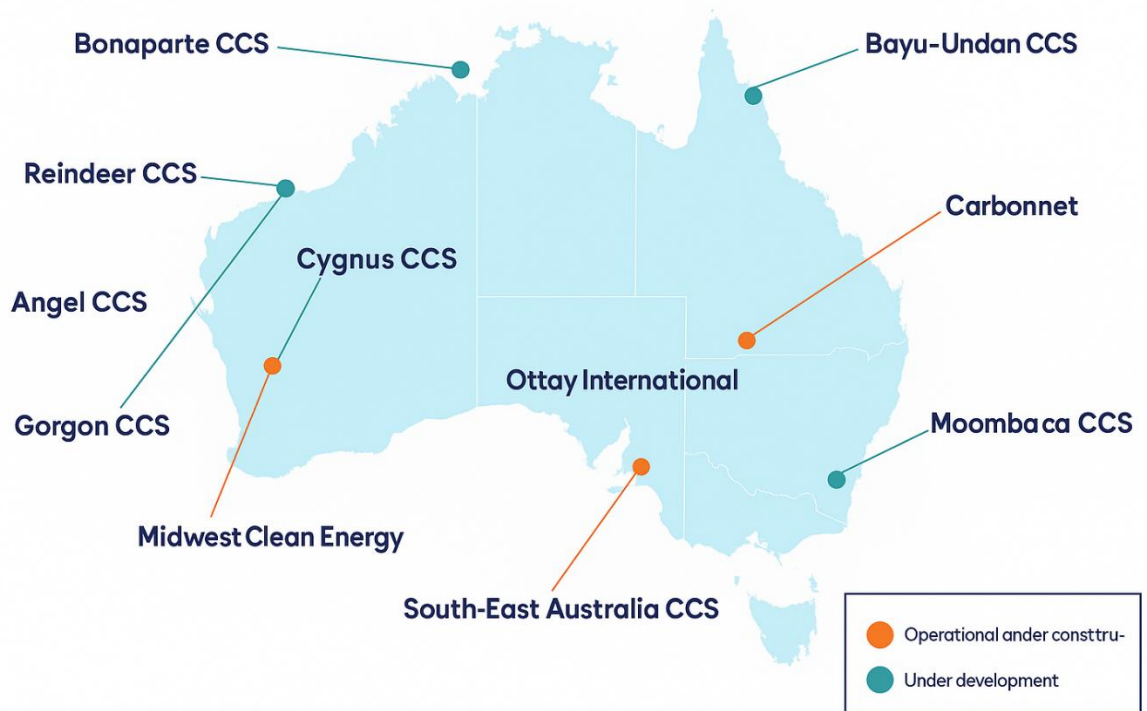
Dentro de los proyectos que son posibles destacar en Australia, es posible destacar:

- Proyecto de inyección de dióxido de carbono Gorgon

Es uno de los proyectos más relevantes a nivel mundial en almacenamiento y utilización de CO₂. La visión general del proyecto es capturar el gas que se produce en el campo Gorgon y Jansz-Lo y llevarlo a almacenamiento en formaciones geológicas. Se estima que para un futuro este proyecto podrá almacenar 120 millones de toneladas de CO₂. El gas que se produce en estos campos presenta entre 1% y 14% de presencia de CO₂. El proceso de separación del CO₂ se da mediante absorción y desorción utilizando solventes amínicos, después de esto el CO₂ se comprime y se

lleva a través de tuberías donde se almacena en la formación Dupuy a más de 7600 pies. Almacena 1.6 millones de toneladas de CO₂. Desde el 2019 se han almacenado más de 10 millones de toneladas de CO₂ lo que contribuye significativamente a la reducción de emisiones. La utilización que se le da al CO₂ es similar a la de los demás países que están a la vanguardia en el tema, algunos de estas conversiones son: Compactación mineral en materiales de construcción, producción de fertilizantes y químicos, recobro mejorado, producción de combustibles sintéticos, etc.

Ilustración 1. Principales proyectos en Australia



7.1.4. Otros países desarrollados

Como estos 3 países existen otros ejemplos que sirven como guía para el desarrollo de este tipo de tecnologías a nivel nacional. En la siguiente tabla se mencionarán los aspectos más importantes de algunos de ellos:

Tabla 13. Países avanzados en tecnologías relacionadas con el CO2

País	Leyes más importantes	Proyectos destacados
Canadá	Carbon Capture and Storage Funding Carbon Sequestration Tenure Framework Créditos fiscales federales	Weyburn-Midale Deep Sky
Reino Unido	Climate Change Estrategia CCUS Inversión de £20 mil millones	Net Zero Teesside Padeswood Cement Plant
China	Plan de Neutralidad de Carbono (2060) Evaluación del Potencial de Almacenamiento Nacional	Guohua Jinjie Power Plant CNOOC Offshore CCS

Estos países igualmente líderes en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero buscan cumplir los objetivos planteados en diferentes Acuerdos internacionales, es por esto que se

crearon las leyes y los proyectos mencionados en la tabla anterior para así descarbonizar las industrias y contribuir a la sostenibilidad ambiental.

8. Colombia: panorama Nacional

Con el análisis de las políticas y estrategias que se están implementando a nivel mundial en países pioneros en sostenibilidad ambiental con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, debemos analizar cómo se encuentra Colombia, que se ha hecho bien y que se puede mejorar en el futuro para llegar a la meta de “net zero” en el 2050. Es así como abordaremos el panorama nacional desde su contextualización, analizando las políticas públicas y emitiendo un concepto sobre cómo se encuentra el país en comparación con los países mencionados anteriormente.

Contexto

Cuando se habla de captura, almacenamiento y utilización de dióxido de carbono, se habla de una de las rutas más importantes para mitigar la reducción de gases de efecto invernadero y cumplir los objetivos internacionales pactados en acuerdos como el de Paris. Colombia al ser un país en vía de desarrollo ha presentado un poco más de inconvenientes en comparación con países desarrollados en la implementación de políticas públicas y energéticas, a pesar de esto el gobierno nacional y las industrias creen que la implementación del almacenamiento y utilización de CO₂ en productos de valor añadido representa una oportunidad fundamental para llegar a una sostenibilidad ambiental en el futuro que permita mejorar las condiciones ambientales. A partir de esto Colombia ha formulado diferentes estrategias climáticas apoyadas en leyes nacionales que

reconocen la importancia del almacenamiento y utilización de CO₂ para la descarbonización de los diferentes sectores presentes en el panorama nacional.

Las políticas públicas más relevantes son:

Ley 2099 de 2021

Se menciona como una ley pilar en el desarrollo de la transición energética y es la encargada de establecer el marco legal de la transición energética en Colombia. Las tecnologías de almacenamiento y utilización de CO₂ hacen parte de este concepto. En el artículo 22 y 57 se reconoce las tecnologías mencionadas como opción para la reducción de emisiones, así mismo el artículo 57 le da facultades al gobierno nacional para crear leyes, incentivos, financiamiento, entre otras cosas que contribuyan a alcanzar los objetivos.

Política Nacional de Cambio Climático (PNCC)

Como su nombre lo dice es la política pública que da los lineamientos para enfrentar el cambio climático en el país. En su estructura fundamental reconoce las tecnologías de CCUS como importantes para la descarbonización de las industrias, así mismo contribuye con metas climáticas para la reducción del 51% GEI para 2030.

Plan Integral de Gestión del Cambio Climático del Sector Minero-Energético (PIGCC)

Constituye la hoja de ruta para reducir las emisiones: se encarga de proponer acciones para implementar las tecnologías de reducción, estas acciones pueden ser estudios del potencial de almacenamiento geológico, análisis económico y ambiental. Así mismo, resalta la necesidad de crear un marco legal para el monitoreo, verificación en la reducción de emisiones.

Estrategia de Largo Plazo (ELP) – Carbono Neutralidad 2050

La estrategia busca alcanzar los objetivos del acuerdo de Paris, reconociendo a las CCUS como tecnología crítica que permite reducir las emisiones de GEI en casos en los que estas no se pueden eliminar con métodos tradicionales o convencionales, así mismo establece la necesidad de promover inversiones, transferencia tecnológica y cooperación regional para el desarrollo de dichas tecnologías.

Así como Colombia ha regulado de cierta manera las tecnologías de CCUS también ha creado estrategias para incentivar a las industrias a implementarlas, algunas de estas son:

Incentivos fiscales en estos se contempla la deducción del impuesto de renta para proyectos que mitiguen las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto se encuentra consignado en la ley 1715 de 2014, acceso a créditos de carbono para el financiamiento de proyectos que mitiguen las emisiones.

Como se puede ver, aunque Colombia se encuentra en fases preliminares en la implementación de tecnologías de almacenamiento y utilización de CO₂ ha demostrado un gran compromiso en la reducción de emisiones para contribuir al cambio climático con la implementación de políticas públicas y energéticas que se alinean con los acuerdos internacionales. Aunque el país cuenta con una buena normativa, se debe avanzar en ampliar el abanico de opciones para los sectores que decidan adoptar las tecnologías de reducción de emisiones, con todo esto el país podrá posicionarse como un referente regional en la aplicación de las tecnologías antes mencionada.

9. Conclusiones

- Las tecnologías de almacenamiento y utilización de CO₂ ofrecen una alternativa viable para mitigar el cambio climático, al permitir capturar, aislar o transformar este gas de efecto invernadero en productos industriales útiles. Su aplicación, enmarcada en principios de sostenibilidad ambiental, puede contribuir significativamente a la reducción de emisiones si se cuenta con criterios técnicos sólidos y una correcta evaluación geomecánica y ambiental de los sitios de implementación.
- El análisis conceptual integrado permitió identificar que el almacenamiento geológico en formaciones salinas y yacimientos agotados es la tecnología más madura y aplicable actualmente, mientras que otras opciones, como el almacenamiento oceánico o la carbonatación mineral, aún enfrentan desafíos técnicos, económicos o ambientales. La selección adecuada depende de variables como la porosidad, integridad estructural, cercanía a fuentes emisoras y condiciones de presión-temperatura.
- A pesar del alto potencial de estas tecnologías, su implementación enfrenta obstáculos importantes: riesgos de fugas, costos elevados, ausencia de marcos regulatorios específicos (especialmente en países como Colombia) y escasa aceptación social. No obstante, su integración con procesos como el recobro mejorado y su alineación con modelos de economía circular representan oportunidades relevantes en sectores industriales y energéticos.
- Las políticas públicas energéticas y climáticas son fundamentales para el desarrollo de estas tecnologías. El estudio demuestra que los países líderes cuentan con marcos regulatorios robustos, incentivos fiscales y estrategias de largo plazo. En el caso de

Colombia, es necesario fortalecer la regulación técnica, fomentar la inversión en investigación aplicada y promover la educación ambiental para facilitar la adopción nacional de tecnologías CCUS como vía hacia la carbono-neutralidad al 2050.

Referencias Bibliográficas

Abbas, M., Xie, H., & Khan, M. (2023). Carbon capture, utilization and storage: Recent advances and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 422, 138574. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138574>

Armistead, A. (2022, febrero). Submission: Low Emissions Technology Statement 2022. The Australia Institute. <https://australiainstitute.org.au/report/submission-low-emissions-technology-statement-2022/>

Australian Energy Producers. (2024). CCUS: A net zero opportunity for Australia [Factsheet]. <https://www.csiro.au/en/news/all/articles/2023/september/ccus-explainer>

Borges, L. (s.f.). Tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ como vía hacia la descarbonización [Trabajo de fin de grado, Universidad de La Laguna]. Repositorio institucional ULL. <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/33898/TECNOLOGIAS%20DE%20CAPTURA%20Y%20ALMACENAMIENTO%20DE%20CO2%20COMO%20VIA%20HACIA%20LA%20DESCARBONIZACION..pdf?sequence=1>

Brady, J. L., Hare, J. L., Ferguson, J. F., Seibert, J. E., Klopping, F. J., Chen, T., & Niebauer, T. (2006, septiembre). Results of the world's first 4D microgravity surveillance of a waterflood – Prudhoe Bay, Alaska (SPE 101762). SPE Annual Technical Conference & Exhibition.

- Chadwick, R. A., Noy, D., Arts, R., & Eiken, O. (2008). Quantification issues from the latest time-lapse seismic data at the Sleipner CO₂ injection operation. Proceedings of GHGT-9.
- Gadikota, G., Park, A. H. A., & Yiacoumi, S. (2014). Carbonation of silicates for CO₂ sequestration: Role of organic acids in accelerating reaction kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 240, 559–567. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.070>
- Gao, J., Choo Sze Shiong, S., & Liu, Y. (2023). Reduction of CO₂ to chemicals and fuels: Thermocatalysis versus electrocatalysis. *Chemical Engineering Journal*, 472, 145033. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145033>
- GreenFacts. (s.f.). Consenso científico sobre captura y almacenamiento de CO₂. GreenFacts. <https://www.greenfacts.org/es/captura-almacenamiento-co2/captura-almacenamiento-co2-greenfacts-level2.pdf>
- Gutiérrez Guerrero, J. (2025). Tecnologías de captura, almacenamiento y utilización de carbono: Oportunidades y retos para Colombia. Repositorio Universidad del Atlántico. <https://repositorio.uniatlantico.edu.co/items/61113d2f-799e-4804-ae92-d7def055f1d3>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2005). Captación y almacenamiento de dióxido de carbono: Resumen para responsables de políticas (Informe especial). IPCC. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_sp.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

International Energy Agency. (2023). *CO₂ emissions in 2023 – Global energy review*. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2023>

IntechOpen. (2022). *Carbon capture, utilization and storage in Latin America*. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/82822>

Kelemen, P., Matter, J., Streit, E., Rudge, J., Curry, W., & Blusztajn, J. (2011). Rates and mechanisms of mineral carbonation in peridotite: Natural processes and recipes for enhanced rates. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39(1), 545–576. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-040610-133431>

Lackner, K. S., Park, A. H. A., & Wright, A. (2019). Mineral carbonation: From fundamentals to field applications. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 84(1), 307–339. <https://doi.org/10.2138/rmg.2018.84.10>

Lackner, K. S., Wendt, C. H., Butt, D. P., Joyce Jr, E. L., & Sharp, D. H. (1995). Carbon dioxide disposal in carbonate minerals. *Energy Conversion and Management*, 36(6–9), 527–534. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(95\)00103-7](https://doi.org/10.1016/0196-8904(95)00103-7)

Mariño-Martínez, J. E., Morales, R., & Torres, J. (s.f.). Posibilidades de captura y almacenamiento geológico de CO₂ (CCS) en Colombia – caso Tauramena (Casanare). *Ingeniería y Universidad*, 20(2), 113–132.

<https://www.redalyc.org/jatsRepo/3496/349654901008/349654901008.pdf>

Mathieson, A., Wright, I., Roberts, D., & Ringrose, P. (2008). Satellite imaging to monitor CO₂ movement at Krechba, Algeria. *Proceedings of GHGT-9*, Paper 307.

Meyer, J. P. (2007). Summary of carbon dioxide enhanced oil recovery (CO₂EOR) injection well technology. American Petroleum Institute.

O'Connor, W. K., Dahlin, D. C., Nilsen, D. N., Gerdemann, S. J., Penner, L. R., & Rush, G. E. (2005). Mineral carbonation: An approach to carbon dioxide sequestration. *Energy*, 30(14), 2751–2774. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.07.024>

Ochoa-Garfias, A. F., Trejo-Bautista, R., González-Abrego, D. O., & Rojo-Gómez, E. G. (2024). Captura, almacenamiento y conversión de CO₂: Nuevas técnicas de reducción. *Pädi*, 11(22), 20–27. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11i22.11056>

Parada González, N. A. (2017). Tecnología de captura y almacenamiento de CO₂ en sectores industriales [Monografía de especialización, Fundación Universidad de América]. Repositorio Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/items/6a5df064-e295-404d-8a70-3f30ba6319fc>

- Power, I. M., Dipple, G. M., & Southam, G. (2013). Carbonation of ultramafic rocks: Insights from laboratory experiments and natural analogues. *Chemical Geology*, 343, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.09.005>
- Power, I. M., Wilson, S. A., Thom, J. M., Dipple, G. M., & Southam, G. (2013). Magnesium silicate mineral carbonation: Chemistry, mineralogy, and carbon storage potential. *Environmental Science & Technology*, 47(13), 7521–7529. <https://doi.org/10.1021/es400675k>
- Reyes Pérez, E. M. (2018). Conversión de dióxido de carbono (CO₂) a productos químicos de valor agregado mediante reducción electroquímica [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de México]. UAEMéx.
- Sanna, A., Uibu, M., Caramanna, G., Kuusik, R., & Maroto-Valer, M. M. (2014). A review of mineral carbonation technologies to sequester CO₂. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(9), 1760–1789. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.03.007>
- Sanna, A., Wang, J., & Maroto-Valer, M. M. (2014). Direct ambient temperature mineral carbonation of Mg-silicates for carbon dioxide sequestration. *Chemical Engineering Journal*, 236, 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.084>

Sipilä, J., Teir, S., & Zevenhoven, R. (2008). Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation: Literature review update 2005–2007. VTT Technical Research Centre of Finland.

Springer. (2025). Biotechnological and chemical pathways for CO₂ utilization: Recent advances and challenges. *Waste and Biomass Valorization*, 16, 321–338.
<https://doi.org/10.1007/s12649-025-02981-2>

Talley, D. J., Davis, T. L., Benson, R. D., & Roche, S. L. (1998). Dynamic reservoir characterization of Vacuum Field. *The Leading Edge*, 17(10), 1396–1402.
<https://doi.org/10.1190/1.1438084>

Zhang, Y., Li, S., & Wang, T. (2023). Economic and energy costs of CO₂ capture technologies: A comparative review. *Energy Reports*, 9, 1640–1655.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.115>

