

Normatividad internacional en CCUS y posibilidad de implementación en Colombia

Liceth Katerine Cortés Gaona y Andreina Solano Buitrago

Trabajo de Grado para optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Emiliano Ariza León

Ingeniero de Petróleos

Doctor en Ingeniería Química

Codirector

Nelly Piedad Rubio Rubio

Doctora en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

Mi deseo es dedicarle este proyecto y mi carrera profesional a Dios por darme la fuerza para no desfallecer ante tantas adversidades y confiar que todo se da en su tiempo, por darme tanta sabiduría y entendimiento siempre, a mis padres Gloria Gaona y Alberto Cortés que siempre han sido mi apoyo mi motivación siempre han creído en mí y con esfuerzo y lucha me ayudaron a cumplir con mi sueño de ser ingeniería de Petróleos.

A mis hermanas Leidy Joanna, Nasly Paola y Adriana Fernanda que siempre me han demostrado su admiración cariño, comprensión y apoyo son las mejores del mundo

A los buenos amigos de la universidad con quienes pude compartir aventuras y ser familia en este proceso.

A la Universidad Industrial de Santander por darme esta oportunidad y creen en que los estudiantes pueden demostrar su potencial a la escuela de ingeniería de petróleo quienes nos guiaron en este proceso educativo.

*Liceth Katherine Cortés Gaona*

### **Agradecimientos**

Le doy gracias a Dios por darme la sabiduría y la vida para finalizar esta aventura de ser profesional, porque en todo momento me alentó a continuar y perseverar ser mi guía en todos estos años, a mis padres porque sin ellos no soy nada, me aman y me comprenden de manera incondicional.

A mis hermanas que sin su cariño y aliento mi vida no sería nada son las mejores, solo tengo gratitud y amor en mi corazón por ustedes por ayudarme de todas las formas posibles a culminar esta carrera profesional

A la Doctora Nelly Rubio quien fue mi guía en este proyecto nunca me desamparo, me dio su mano amiga y es mi ejemplo por seguir.

A la Magister Ruth Navas, porque me guio y me ayudo cuando lo necesite en la realización del trabajo de grado, me oriento con mucha paciencia y cariño, gracias profe

A la Universidad Industrial de Santander por darme la oportunidad de pertenecer a su alma mater, y poder desarrollarme como futuro profesional.

Amigos que desde el día uno que conocí tanto en la sede Socorro me alentaron y a los nuevos en la sede principal. Gracias infinitas gracias por todo. Y a los que ya no están en esta tierra Edwar García por tu amistad incondicional te recordare siempre.

Y me agradezco a mi porque me propuse retos en esta carrera y los cumplí, por ser perseverante, por luchar, por nunca desfallecer, y por lograr este proyecto y poder dar un paso a la vida profesional que me espera con mucho éxito y la bendición de Dios.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Objetivos.....	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos .....	15
2 Marco legal implementado en Colombia para CCUS.....	16
2.1 Decreto 1073 (3 junio 2015).....	17
2.2 Ley 2099 de 2021 (Julio 10).....	19
2.4 Ley 2169 (22 diciembre 21).....	20
3 Marcos internacionales sobre el cambio climático .....	20
3.1. Protocolo de Kioto .....	20
3.2 Protocolo de Montreal.....	22
3.3 Convenio de Londres .....	23
3.4 Acuerdo de Paris .....	24
4 Captura y almacenamiento de CO <sub>2</sub> .....	25
4.1 Captura de CO <sub>2</sub> .....	25
4.2 Tipos de almacenamiento para CO <sub>2</sub> .....	29
4.3 Formaciones geológicas posibles para almacenamiento.....	31
5 Normatividad internacional sobre CCUS .....	32
5.1 Normatividad de Estados Unidos para almacenamiento de Dióxido de Carbono .....	32
5.2 Normativa Internacional Unión Europea .....	50
5.3 Normativa Alberta Canadá .....	52

5.4 Normativa Australiana .....	53
5.5 Normativa Noruega.....	55
5.6 Normativa Reino Unido.....	56
6 Evaluación de los principales aspectos geomecánicos para la inyección y almacenamiento de CO <sub>2</sub> .....	57
6.1 Posibles riesgos geomecánicos durante el proyecto CCS.....	59
6.2 Falla de la roca sello: .....	60
6.3 Criterios de falla:.....	62
6.4 Pérdida de integridad del pozo:.....	63
6.5 Diagrama de flujo para análisis geo mecánico de almacenamiento geológico de CO <sub>2</sub> .....	64
6.6 Operar por debajo del criterio de falla de Mohr-Coulomb .....	65
6.7 Principios para las mejores prácticas geomecánicas:.....	67
7 Análisis comparativo de los marcos legales y normativos internacionales para evaluación del subsuelo en los proyectos de CCUS .....	67
8 Conclusiones .....	81
9 Recomendaciones .....	83
Bibliografía .....	84

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Normativa colombiana</i> .....	16
Tabla 2 <i>Análisis comparativo de las categorías de los marcos regulatorios internacionales</i> .....	70
Tabla 3 <i>Aspectos de la Regulación de CCUS Estados Unidos</i> .....	72
Tabla 4 <i>Aspectos de la Regulación de CCUS Noruega</i> .....	74
Tabla 5 <i>Aspectos de la Regulación de CCUS Unión Europea</i> .....	76
Tabla 6 <i>Aspectos de la Regulación de CCUS Reino Unido</i> .....	77
Tabla 7 <i>Aspectos de la Regulación de CCUS Canadá</i> .....	78
Tabla 8 <i>Aspectos de la Regulación de CCUS Australia</i> .....	78

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Sistemas de captura de CO<sub>2</sub></i> .....	26
Figura 2 <i>Sistema de Post-combustión</i> .....	27
Figura 3 <i>Aspectos a evaluar en la caracterización de un sitio.</i> .....	30
Figura 4 <i>Estructura del programa de Control de Inyección Subterránea (UIC)</i> .....	33
Figura 5 <i>Clasificación de los Pozos de Inyección</i> .....	35
Figura 6 <i>Ciclo de vida de un proyecto pozo clase VI</i> .....	37
Figura 7 <i>Clase VI proceso de permisos</i> .....	37
Figura 8 <i>Lista de verificación de la solicitud de permiso de pozos Clase VI</i> .....	38
Figura 9 <i>Proyectos a gran escala desarrollados en Estados Unidos</i> .....	50
Figura 10 <i>Proyectos destacados en la Unión europea</i> .....	52
Figura 11 <i>Proyectos de Alberta CCUS</i> .....	53
Figura 12 <i>Proyectos de CAC en Australia</i> .....	54
Figura 13 <i>Proyectos de CAC en Noruega</i> .....	56
Figura 14 <i>Proyectos CAC en Reino Unido</i> .....	57
Figura 15 <i>Variación de la densidad de CO<sub>2</sub> respecto a la profundidad</i> .....	59
Figura 16 <i>Riesgos geo mecánicos potenciales causados por la acumulación de presión de poro</i> .....	61
Figura 17 <i>Tipos de falla de la Roca</i> .....	62
Figura 18 <i>Posibles vías de fuga el revestimiento y cementación</i> .....	63
Figura 19 <i>Diagrama de flujo para el análisis geomecánico</i> .....	65

Figura 20 *Círculos de Mohr con los criterios de Coulomb que muestran envolventes de falla*  
..... 66

Figura 21 *Aspectos claves en los marcos regulatorios CCUS*..... 68

Figura 22 *Aspectos importantes para tener en cuenta en un proyecto de captura  
almacenamiento y usos de CO<sub>2</sub>*..... 69

## Glosario

**GEI:** Gases de efecto invernadero

**CCUS:** Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono (carbon capture utilization and storage)

**Captura de CO<sub>2</sub>:** Almacenamiento de carbon para reducir las emisiones corrosivas que afectan la capa de ozono.

**USDW:** Underground Sources of Drinking Water (Fuentes Subterráneas De Agua Potable)

**CAC:** Captura y almacenamiento de Carbono

## Resumen

**Título:** Normatividad internacional en CCUS y posibilidad de implementación en Colombia

**Autor:** Liceth Katherine Cortés Gaona y Andreina Solano Buitrago\*\*

**Palabras Clave:** CCUS, Almacenamiento de CO<sub>2</sub>, cambio climático,

**Descripción:** La Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC) es una tecnología clave en la lucha contra el cambio climático. Esta tecnología tiene como propósito disminuir las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), uno de los principales GEI, provenientes de actividades industriales y de generación de energía. La CAC no solo representa una herramienta vital para la reducción de emisiones, sino que también puede ser un componente clave en una estrategia global de sostenibilidad, ayudando a descarbonizar sectores industriales y promoviendo el cambio hacia una economía escasa de carbono.

Sin embargo, los desafíos de la implementación de esta tecnología incluyen costos, técnicos, de seguridad capacidad de almacenamiento y requisitos regulatorios. Adicionalmente la percepción y aprobación pública también puede representar un desafío importante pues apunta preocupaciones sobre su seguridad y eficacia. Por tanto, el desarrollo de marcos legales claros y robustos que regulen la captura, el transporte y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, garantizando la seguridad ambiental y la efectividad a largo plazo representa un factor crucial. En este estudio se analizan normativas de diferentes países como Noruega, Australia, Estados Unidos, Reino Unido, Canadá y la Unión Europea, donde han sido establecidos marcos regulatorios integrales para la aplicación de la tecnología CAC.

Asimismo, se revisan los principales aspectos geomecánicos que se deben considerar en los procesos de inyección de almacenamiento de CO<sub>2</sub> para mitigar los riesgos de contención relacionados con la integridad de las formaciones, estabilidad de rasgos geológicos, así como integridad de pozo. Consecuentemente, este estudio presenta una perspectiva integral de la tecnología CAC, el marco regulatorio requerido para una potencial implementación en Colombia donde esta tecnología se pueda convertir en un pilar estratégico para la Transición Energética en el país.

---

\*\* Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Emiliano Ariza León. Doctor en Ingeniería Química. Codirectora: Nelly Piedad Rubio Rubio. Doctora en Ingeniería Civil

### Abstract

**Title:** International regulations on CCUS and the possibility of implementation in Colombia \*

**Author(s):** Liceth Katerine Cortés Gaona y Andreina Solano Buitrago \*\*

**Key Words:** CCUS, CO<sub>2</sub> storage, climate change.

**Description:** Carbon Capture and Storage (CCS) is a key climate change mitigation technology. This technology aims to reduce carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), one of the main GHGs, from industrial activities and energy generation. CCS not only represents a vital tool for emissions reduction, but it can also be a key component in a global sustainability strategy, helping to decarbonize industrial sectors and promoting the shift to a low-carbon economy.

However, the main challenges of implementing this technology include cost, technical, security, storage capacity and regulatory requirements. In addition, public perception and validation can also represent a significant challenge as it points to concerns about safety and effectiveness. Therefore, the development of robust and effective legal frameworks that regulate the capture, transport and storage of CO<sub>2</sub>, ensuring environmental safety and long-term effectiveness represents a crucial factor. This study analyzes regulations from different countries such as Norway, Australia, the United States, the United Kingdom, Canada, and the European Union, where comprehensive regulatory frameworks have been established for the application of CCS technology.

Furthermore, the main geomechanical aspects that must be considered in CO<sub>2</sub> storage injection processes to guarantee containment have been reviewed in this study. Therefore, this study presents a comprehensive perspective of CCS technology, the regulatory framework required for a potential implementation in Colombia where this technology can become a strategic pillar for the Energy Transition in the country.

---

\* Degree Work

\*\* Industrial University of Santander. Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director Emiliano Ariza León. Codirectora Nelly Piedad Rubio Rubio.

## Introducción

Actualmente los impactos de la crisis climática son drásticos y si no se toman las medidas necesarias puede tener consecuencias catastróficas e irreversibles para el planeta. La finalidad es mantener el límite de calentamiento global a 1.5 °C para evitar que: 1) al final de este siglo, entre nueve y diez mil millones de personas no estén expuestas a olas de calor cada año; 2) ochenta y cinco millones de personas no se verían impactadas por las inundaciones de los ríos; 3) quinientos millones de personas no se verían afectadas por un mayor estrés hídrico; y 4) tres millones de kilómetros cuadrados de tierras de cultivo seguirían siendo viables para la agricultura- aproximadamente del tamaño de un país como la India (IPCC, 2012; CCSx - Edimburgo, 2022). La humanidad se enfrenta a un gran reto, pero muchas soluciones y tecnologías son conocidas, y existen marcos y acuerdos globales que son la guía para el avance en la protección del medio ambiente, contemplando tres amplias categorías de acción como la mitigación de las emisiones, adaptación a los impactos climáticos y financiamiento necesario. Estos marcos y acuerdos globales son: los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el Acuerdo de Paris (Naciones Unidas, 2022).

Para alcanzar este objetivo, la transición energética juega un rol importante, se basa en cambiar de un sistema energético consolidado solamente en los combustibles fósiles a un sistema con un mix de fuentes de energía de bajas emisiones o sin emisiones de carbono. La electrificación de los dispendios desempeña un papel crucial en este proceso, al sustituir la electricidad generada exclusivamente a partir de combustibles fósiles por aquella proveniente de fuentes renovables. Este cambio no solo contribuye a la limpieza de otros sectores, como el transporte, sino que también implica la digitalización de las redes, lo que resulta en una mejora significativa en la

eficiencia energética. Por tal motivo, a nivel global se están promoviendo y desarrollando proyectos que impulsen al uso de fuentes de energías no convencionales de energía renovable para mitigar el cambio climático y cumplir con el límite de calentamiento global establecido. Ya existen varias tecnologías que permitirían evitar las emisiones de CO<sub>2</sub> y los GEI tales como: captura utilización y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CCUS en sus siglas en inglés); valorización del CO<sub>2</sub>; uso de combustibles que emitan menos CO<sub>2</sub>; uso de energías renovables; uso de energía nuclear y la eficiencia energética (Cerezales P, et al 2014).

Los proyectos de tecnología CCUS, a partir de su desarrollo tecnológico tienen como objetivo reducir los gases en especial el CO<sub>2</sub> de capa de ozono, basado en la captura y almacenamiento de forma segura de este gas para uso futuro. con el fin de poder usarlo en las alternativas de recuperación mejorada de petróleo, se suma también a la solución dentro de la política de reducción de GEI, este tipo de proyectos ha demostrado ser capaz de minimizar las emisiones contaminantes a la atmosfera y en los combustibles con alto grado de carbono, y demás sectores como cementeras e industria de acero dado que actualmente no han desarrollados proyectos para su descarbonización (Repsol,2023, párr.1-2). El despliegue exitoso de CCUS se basa en el establecimiento de marcos legales y regulatorios para garantizar la administración eficaz de las actividades de CCUS y almacenamiento seguro de CO<sub>2</sub>. Varios países ya han desarrollado marcos legales y regulatorios integrales para CCUS en cumplimiento de los objetivos climáticos mundiales. (IEA, 2022).

Este proyecto tiene como objetivo investigar el desarrollo de los marcos normativos legales y regulatorios integrales implementados internacionalmente para los proyectos de captura almacenamiento y uso de CO<sub>2</sub> (CCUS), direccionado a la evaluación del subsuelo: comprendiendo desde la selección del sitio, los estudios de prefactibilidad y factibilidad, proyecto piloto,

monitoreo, validación e implementación de los proyectos de menor a mayor escala. La finalidad de esta investigación es servir como referencia y base para que se pueda estructurar y plantear la normatividad que permita para el desarrollo de proyectos de CCUS en Colombia.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Analizar los marcos legales y normativas internacionales aplicados a los proyectos CCUS, con el fin de que puedan ser una referencia o guía, para la elaboración de los marcos regulatorios en la evaluación del subsuelo de los diferentes escenarios geológicos en Colombia, potenciales para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

### **Objetivos específicos**

- Revisar la información de los marcos legales y normativos internacionales para el almacenamiento de CO<sub>2</sub> en los diferentes escenarios geológicos.
- Evaluar los criterios y aspectos estipulados por los marcos regulatorios internacionales, para los proyectos de almacenamiento de CO<sub>2</sub> en los diferentes escenarios geológicos.
- Realizar un análisis comparativo de la normatividad internacional que pueda servir como referencia o guía de la elaboración de los marcos regulatorios de la evaluación de subsuelo para proyectos CCUS en los diferentes escenarios geológicos en Colombia.
- Analizar los principales aspectos geomecánicos que se tienen en cuenta para el análisis de riesgos asociados con la operación de inyección durante el almacenamiento de CO<sub>2</sub> tales como integridad de sello, estabilidad de fallas de formación de yacimiento e integridad del pozo.

## 2 Marco legal implementado en Colombia para CCUS

En Colombia, la implementación de las tecnologías de CCUS, se considera una iniciativa de mitigación por lo cual se reglamentan parcialmente los artículos 22 y 57 de la Ley 2099 de 2021, el artículo 264 de la Ley 2294 de 2023 que adopta el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 y se adiciona el Título VIII a la Parte 2 del Libro 2 del Decreto 1073 de 2015, en relación con la implementación de tecnologías de Captura, Utilización y Almacenamiento de carbono (CCUS). Adicionalmente, la Ley 2169 de 2021 impulsa el desarrollo bajo en carbono del país. La Tabla 1 resume las leyes/decreto de la normativa colombiana relacionada con la implementación de las tecnologías de CCUS.

**Tabla 1**

*Normativa colombiana*

Titulo	Entidad	Fecha	Referencia
<b>Decreto 1073</b>	Ministerio de Minas y Energía	3 de Junio del 2015	TÍTULO VIII Tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de dióxido de carbono (CCUS) en el sector minero energético, sección 1, 2 y 3 captura y almacenamiento y transporte de carbono y demás disposiciones para uso de la tecnología en CCUS (Misterio de Minas y Energía, Decreto 1073,2015).
<b>Ley 2099</b>	Congreso de la republica	10 de Julio del 2021	Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones (Congreso de la república, Ley 2099,2021).
<b>Ley 2169</b>	Congreso de la republica	22 de Diciembre 2021	Por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono neutralidad y resiliencia climática y se dictan otras disposiciones (Congreso de la República, Ley 2169,2021).

## **2.1 Decreto 1073 (3 junio 2015)**

Con el propósito de establecer medidas orientadas a ejecutar las tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) en el sector minero energético se denota el Título VIII tecnologías de CCUS en el sector minero energético capítulo 1 en la sección de generalidades (3.1.1) indica que el objetivo de este título es establecer regulaciones para promover, implementar y desarrollar tecnologías de CCUS en todos los proyectos de las industrias minera y energética, incluyendo los procesos que generan dióxido de carbono como gas sobrante, identificando así mecanismos, métodos por medio de los cuales se pueda obtener una medición y verificación adecuada garantizando así que la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno de las dos clases verde y azul, como también las tecnologías CCUS.

Es importante resaltar que se debe tener en cuenta definiciones para tener una mejor comprensión de este decreto como: almacenamiento de CO<sub>2</sub> e inyección de dióxido de carbono capturado en zonas para su almacenamiento permanente y seguro.

En la sección 1 Captura de dióxido de carbono, comprende el diseño e instalación y equipos de captura de CO<sub>2</sub> por medio del ministerio de minas y energía que bajo su dirección impondrá reglamentos técnicos que establezcan los estándares mínimos que deben satisfacer en su cumplimiento, instalaciones y equipos utilizados para la captura de dióxido de carbono en actividades particulares en el ámbito energético, también se deberá garantizar la reducción de emisiones mediante mecanismos que aseguren la implementación de tecnologías de captura de CO<sub>2</sub> reducirán de forma eficaz las GEI.

Sección 2 Transporte y utilización del dióxido de carbono capturado: la CREG (Comisión reguladora de energía y gas) llevará a cabo una evaluación de la viabilidad técnica y de las condiciones en las que la infraestructura de transporte y distribución de gas natural podría ser

empleada para el traslado y eliminación del CO<sub>2</sub>, según los resultados de esta evaluación, la comisión establecerá los ajustes necesarios en el método de compensación para la infraestructura mencionada previamente, si llega a ser factible o no, las entidades como la ANH (agencia nacional de hidrocarburos) y el ministerio de minas y energía, se encargaran de establecer la regulación técnica para la ejecución del recobro mejorado con CO<sub>2</sub> capturado con el fin de utilizarlo al final de su ciclo de vida y manejo de su disposición .

Sección 3 Almacenamiento de dióxido de carbono capturado: se establecerán una serie de reglamentos técnicos para el almacenamiento de CO<sub>2</sub> vigilado por el ministerio de minas y energía con el apoyo del servicio geológico colombiano, la ANH y demás empresas que se unan a la realización de este tipo de actividad, se guiaran bajo el amparo de estos reglamentos técnicos para la inyección y almacenamiento y cada empresa deberá proponerse propósitos propios para cumplir el reglamento y aportar a la disminución de GEI. El ministerio de minas y energías definirá como se darán los permisos de operación para las compañías interesadas en realizar captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> también deberán gestionar licencias y supervisará su cumplimiento de manera adecuada.

En el capítulo II del presente decreto se aborda los permisos ambientales de cómo se regirá las actividades y etapas en los proyectos que usen tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) estas acciones darán paso para futuros permisos de uso y aprovechamiento de los recursos naturales o un permiso ambiental. Todo esfuerzo de mitigación que incluya tecnologías para capturar, utilizar y almacenar el carbono (CCUS) deben seguir las directrices establecidas en el artículo 175 de la Ley 1753 de 2015, que se refiere al sistema de monitoreo, reporte y verificación, o cualquier normativa que la modifique, amplíe o reemplace. (Misterio de Minas y Energía, Decreto 1073,2015).

## 2.2 Ley 2099 de 2021 (Julio 10)

La presente ley trata sobre las regulaciones para la transición energética, la reactivación de la economía del país a través de la dinamización del mercado energético, teniendo en cuenta aspectos como la difusión y desarrollo de fuentes no convencionales de energía.

Ítems importantes que trata la Ley: Fomentar, motivar y respaldar el progreso de las labores relacionadas con la generación, aplicación, almacenamiento, gestión, funcionamiento y conservación de fuentes de energía no convencionales, en especial aquellas que son de naturaleza renovable. Generar un Fondo de Energías no Convencionales y Gestión Eficiente de Energía (FENOGE) como un patrimonio autónomo con responsabilidad y vigilancia que deberá ser tratado, se busca promocionar la producción de energía eléctrica mediante fuente no convencionales, incentivando la investigación, el progreso y la inversión en este campo.

En el capítulo IV normativa sobre fuentes no convencionales de energía argumenta sobre la tecnología de captura, utilización y almacenamiento de CO<sub>2</sub> guiado por el gobierno nacional, el desarrollo de la normativa adecuada para la promoción y desarrollo de esta tecnología (CCUS) con el objetivo de almacenar y capturar CO<sub>2</sub> de forma segura a gran escala y para uso en diferentes procesos productivos en que se requiera

El capítulo VIII especifica otras disposiciones a través del gobierno nacional se establecerán mecanismos y metodologías precisas y transparentes para medir y verificar de manera efectiva el cumplimiento de los acuerdos nacionales e internacionales de Colombia en relación con la reducción de emisiones. el objetivo es garantizar que todas estas actividades tengan un balance neto de emisiones igual a cero, asegurando así el estricto cumplimiento de la participación de

Colombia en el acuerdo de París y todos los deberes propuestos determinados legalmente en relación con el cambio climático. (Congreso de la República, Ley 2099, 2021).

#### **2.4 Ley 2169 (22 diciembre 21)**

Esta ley tiene como finalidad definir objetivos y acciones mínimas para lograr la neutralidad de carbono, la capacidad de trabajar en pro del cambio climático y la promoción de avance mediante bajas emisiones de carbono en el territorio nacional, con la fijación de metas a corto, mediano y largo plazo. Esto se realiza en conformidad con los compromisos internacionales que ha adquirido la República de Colombia en relación con esta temática.

En el título II se observan las metas y medidas para que se logre la mitigación de los GEI, presentando objetivos nacionales de minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2030, así como las medidas mínimas necesarias para alcanzarlos.

Título III: Acciones para alcanzar los objetivos nacionales en términos de reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera, se tomarán medidas en el sector de minería y energía. Se deberán incluir en los planes sectoriales actuales y futuros, mediante iniciativas dirigidas a cumplir con los objetivos propuestos por el estado sobre la reducción de emisiones, además de crear las condiciones adecuadas para promover e impulsar la implementación y avance de acciones relacionadas con la eficiencia energética en los sectores de hidrocarburos, minería y electricidad. Se implementarán medidas como seguimiento y financiación para obtener proyectos desarrollados bajos en carbón de la mano de los tratados internacionales sobre cambio climático logrando así una neutralidad del carbono para el año 2050.

### **3 Marcos internacionales sobre el cambio climático**

#### **3.1. Protocolo de Kioto**

**COP:** La Conferencia de las Partes (COP) es la máxima instancia de resolución dentro del marco de la convención. Está compuesta por los países que han ratificado la convención, conocidos como las partes. La COP reúne a los delegados de los países miembros y es el único órgano con la autoridad para tomar determinaciones acerca de la implementación de la convención. Esta conferencia se celebra anualmente en el país que ofrece ser anfitrión. (García C , Vallejo, G, Lou, M, & Escobar, E., 2016)

**Países Anexo I:** Los países que conforman el grupo de países desarrollados y las naciones de Europa del este, cuyas economías estaban en un proceso de cambio durante las negociaciones de la convención, son conocidos como países del Anexo I. Estos países tienen la responsabilidad de tomar acción para reducir las emisiones de GEI.

**Países Anexo II:** Países desarrollados que tienen como principal objetivo la mitigación de GEI, tiene que generar ayudas financiera y tecnológica para que los países en vía de desarrollo puedan cumplir con sus compromisos ante la convección” (García et al, 2016, p.7).

El protocolo de Kioto es un proyecto que se crea con el fin de mitigar el cambio climático antropogénico, brindando ciertas pautas y cuestionamientos sobre el cambio climático, la meta principal es la reducción de los gases contaminantes, debido a la alta producción de GEI, el incremento de la producción de estos gases genera el calentamiento global y presentara agresivas temperaturas en pocos años. (Rodríguez S, Liliana , 2007)

El protocolo de Kioto propone promover un desarrollo sostenible y diversas propuestas para cumplir con la reducción de emisiones, dentro de una mejor optimización y protección de los sumideros y depósitos de los GEI, no controlados por el protocolo de Montreal, la promoción de su investigación como guía para las nuevas energías alternativas de tecnologías de secuestro de CO<sub>2</sub> y de tecnologías avanzadas entre otros. (Naciones Unidas, 1998)

El Protocolo ha motivado a varios gobiernos a promulgar legislaciones y políticas que les permitan tomar acciones para cumplir con la reducción de emisiones de GEI. También ha instado a las empresas a dar prioridad al medio ambiente al tomar decisiones relacionadas con sus inversiones. Además, ha contribuido a la creación de los bonos de carbono. (Fundacion Bioplanet Paris, 2015).

### **3.2 Protocolo de Montreal**

El protocolo de Montreal se rige por una serie de ajustes y enmiendas para dar un mejor entendimiento y que sea más factible a países tanto desarrollados como los que van en pro de desarrollo, en sus artículos propone controlar una serie de sustancias las cuales se producen y deben presentar ciertos niveles, y no superar el tope establecido, cada parte deberá cumplir en un periodo de 12 meses, los niveles establecidos por el protocolo y el nivel de aumento no debe superar el 10%, las sustancias son halones, tetracloruro de carbono, otros CFCs, metilcloroformo, hidrofluorocarbonos, metilbromuro, Bromoclorometano entre otros. Cada sustancia se implementa bajo una fecha que entra en vigor su control y seguimiento y las cantidades estimadas para así lograr reducir esos agentes contaminantes.

El protocolo de Montreal abarca aspectos de mayor impacto con respecto a manejo de gases nocivos en la capa de ozono y se deben tener en cuenta en la realización de proyecto que ayuden a mitigar los GEI que son contraproducentes para los seres vivos en el planeta. Estar expuesto a los rayos solares de forma moderada no con lleva riesgos. De hecho, en el caso de los seres humanos, esta radiación es importante para la producción de vitamina en la piel, Sin embargo, estar expuestos por tiempo prolongado puede tener efectos perjudiciales para la salud humana, la vida animal, las plantas, los microorganismos y la calidad del aire. Pero una exposición fuerte y

constante a los rayos solares genera gran afectación perjudicial tanto en la productividad de plantas y animales y aumenta las enfermedades en el ser humano. (Stavro, 2007).

El protocolo de Montreal presenta las enmiendas que se desarrollaron para lograr seguir enriqueciendo el protocolo y logre cumplir sus expectativas de la reducción de sustancias que dañan la capa de ozono las cuales se nombraran para su conocimiento: La enmienda de Londres (1990); La enmienda de Copenhague (1992); La enmienda de Montreal (1997); La Enmienda de Beijing (1999); (Savogal, 1995) La Enmienda de Kigali (2016). (Enviroment, 2016).

### **3.3 Convenio de Londres**

A lo largo de los años por décadas los océanos en todo el mundo han sido utilizados como lugares de disposición de residuos generados por la actividad humana, con muy poca o ninguna consideración generando fuertes efectos nocivos con esta práctica. Fue solo en la década de 1960 cuando se inicia a tomar conciencia de los resultados negativo de estas acciones imprudentes en el medio marino, los recursos marinos y otros organismos vivos. En 1972, se introdujo el Convenio de Londres, que prohibió el vertimiento de ciertos desechos en el mar y marcó un importante avance en la regulación de esta práctica y en la protección del entorno marino frente a las actividades y desechos humanos. El convenio de Londres, que se adoptó en 1996, se basa en el convenio original y actualiza sus principios. Este convenio modifico la estrategia existente con el fin de desarrollar un planteamiento más preventivo que pueda vetar el vertimiento de desechos y otras materias, algunos de estos desechos podrán evaluarse y determinar si se podrá expedir un permiso para su disposición en el mar. hasta la fecha, el convenio de Londres representa el estándar internacional más avanzado sobre la captura y el almacenamiento de carbono en depósitos

geológicos ubicados en el subsuelo marino, así como en lo que concierne a la ingeniería geológica marina.

El convenio de Londres se enfoca en el proceso de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> en depósitos geológicos submarinos. Este proceso implica separar el dióxido de carbono de fuentes industriales y energéticas, transportarlo hacia formaciones geológicas bajo el mar y mantenerlo aislado de la atmósfera a largo plazo. Se considera una opción altamente efectiva para mitigar y regular las concentraciones de GEI en la atmósfera, y se ve como un proyecto beneficioso con impactos positivos a nivel local, regional y global tanto en el corto como en el largo plazo. (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, 2008).

### **3.4 Acuerdo de París**

Dado que la contaminación ambiental constituye una afectación a toda la humanidad y que requiere la adopción de medidas para abordarla y minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, las partes deben incentivar, respetar y tener en cuenta sus respectivas obligaciones en relación con los derechos humanos, el derecho a la salud y un entorno saludable. Esto se aplica al cumplimiento de las disposiciones del Acuerdo de París, incluyendo aquellas relacionadas con la captura y almacenamiento de carbono, este acuerdo orienta a la planificación y ejecución de la gestión y disposición del CO<sub>2</sub>. Este acuerdo internacional es de suma importancia en el desarrollo de proyectos innovadores destinados a mejorar la calidad del medio ambiente y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Porque busca disminuir los límites de temperatura por debajo de los 2°C proponiendo proyectos bajo desarrollos de actividades de bajas emisiones de GEI, teniendo en cuenta medidas que se deben tomar para conservar e incrementar los sumideros y depósitos para los GEI, se anima a las partes incluidas en este acuerdo a que adopten medidas

para que se logre aplicar el desarrollo de este tipo de proyectos brindar incentivos positivos respecto a enfoques políticos reduciendo estas emisiones. Es importante destacar que esta acción no debería imponer una carga adicional a las naciones en desarrollo. Todos los procesos presentados se hacen con el fin de que se pueda generar un balance mundial, mejorar dichas medidas de aplicación y adaptación para así poder contribuir a un mejor ambiente y menos afectación y producción de los gases de efecto invernadero, estar en constante observación del cumplimiento de las políticas, para seguir en pro de la mejora y mayor viabilidad de proyectos. (Naciones Unidas, 2015).

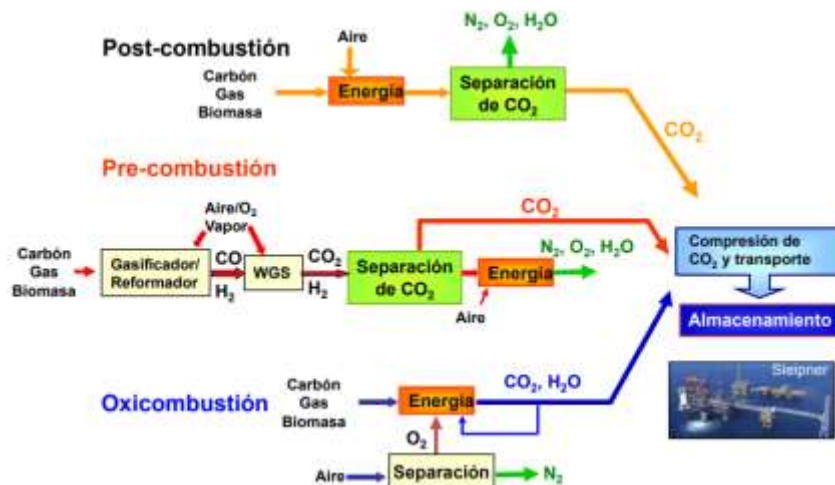
## **4 captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>**

### **4.1 Captura de CO<sub>2</sub>**

Tipos de captura de CO<sub>2</sub>: Los sistemas de captura tienen como finalidad la generación de una corriente intensa de CO<sub>2</sub> que esté lista para ser transportada y almacenada de forma permanente. Estos sistemas involucran un proceso de separación de gases a multiescala que resulta en la obtención de una corriente pura y concentrada de CO<sub>2</sub>. Estos sistemas de captura de CO<sub>2</sub> suelen ser clasificados según dónde se ubica la etapa principal de separación de gases en el sistema y qué tipo de gas se está separando. Esto puede incluir sistemas de postcombustión, precombustión y oxcombustión. (Congreso Nacional del medio Ambiente, cumbre del desarrollo sostenible, 2008). En la Figura 1 se presentan los sistemas de captura de CO<sub>2</sub>.

**Figura 1**

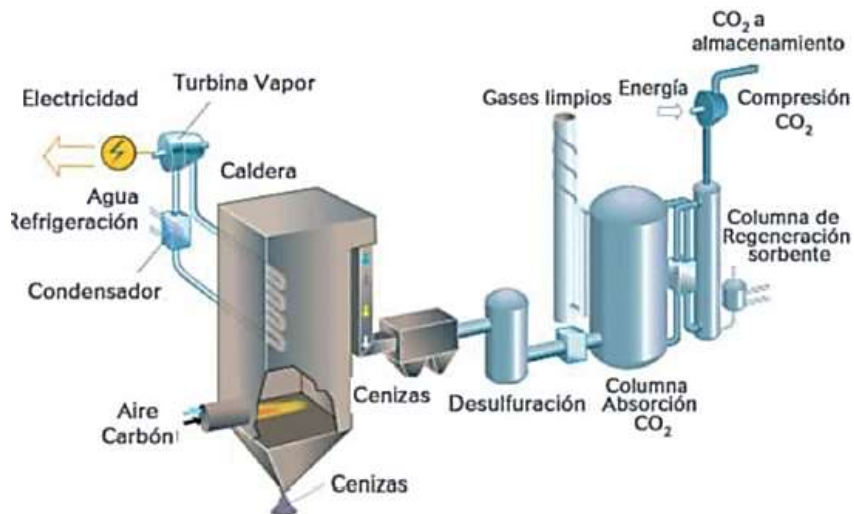
*Sistemas de captura de CO<sub>2</sub>*



*Nota.* El gráfico representa los tres tipos de captura para el dióxido de carbono y el paso a paso para su implementación. Tomado de *Objetivo descarbonización en España: tecnologías de captura, almacenamiento y usos del CO<sub>2</sub>* (González, 2023).

Postcombustión: La captura postcombustión implica la recolección de CO<sub>2</sub> después de la combustión de hidrocarburos. Por lo general, estos sistemas emplean un solvente químico para atrapar la pequeña cantidad de CO<sub>2</sub>, que oscila entre el 3% y el 15% del volumen total, presente en los gases de combustión. Estos gases de combustión están compuestos principalmente por nitrógeno del aire. Dado que el CO<sub>2</sub> tiene una baja presión parcial en estas circunstancias, se necesita procesar un gran volumen de gases para separarlo. El proceso básico de captura postcombustión se ilustra en la Figura 2. Esta alternativa es la más avanzada en términos de desarrollo para la captura de CO<sub>2</sub>. (Cerezales, Pablo Gutierrez; Burgos Rodríguez, Silvia; Vigil Montaña, Maria, 2014) Las tecnologías postcombustión son:

- Ciclo de carbonatación/calcinación; Adsorción física; Membranas; Destilación criogénica (Cerezales P et al, 2014).

**Figura 2***Sistema de Postcombustión*

*Nota:* el gráfico representa el desarrollo del sistema y el paso a paso para su implementación. Tomado de: *Tecnologías de captura de CO<sub>2</sub>, proceso de postcombustión* (Cerezales, Pablo Gutierrez; Burgos Rodríguez, Silvia; Vigil Montaña, Maria, 2014)

Pre-combustión: La captura de CO<sub>2</sub> antes de la combustión implica un proceso de descarbonización del combustible antes de que este se queme en una turbina de gas. Cuando el combustible inicial es sólido, como el carbón, coque de petróleo o biomasa (por ejemplo, astillas de madera, paja, etc.), se convierte en gas mediante la oxidación parcial del carbono en el combustible en presencia de oxígeno. (Dr. Sean McCoy, 2009).

Las tecnologías de captura antes de la combustión pueden ser utilizadas en todos los recursos de energía no renovable tales como gas natural, fuel y carbón, existiendo varias tecnologías para la obtención del gas de síntesis y otras tales como:

- Reformado de metano con vapor (SMR), es la más utilizada para producir H<sub>2</sub>
- Oxidación parcial (POX), El combustible se combina con oxígeno puro a alta presión para generar gas de síntesis.

- Reformado auto térmico (ATR), es una combinación de la oxidación parcial y del reformado.
- Gasificación. (Cerezales, Pablo Gutierrez; Burgos Rodríguez, Silvia; Vigil Montaña , Maria, 2014)

Oxy-combustión: El sistema de oxicomustión se caracteriza por llevar a cabo la combustión directa utilizando  $O_2$  en lugar de aire, eliminando así el nitrógeno presente en los gases y concentrando el dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Para lograr esto, se requiere una Unidad de Separación de Aire (ASU). Sin embargo, la corriente resultante de esta combustión no puede ser utilizada directamente en el proceso de combustión, ya que las temperaturas de la llama serían demasiado altas y superarían los límites de tolerancia de procesamiento de los elementos en la cámara de combustión. Para mitigar este problema, se introduce una corriente de enfriamiento compuesta por gases recirculados de la propia combustión. (Cerezales P et al, 2014).

Dentro de las tecnologías oxy-combustión están:

1. Unidad de Separación de Aire (ASU) La ASU produce el oxígeno necesario para la combustión en la caldera.

2. Caldera de Lecho Fluido Circulante (LFC) La caldera de tipo LFC es la que presenta mejores prestaciones para la oxicomustión,

3. Para concluir, esta tecnología incluye una Unidad de Compresión y Purificación (CPU) de  $CO_2$ . Cuando la planta opera en modo de oxicomustión, los gases de escape que no se recirculan hacia la caldera, que contienen una concentración elevada de  $CO_2$ , son dirigidos hacia la CPU. (Cerezales, Pablo Gutierrez; Burgos Rodríguez, Silvia; Vigil Montaña , Maria, 2014)

## 4.2 Tipos de almacenamiento para CO<sub>2</sub>

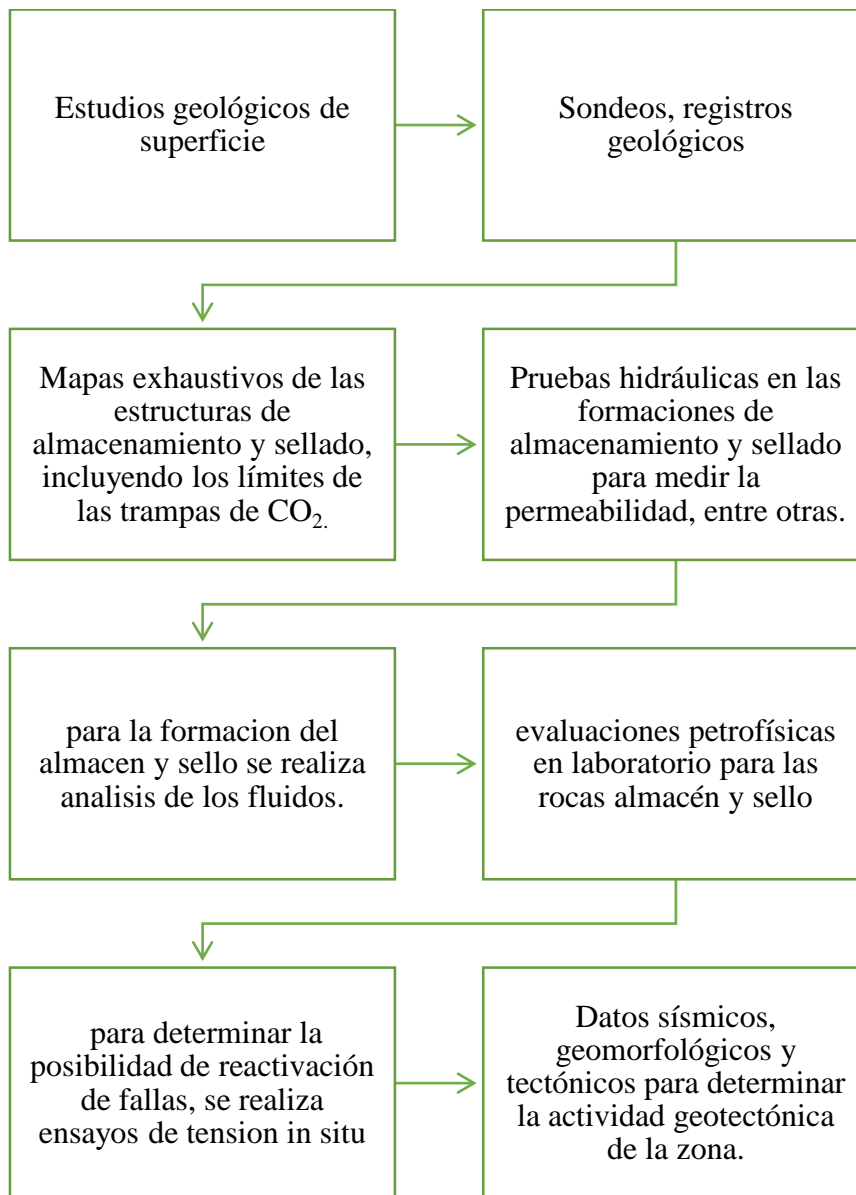
para la caracterización de un sitio de almacenamiento comúnmente se basa en métodos y técnicas de la industria del petróleo y el gas, y se caracterizan por su elevado grado de sofisticación y precisión. En la actualidad, algunos de estos métodos se están empleando para llevar a cabo la caracterización de lugares destinados al almacenamiento de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), con ciertas modificaciones o adaptaciones necesarias. La caracterización de la formación geológica que actúa como el depósito de almacenamiento abarca una variedad de aspectos que son muy diversos y requieren un enfoque multidisciplinario dentro de las técnicas se podrá observar en la figura 3 los estudios a tener en cuenta para la caracterización de un lugar para almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

Por tal razón es esencial llevar a cabo todos los estudios en la formación geológica que aloje el almacenamiento de CO<sub>2</sub> para desarrollar los modelos necesarios y comprender el comportamiento y la evolución del dióxido de carbono en dicho depósito, tipos de modelos tal como el modelo geológico-estructural 3D, modelo geoquímico, modelo de flujo, modelos de riesgos. (Perez-Estaun, Gómez , & Carrera Ramirez, 2009)

Se pueden identificar diversos métodos de acopio que permiten el almacenamiento de CO<sub>2</sub> en las formaciones rocosas, este tipo de atrapamiento estratigráfico, o el hidrodinámico, el residual, la solubilidad, la precipitación mineral y la adsorción. El mecanismo de almacenamiento predominante en cada situación específica dependerá de factores como el tipo de formación geológica utilizada, el comportamiento del CO<sub>2</sub> en el subsuelo y la duración de su retención en ese entorno. (Congreso Nacional del medio Ambiente, cumbre del desarrollo sostenible, 2008)

**Figura 3**

*Aspectos para evaluar en la caracterización de un sitio*



*Nota* el siguiente diagrama indica los diversos estudios que se deben realizar para un proyecto de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Tomada del almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>, una de las soluciones al efecto invernadero, por (Perez-Estaun, Gómez , & Carrera Ramirez, 2009)

### 4.3 Formaciones geológicas posibles para almacenamiento

**1. Acuíferos salinos profundos:** El CO<sub>2</sub> se puede almacenar en acuíferos profundos que pueden estar o no conectados a la superficie. En el caso de acuíferos profundos no conectados o aislados, se trata de formaciones que poseen algún tipo de atrapamiento estructural, ya sea de tipo anticlinal o estratigráfica. En estas trampas el CO<sub>2</sub> tiende a ascender debido a su menor densidad en comparación con el agua subterránea, queda retenido debajo de una capa impermeable o confinante que actúa como una protección sello para contenerlo. (González, y otros, 2018).

**2. Campos agotados de petróleo y gas:** El CO<sub>2</sub> se puede almacenar en campos agotados de petróleo o en campos que aun estén en producción, al implementar el proceso EOR aportará un beneficio a los costos de captura y ayudará a incrementar presión en el yacimiento utilizándose como última opción en el incremento de la recuperación del petróleo o el gas. (Congreso Nacional del medio Ambiente, cumbre del desarrollo sostenible, 2008)

**3. Capas de Carbón:** Las capas de carbón pueden ser consideradas como potenciales sitios de almacenamiento de CO<sub>2</sub>, con el mecanismo de retención basado en la adsorción. Cuando se inyecta CO<sub>2</sub> en las capas de carbón, este se adhiere a la estructura de poros de manera que desplaza el CH<sub>4</sub> previamente presente en esas capas. (Congreso Nacional del medio Ambiente, cumbre del desarrollo sostenible, 2008)

**4. Formaciones salinas profundas:** Estas formaciones están constituidas por rocas sedimentarias que poseen una porosidad y permeabilidad efectiva, y albergan fluidos salinos en sus poros sin haber sido afectadas por aguas superficiales. Es necesario que estén geológicamente aisladas y ubicadas a profundidades superiores a las formaciones de agua dulce destinadas al consumo humano. La estructura geológica debe mantenerse sólida y sin deformaciones

significativas (fallas o fracturas) para minimizar el riesgo de fugas del CO<sub>2</sub> inyectado. Además, es preferible que se encuentre en áreas con actividad sísmica baja o nula. (Galarza Celia, 2013).

## **5 Normatividad internacional sobre CCUS**

### **5.1 Normatividad de Estados Unidos para almacenamiento de Dióxido de Carbono**

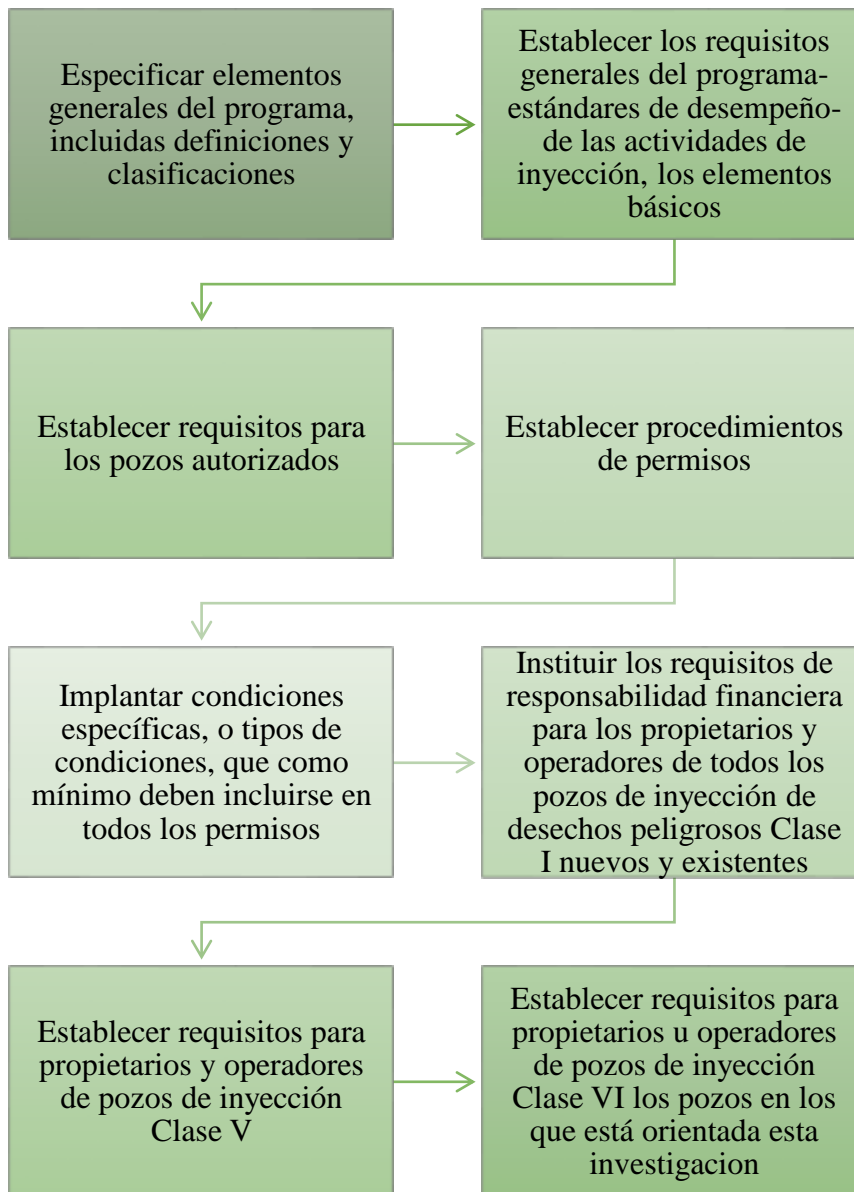
Estados Unidos es uno de los países pioneros en desarrollar proyectos para la captura, utilización y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (siglas en inglés CCUS), realizando un trabajo constante para estar a la vanguardia y seguir mejorando a fin de dar respaldo a la realización de este tipo de proyectos. El país ha venido fortaleciendo de forma exitosa la normativa direccionada a actividades que contemplan un trabajo seguro y protegido en captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (siglas en inglés CCS), y se pueden observar como principales instrumentos regulatorios federales ambientales que direccionan y soportan estos proyectos.

#### **Reglamento federal de control de inyección subterránea UIC (Underground Injection Control)**

El propósito de las normativas federales es evitar la contaminación de las fuentes subterráneas de agua potable (siglas en inglés USDW) durante la operación de inyección de fluidos en pozos de inyección. Las normativas para el control de la inyección subterránea se encargan de supervisar la construcción, funcionamiento y cierre de estos pozos. Cada estado debe cumplir con estos requisitos para obtener el permiso de aplicación primaria para el programa UIC correspondiente en ese estado. En la figura 4 a se puede observar las especificaciones para los permisos y requerimientos para cumplir con el programa autorizado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA en sus siglas en inglés

**Figura 4**

*Estructura del programa de Control de Inyección Subterránea (UIC)*



*Nota* el esquema representa que requisitos, autorizaciones y permisos se deben obtener para realizar un proyecto CAC. Tomado de la (Agencia de protección ambiental EPA, 2023 )

El programa de inyección subterránea regula seis clases de pozos y los pozos clase VI son de mayor interés para el almacenamiento de carbono. La clasificación de pozos para inyección se

muestra en la figura 5. Para la transición de los pozos de clase II a clase VI, los dueños o encargados que inyecten dióxido de carbono con el objetivo principal de conservarlo a largo plazo en un depósito de petróleo y gas deben gestionar y obtener una autorización para almacenamiento geológico clase VI cuando hay un nivel de riesgo mayor para las fuentes subterráneas de agua potable en comparación con las operaciones clase II. Para evaluar si este mayor riesgo está presente para las fuentes subterráneas de agua potable, se requiere que el dueño u operador considere los siguientes factores: aumento de la presión del yacimiento dentro de las zonas de inyección; incremento tasas de inyección de dióxido de carbono; idoneidad del área de revisión de clase II, entre otros aspectos que se pueden observar en la normativa con más detalle. Dentro del programa de inyección subterránea se puede analizar otros aspectos. ( Código de Regulaciones Federales (CFR.), 2023)

### **Criterios y estándares aplicables a los pozos clase VI**

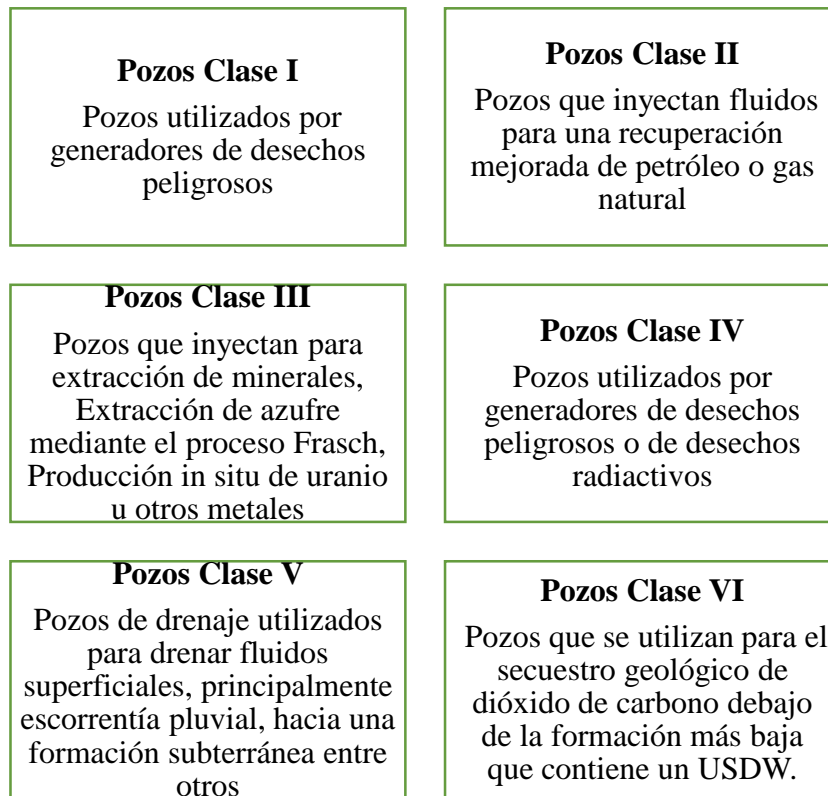
El objetivo de los criterios y las normas para los programas de control de inyección subterránea destinados a regular pozos específicos de secuestro geológico de dióxido de carbono clase VI, va dirigida a cualquier pozo que tenga como uso inyectar CO<sub>2</sub>, con el fin de almacenarse a largo plazo, para las propietarios o titulares que buscan transformar los pozos existentes de clase I, II y V, en pozos clase VI para secuestro geológico deberán evidenciar que cumplen con todos los requisitos y adecuaciones además garantizan la Protección de Fuentes Subterráneas de Agua Potable. Adicionalmente se deben gestionar los permisos para la clase VI para los pozos que ya no son de propósito experimental dado que un pozo que ha sido modificado aún debe cumplir con todos los demás requisitos estipulados en la sección 146. (Codigo Federal de regulaciones , 2023).

Dentro del desarrollo de este tipo de proyecto secuestro geológico de CO<sub>2</sub> se presentan una serie de requisitos emitidos por el código federal de regulaciones relacionados con pruebas y

monitoreo durante la duración del proyecto. Además, el propietario u operador de un pozo Clase VI está obligado a preparar, mantener y cumplir con un plan para el cuidado y cierre del sitio posterior a la inyección, el cual debe cumplir con los requisitos especificados. (Codigo Federal de regulaciones , 2023)

**Figura 5**

*Clasificación de los Pozos de Inyección*



*Nota* el grafico representa la diferenciación establecida en estados unidos, para los tipos de pozos y su utilización. Tomado de (Agencia de proteccion ambiental de estados unidos, 2023)

### **Requisitos de los pozos de clase VI**

Las condiciones de los pozos clase VI están modelados para proteger las fuentes subterráneas de agua potable, su objetivo es hacer cumplir con las cláusulas propuestas para un secuestro geológico seguro. Dentro de los requisitos esta la zona de revisión donde se tiene la inyección de CO<sub>2</sub> y el frente de presión asociado que no afecte los fluidos porosos, por otro lado,

se debe garantizar que el pozo clase VI construido debe evitar cualquier fuga fuera de la zona donde se inyectara, un plan de respuesta ante cualquier emergencia y reparación inmediata del almacenamiento es un requisito puntual para esta clase de pozos, por lo tanto, los dueños o responsables deben contar con los fondos financieros suficientes ante cualquier situación que se pueda presentar. (Agencia de protección ambiental de estados unidos, 2023).

### **Clase VI: Pozos utilizados para el secuestro geológico de dióxido de carbono**






Según la Agencia de Protección Ambiental (siglas en inglés EPA) indica que los pozos de clase VI se usan para inyectar CO<sub>2</sub> en formaciones subterráneas profundas. Este almacenamiento subterráneo a largo plazo se llama secuestro geológico (siglas en inglés GS). es una tecnología utilizada para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y mitigar GEI, siendo más amigables con el cambio climático, las fuentes productoras para la captura de CO<sub>2</sub>, se pueden desarrollar tanto en cementeras como industrias de acero o en producción de etanol, plantas de energía e hidrogeno, estas empresas o instalaciones llaman la atención por su alta producción de CO<sub>2</sub> en el medio ambiente, la captura directa en el aire es también una fuente atractiva para el desarrollo de estos proyectos. Como se puede observar en la figura 6 presenta las fases que se llevan a cabo para un proyecto de pozo clase VI. Y la figura 7 muestra el proceso que se realiza para su debido permiso. (United State Enviromental protection Agency, 2023).

### **Lista de verificación de la solicitud de permiso de pozos clase VI**

Las partes interesadas son libres de plantear preguntas y objeciones sobre el contenido de esta lista de verificación y la idoneidad de la aplicación de esta lista de verificación para una situación particular, teniendo en cuenta los elementos a verificar y que deben estar dentro del informe, en la figura 8 da a conocer el paso a paso dentro de la lista de verificación para obtener un permiso.

**Figura 6**

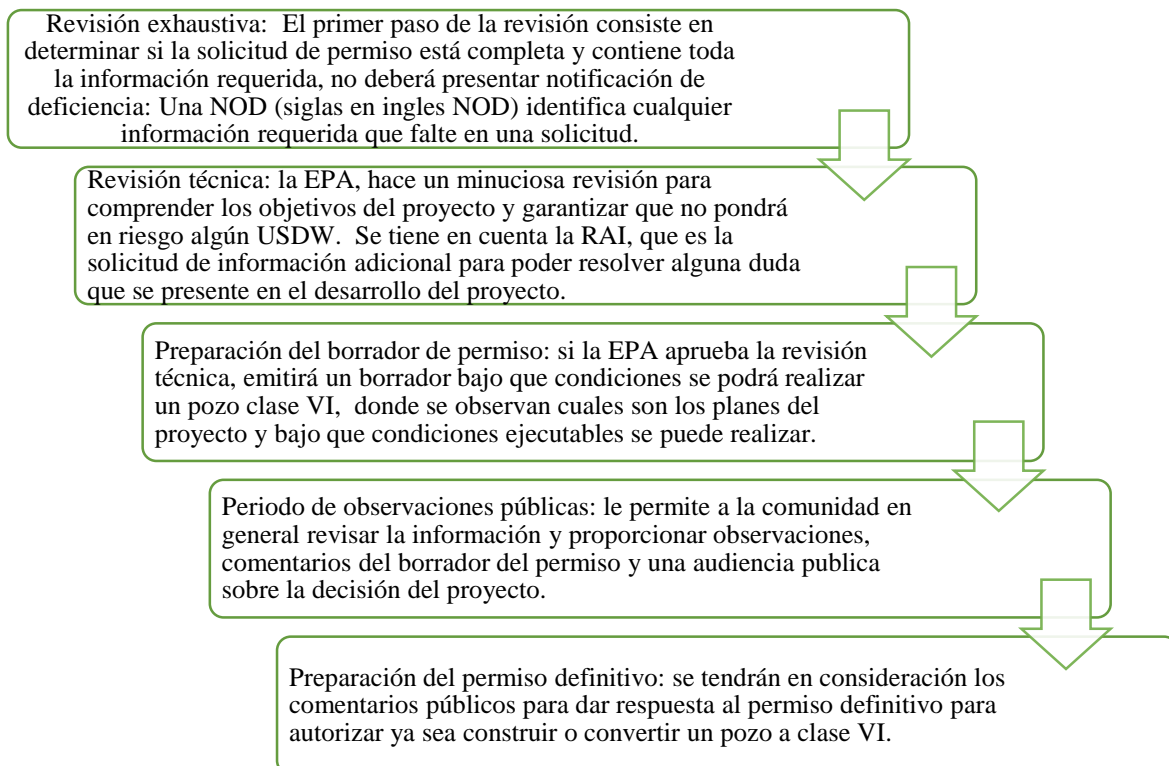
*Ciclo de vida de un proyecto pozo clase VI*

	Fase previa a la concesión de permisos : se notifica a la autoridad su intención para solicitar un permiso para un pozo clase VI
	Fase previa a la construcción: revisión de la solicitud para construir o adecuar un pozo para que sea clase VI
	Fase previa a la operación: obtención del permiso se procede a la construcción del pozo,
	Fase de inyección: inyección de fluido CO <sub>2</sub> , monitoreo y revisión del estado del fluido
	Fase posterior a la inyección: monitoreo periódico, para autorizar el cierre y que no presenta un peligro para la humedad.

*Nota* Pozos utilizados para el secuestro geológico de dióxido de carbono. Tomado de (United State Enviromental protection Agency, 2023).

**Figura 7**

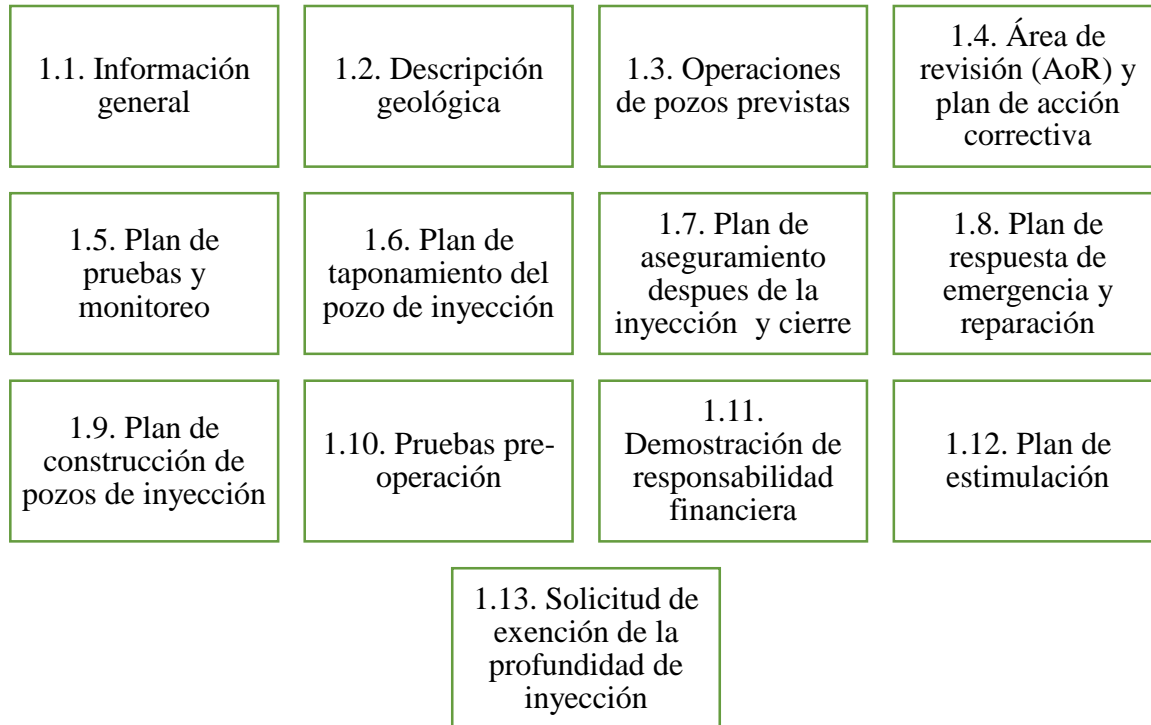
*Clase VI proceso de permisos*



Tomado de (United State Enviromental protection Agency, 2023).

**Figura 8**

*Lista de verificación de la solicitud de permiso de pozos Clase VI*



Tomado de (Agencia de proteccion ambiental EPA, 2023 ).

Entre los aspectos y asuntos contemplados en la normativa de Estados Unidos de Norteamérica relacionados con la tecnología de captura y almacenamiento de dióxido de carbono encontramos:

**1. Clasificación y pureza de CO<sub>2</sub> - Texas, Dakota del Norte y Montana.**

La clasificación del CO<sub>2</sub> es importante dentro los marcos normativos. Un buen planteamiento de normativa puede maximizarse y contribuir a una mejor viabilidad económica determinando sus propiedades dentro de los aspectos de transporte, captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> dando como resultado una normativa eficaz y eficiente ante un mercado a largo plazo, sostenible para CCUS. La presente normativa no considera al CO<sub>2</sub> como sustancia peligrosa,

contaminante o residuo; Texas determino que el CO<sub>2</sub> no es residuo peligroso dentro de sus definiciones. Dakota del Norte estableció que un almacenamiento ya sea a corto plazo o como almacenamiento definitivo sin fuga no se considera un contaminante o perturbación al ambiente, y finalmente. En Montana cuando se realiza inyección de CO<sub>2</sub> su almacenamiento no se considera un contaminante y en un depósito permanente de CO<sub>2</sub> no implica dentro de sus definiciones como un contaminante a las aguas subterráneas.

## **2. Propiedad y título del CO<sub>2</sub> -Ley de almacenamiento geológico de dióxido de carbono Nebraska:**

Con el fin de implementar nuevas estrategias para minimizar los GEI el estado creo un marco regulatorio para almacenar CO<sub>2</sub>, para este tipo de proyecto se adquieren una serie de permisos para la inyección del fluido, indica la calidad del espacio poroso y designa una autoridad única encargada de velar y supervisar que se cumplan tanto las adecuaciones como los procedimientos y permite así traspaso de propiedad y asignación de responsabilidad al gobierno siempre y cuando cumpla ciertas condiciones.

De la presente ley se resalta el artículo 19 indica que: en el momento de solicitar un certificado de la finalización del proyecto se debe evaluar que haya finalizado la inyección de CO<sub>2</sub> de forma total y entrará en análisis para emitir el certificado, pero para ello se debe hacer mediante una audiencia pública y estar de acuerdo con el departamento de medio ambiente y energía, la autoridad del programa de control de inyección subterránea, y solo podrá ser emitido si el operador encargado del almacenamiento muestra con evidencia que recibió autorización para el cierre y que todos los equipos e instalaciones utilizadas durante el periodo total están en optimo estado, su integridad mecánica es aceptable y aprovechable aun, como instancia final cuando se obtenga el certificado quedara como título del estado y abarcando todas las responsabilidades a cumplir y los

derechos e intereses en el CO<sub>2</sub> almacenado y finalmente libera a el operador de cualquier garantía financiera, ahora la responsabilidad de monitoreo control y verificación estará a cargo del estado de Nebraska.

### **3. Permisos y autorizaciones en los estados de Nuevo México, Texas y Estados unidos:**

Como en todo gran proyecto desarrollado de forma industrial o a campo abierto es importante la implementación de permisos y autorizaciones y para los proyectos de CCUS no es indiferente es una prioridad garantizar que se cumplirán todo tipo de solicitudes y trámites para que la autoridad encargada pueda evaluar y vigilar a las empresas que realizan esta actividad. Existen aspectos claves para tener en cuenta para el cumplimiento de la norma y estos aspectos son la seguridad y protección del medio ambiente y de la salud. Es importante resaltar dos fases dentro de las autorizaciones, primero el de una licencia de exploración y luego la solicitud del permiso para la inyección y almacenamiento. En tres estados de estados unidos podemos observar el proceso de licencia y autorización como primera instancia está el código de recursos naturales en Texas expresa que el operador en proyectos como gasoductos de CO<sub>2</sub> posee el dominio eminente para usar tierras para desarrollo de los gasoductos una vez obtiene la aceptación ante la comisión, esta persona o entidad estará encargada a una serie de deberes y obligaciones debidamente estipulados. En el Estatuto Revisado de Luisiana 30:1109 se autoriza que el operador de almacenamiento una vez obtiene los permisos podrá expropiar la propiedad necesaria para desarrollo de proyectos tanto en derechos superficiales y subterráneos para la construcción o modificación de una tubería, un almacenamiento y demás operaciones a desarrollar para el transporte de CO<sub>2</sub> a su instalación de disposición final, pero cabe resaltar que los encargos de estos proyectos deberán realizar concesiones con el lugar donde se pueda presentar algún daño causado en el desarrollo de las actividades, y el derecho al dominio no perjudicara a el derecho que los

propietarios poseen de las tierras y minerales que no fueron adquiridos y no sean de uso prioritario en el proyecto. El código 2012 Estatutos de Nuevo México (Capítulo 70: Petróleo y Gas. Artículo 3: Oleoductos) estipula que cualquier entidad que realice este tipo de proyectos ya sea empresa, asociación entre otros podrá ejercer el derecho al dominio eminente con el fin de adquirir el derecho necesario de paso para construir, realizar mantenimiento operar oleoductos y sus instalaciones para poder transportar CO<sub>2</sub> y otras sustancias y sus derivados, pero cualquier derecho de paso deberá en todos los casos estar ubicado de manera que cause el menor daño a la propiedad privada o pública consistente con el uso apropiado y la construcción económica asequible.

#### **4. Evaluación de recursos de almacenamiento**

Para determinar este tipo de recurso se debe identificar las características químicas, físicas y geológicas determinar la efectividad que posee para la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> y las consideraciones sociales y ambientales, los registros y evaluaciones a detalle y datos existentes de pozos de petróleo y gas son similares para cuando se realiza caracterización para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>, los aspectos para tener en cuenta en la evaluación de recursos para almacenamiento: son la selección del sitio, la evaluación tanto del sitio desde una perspectiva regional y caracterización inicial y detallada. La norma 146.85 tiene en cuenta que para los pozos clase VI, debe tener un fuerte poder financiero para el desarrollo de los proyectos dado que debe asegurarse que no se ponga en peligro las USDW así mismo, se presentan cinco garantías económicas que son: bonos de garantía, carta de crédito, seguro, fondo fiduciario, auto seguro, cuenta de depósito en garantía.

#### **5. Propiedad del espacio poroso:**

En varios estados de estados unidos se determina que donde se inyecta CO<sub>2</sub> suele tener propiedad el estado o la comunidad y en otros casos suele ser del propietario de la superficie. A

continuación, se podrá analizar que por los menos 4 estados tienen claridad sobre la propiedad del espacio poroso entre ellos están: A) Montana- SB 498 Ley de regulación del secuestro de carbono, el almacenamiento de CO<sub>2</sub> no se puede determinar a partir de una escritura o documento, en esta ley se determina que la propiedad del espacio poroso es del dueño de la superficie, y el estado tiene la autoridad y responsabilidad de velar por los almacenamientos geológicos de CO<sub>2</sub>; B) Wyoming- HB 57- este proyecto de ley establece una presunción de que el propietario de la superficie también es dueño del espacio poroso geológico subyacente, pero especifica que los derechos de minería y perforación tendrán prioridad sobre las actividades de almacenamiento geológico; C) Dakota del Norte-SB 2139-en este estado se define que es un espacio poroso como una cavidad o vacío, natural o creado artificialmente, en un estrato sedimentario subsuperficial. Determina que La propiedad del espacio poroso en todos los estratos subyacentes a la superficie de tierras y aguas corresponde al propietario de la finca superficial suprayacente; D) Nebraska-Ley de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> de Nebraska- el marco designa una autoridad competente para supervisar y regular las instalaciones que inyectan y almacenan CO<sub>2</sub>, armoniza los requisitos de autorización de pozos de inyección con la normativa estatal y federal, clarifica la propiedad del espacio poroso, establece un fondo de almacenamiento y transfiere la responsabilidad al gobierno si se cumplen determinadas condiciones, este estado indica que si no se separó previamente la propiedad del yacimiento se le confiere los derechos del espacio poroso al propietario de la superficie.

## **6. Planes de medición, seguimiento y verificación**

Subpartes RR - Secuestro geológico de CO<sub>2</sub> de estados unidos se determina un plan o proceso de medición, seguimiento y verificación (MMV) como componente fundamental para

asegurar la seguridad de las operaciones. El propósito de un plan de MMV es garantizar que se utilicen técnicas adecuadas para detectar y minimizar la migración o fuga de CO<sub>2</sub>. La supervisión es el factor principal dado a que debe utilizar técnicas para vigilar y observar el comportamiento y propiedades del CO<sub>2</sub>, la sobrecarga o cambios significativos que se puedan ver reflejados en fugas, este ítem de MMV es muy importante dado que da garantía a la normativa respecto a las técnicas de control y supervisión a medida que avanza el proyecto. Un plan de detalle debe abarcar aspectos de comparación de resultados de seguimiento, de comportamiento del CO<sub>2</sub> inyectado, evitar fugas, migraciones, detectar efectos adversos que perjudiquen al medio ambiente entre otros. Estados Unidos determina requisitos fundamentales en el desarrollo de planes de medición, seguimiento y verificación. Los requisitos de seguimiento e información, que se comunicarán anualmente a la autoridad competente son: la masa de CO<sub>2</sub> inyectada al subsuelo, la masa emitida por fugas de equipos y por venteo de fuentes de CO<sub>2</sub>, la masa de CO<sub>2</sub> a partir de la producción de los pozos de gas y petróleo y otros pozos de fluidos, la masa de CO<sub>2</sub> secuestrada en formaciones geológicas del subsuelo entre otros.

### **7. Responsabilidades operacionales y financieras:**

Las empresas y autoridades encargadas en los programas CCUS indican que es favorable que el operador encargado del almacenamiento de CO<sub>2</sub> también sea el encargado de asumir todas las responsabilidades que se puedan generar mediante el desarrollo del proyecto como daños durante el periodo de exploración, explotación y cierre. Lo más importante es que el operador pueda contar con una fuerte base financiera para cualquier imprevisto de alto impacto que se pueda presentar en esta sección de responsabilidad tanto Estados Unidos como Texas indican sus requisitos específicos entre ellos están: a) Estados Unidos: a los operadores encargados de los pozos clase VI para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>. le deben garantizar una fuerte fuente económica durante

la vida del proyecto para ello debe proporcionar líneas de crédito, seguros, fondos fiduciarios y demás una garantía sujeta a estrictas condiciones para su cumplimiento; b) Texas: indica que una vez estén las instalaciones para el almacenamiento de CO<sub>2</sub> el operador debe tener en su poder una fianza o carta de crédito antes de la inyección y los titulares deben presentar los permisos donde da veracidad a su responsabilidad financiera dentro de sus acciones que cubran las siguientes actividades; taponamiento de pozo de inyección, medidas correctoras, el cuidado de la instalación y el proceso de inyección y cierre del almacenamiento, respuesta ante emergencias y cuidados después de cada etapa del proyecto hasta el post- cierre.

#### **8. Proceso de cierre de sitio:**

El proceso de cierre de un sitio comienza cuando se detiene la inyección y generalmente incluye el desmantelamiento de la infraestructura, como los pozos excepto aquellos necesarios para la supervisión continua y la rehabilitación del terreno. Teniendo en cuenta la norma clase VI Pozos utilizados para el secuestro geológico de dióxido de carbono especifica las actividades obligatorias del taponamiento de un pozo de inyección es importante la integridad mecánica externa del pozo que sea veraz y certificada, la cementación del pozo que invalide el movimiento de fluidos a superficie y genere un riesgo y en especial al agua potable, el lavado de un pozo con un fluido amortiguador.

#### **9. Responsabilidad a largo plazo tras el cierre del sitio:**

Para el cumplimiento de las responsabilidades asignadas a largo plazo como primera instancia recae sobre el operador aspectos como: monitoreo, que el almacenamiento sea seguro es decir velar por la seguridad del sitio donde se emplea el proyecto, si al transcurrir del tiempo se debe realizar transferencia de responsabilidad el operador debe cumplir debidos requisitos para realizar este traspaso entre ellos dar garantía absoluta de que existen riesgos mínimos de posibles

fugas y como estancia final se pueden presentar escenarios en la transferencia de responsabilidad que el operador es el estado, en ese caso no habrá problema, A largo plazo, la autoridad competente podría asumir la responsabilidad, pero sin las condiciones y garantías requeridas por un proceso de transferencia explícito. Además, el almacenamiento de CO<sub>2</sub> podría ser visto como un servicio público, lo que podría justificar la transferencia de la responsabilidad a largo plazo del sitio a la autoridad competente. Antes de transferir la responsabilidad a largo plazo a la autoridad competente, el operador generalmente debe demostrar que no existen riesgos significativos de futuras fugas u otras irregularidades en el sitio de almacenamiento. Sin embargo, es improbable que esta transferencia exima al operador de cualquier responsabilidad.

En Estados Unidos, las responsabilidades varían según el marco normativo específico. Por ejemplo, bajo el programa UIC de la EPA, los operadores de pozos de clase VI deben monitorear el sitio de almacenamiento después de la inyección durante 50 años, o a discreción de la autoridad competente si el operador demuestra que los riesgos se reducirán. Pero ya estado profundiza en el proceso para su transferencia a largo plazo a el gobierno estatal dentro de ellos esta: a) Luisiana y Norte de Dakota; el estado asume la responsabilidad después de 10 años, y se requiere un certificado de cierre del pozo y de finalización del proyecto, así como pruebas de la integridad del pozo desde su cierre. La ley de Luisiana especifica que la transferencia de propiedad no implica la transferencia de responsabilidad. b) En Texas, la junta estatal de tierras asume la propiedad a largo plazo del almacenamiento de CO<sub>2</sub> en alta mar. Después de la verificación del almacenamiento permanente, la junta adquiere el título, los derechos e intereses en el CO<sub>2</sub> almacenado. c) En Indiana, la legislación permite que el operador de almacenamiento transfiera tanto la responsabilidad como la propiedad de la instalación de almacenamiento de CO<sub>2</sub> al gobierno estatal, una vez finalizado el proyecto y taponamiento del pozo. d) En Montana, el estado asume

la responsabilidad después de 30 años mediante un proceso de dos etapas. Primero se emite un certificado de finalización una vez que el operador ha demostrado que no ha habido desplazamiento o fuga de CO<sub>2</sub> durante un período de 15 años. Luego, tras un intervalo adicional de 15 años, la responsabilidad puede ser transferida al estado. e) En Nebraska, la propiedad y la responsabilidad a largo plazo del sitio de almacenamiento se transfieren al estado una vez que se emite un certificado de finalización del proyecto. Los detalles regulatorios sobre los requisitos necesarios para obtener el certificado y el tiempo requerido para la transferencia de la propiedad aún no han sido establecidos.

#### **10. Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo:**

La legislación reglamentaria de CCUS puede requerir dentro de sus estipulaciones que el operador encargado deberá contribuir a los costos implementados como garantía a largo plazo, sería un aporte a largo plazo si se llegara a presentar un evento de fuga, este aporte se implementaría al momento de gestionar la autorización para el cierre del sitio de almacenamiento, a continuación, se da a conocer sobre este tipo de garantía definido en algunos estados de Estados Unidos. a) en Wyoming se creó un fondo único que permite financiar las medidas de verificación y seguimiento en los almacenamientos de CO<sub>2</sub>, una vez expedido el certificado de cierre, el fondo se emplea mediante una tasa de cierre global por tonelada de CO<sub>2</sub> inyectado que aún no se determina; b) en Luisiana el operador encargado durante un periodo de tiempo de mínimo 10 años deberá pagar una tarifa a un fondo fiduciario de hasta cinco millones de dólares por cada operador. c) en Montana el operador tiene el poder de establecer un fondo de garantía a largo plazo del sitio, si el operador transfiere la responsabilidad al estado una vez hayan transcurrido 30 años del cierre, deberá contribuir a un al fondo durante el periodo de inyección, pero dado el caso el operador no decida transferir la responsabilidad será su responsabilidad el proyecto a término indefinido. d) en

Kansas: la autoridad encargada, realiza recaudos por diferentes factores, como por sanciones de liberación de CO<sub>2</sub> con un costo de hasta 10.000 dólares/día, o por infracciones, tasa de pozos que alimentan un solo fondo estatal, se realiza este tipo de recaudo con el fin que se pueda utilizar para gastos en autorizaciones, permisos, inspecciones, cierre de pozo, cierre de almacenamiento, supervisión a largo plazo entre otras actividades.

### **11. Acceso a infraestructuras de transporte compartidas:**

La Ley de arrendamiento de minerales (MLA) es una legislación federal de Estados Unidos que permite el arrendamiento de tierras públicas para la exploración y desarrollo de carbón, petróleo, gas natural y otros minerales. Esta ley, Promulgada en 1920, ha sido enmendada varias veces. La principal autoridad responsable de administrar la MLA es la oficina de administración de tierras, que forma parte del departamento del interior. Los derechos de vía serán regulados donde se evaluarán aspectos topográficos, de extensión, duración, mantenimiento, construcción entre otros se debe velar por la seguridad del medio ambiente por ende pueden ser permisos temporales que estén en constante supervisión y mantenimiento, las aprobaciones se generan mediante audiencias públicas el operador debe demostrar que presenta solvencia financiera ante cualquier situación.

El transporte de CO<sub>2</sub> entre distintos países o a través de sus fronteras está ganando relevancia a medida que los responsables políticos y reguladores intentan conectar diversas instalaciones de captura con recursos de almacenamiento de bajo costo por tal motivo esto puede dar lugar a determinados requisitos reglamentarios nacionales o internacionales a tener en cuenta como: a) acuerdos de tránsito donde el CO<sub>2</sub> atraviesa una tercera jurisdicción para llegar a su destino final de almacenamiento; b) migración involuntaria o fugas de CO<sub>2</sub> inyectado en el

subsuelo que cruzan fronteras jurisdiccionales; c) uso de complejos de almacenamiento que se extienden a través de fronteras jurisdiccionales, entre otros.

## **12. Interacción con otros recursos superficiales y subterráneos:**

Las relaciones con otros recursos pueden ser complementarias, especialmente en el contexto de reutilizar activos existentes de petróleo y gas para el CCUS. La infraestructura de petróleo y gas, como los oleoductos principales, las plataformas marítimas y las instalaciones en tierra, tienen similitudes con la infraestructura requerida para el transporte y almacenamiento de CO<sub>2</sub> y los aspectos que deben tenerse en cuenta para la relación de este tipo de interés son: La coexistencia de autorizaciones para el almacenamiento de CO<sub>2</sub> y las autorizaciones existentes para otros usos del subsuelo, como la producción de petróleo y gas o la generación de energía geotérmica, es un aspecto importante a considerar; La resolución de conflictos en caso de que surjan controversias al autorizar actividades en el subsuelo es fundamental para garantizar un proceso justo y equitativo; La posible competencia con los recursos del fondo marino. En estados Unidos:

a) El estado de Luisiana indica que a través de la ley otorga al departamento de recursos naturales la facultad de regular el transporte y almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Además, confiere al gobierno estatal el poder de dominio eminente para proyectos de almacenamiento de CO<sub>2</sub>, permite al estado asumir la responsabilidad del sitio de almacenamiento a largo plazo y establece un fondo de almacenamiento de CO<sub>2</sub> para cubrir los costos asociados a largo plazo del sitio.

b) En Luisiana, cualquier yacimiento que tenga la capacidad de producir petróleo, gas, condensado u otros minerales comerciales no puede ser utilizado para actividades de almacenamiento de CO<sub>2</sub> sin el consentimiento de todos los propietarios del yacimiento. Además, para que un yacimiento sea utilizado para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>, debe cumplir con una de las

siguientes condiciones: todos los recursos comercializables del yacimiento deben haber sido aprovechados de manera rentable, o el yacimiento debe tener un mayor valor o utilidad para el almacenamiento de CO<sub>2</sub> que para la producción de los recursos restantes, y al menos tres cuartas partes de los propietarios del yacimiento deben haber dado su consentimiento por escrito para tal uso.

c)Texas: la emisión de un permiso para una instalación de almacenamiento de CO<sub>2</sub> está condicionada a que el solicitante demuestre, entre otros aspectos, que la inyección y el almacenamiento de CO<sub>2</sub> no representarán riesgos ni causarán daños a ningún recurso de petróleo, gas, geotérmico u otros minerales, ya sean existentes o potenciales, ni generarán residuos. Además, se deben implementar medidas de seguridad adecuadas para garantizar la protección de las fuentes subterráneas de agua potable y de las aguas superficiales contra la migración de CO<sub>2</sub> o de fluidos de formación desplazados.

### **13. Transición de recobro mejorado CO<sub>2</sub> al almacenamiento exclusivo:**

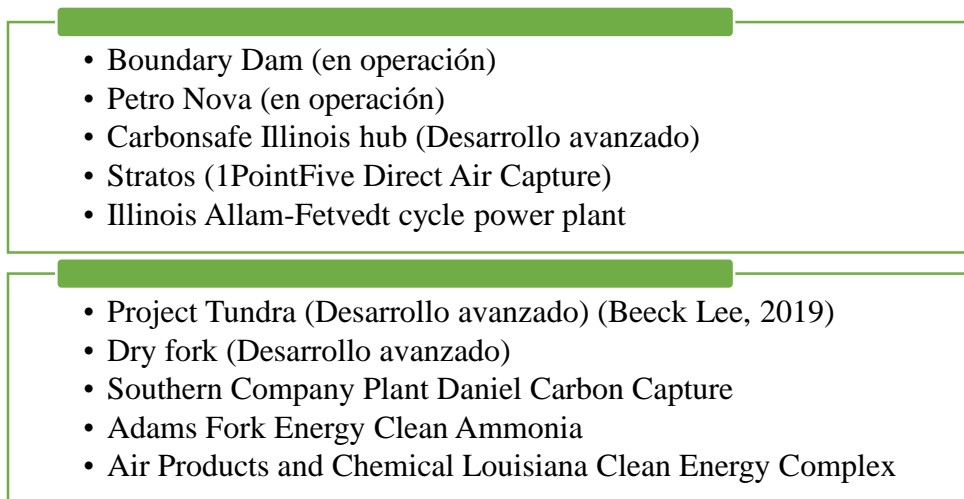
Inyectar CO<sub>2</sub> en yacimientos petrolíferos existentes es una técnica bien conocida denominada recuperación mejorada de petróleo (EOR, por sus siglas en inglés). Al introducir CO<sub>2</sub>, se aumenta la presión en el yacimiento, lo que impulsa el petróleo hacia los pozos de producción. Además, el CO<sub>2</sub> puede mezclarse con el petróleo, mejorando su capacidad para moverse y facilitando su extracción. Como resultado de este proceso, parte del CO<sub>2</sub> queda atrapado en el subsuelo, cabe resaltar que las operaciones de EOR en instalaciones destinadas al almacenamiento de CO<sub>2</sub> no presentan desafíos tecnológicos significativos en términos de almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, los marcos regulatorios deberían establecer requisitos adicionales y procedimientos de verificación específicos para el almacenamiento dedicado, que serían más exhaustivos que los requisitos aplicados a las operaciones de EOR con CO<sub>2</sub>.

En estados unidos esta normativa cumple con los estándares de UIC de Clase II, que no están adecuadamente adaptados para el almacenamiento continuo de CO<sub>2</sub>, a diferencia de los criterios específicos para el almacenamiento geológico de Clase VI. En la actualidad, la regulación no permite una transición fluida de un pozo clasificado como Clase II a uno designado como Clase VI, pero la EPA mediante un memorando da clarificación respecto a los pasos claves para la transición de II a VI. (International Energy Agency, 2022a) (Internacional Energy Agency , 2022b)

En la figura 9 se observan los proyectos que Estados Unidos han hecho hasta el momento

### Figura 9

*Proyectos a gran escala desarrollados en Estados Unidos*

- 
- Boundary Dam (en operación)
  - Petro Nova (en operación)
  - Carbonsafe Illinois hub (Desarrollo avanzado)
  - Stratos (1PointFive Direct Air Capture)
  - Illinois Allam-Fetvedt cycle power plant
- Project Tundra (Desarrollo avanzado) (Beeck Lee, 2019)
  - Dry fork (Desarrollo avanzado)
  - Southern Company Plant Daniel Carbon Capture
  - Adams Fork Energy Clean Ammonia
  - Air Products and Chemical Louisiana Clean Energy Complex

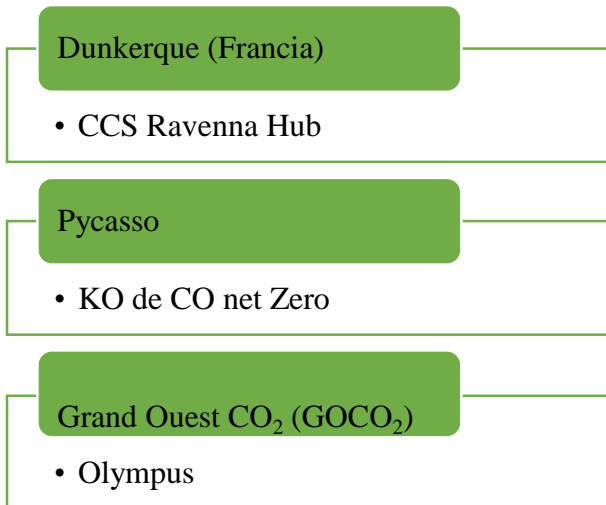
Tomado y adaptado de (Global CCS institute, 2019).

## 5.2 Normativa Internacional Unión Europea

La normativa internacional de la Unión Europea (UE) para los proyectos de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> es regida por la Directiva CCS. Esta directiva establece un marco legal y regulatorio para garantizar que el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> se realice de manera confiable y segura para el medio ambiente, contribuyendo así a la lucha contra el cambio climático. El

objetivo principal de esta normativa es abarcar todas las actividades relacionadas con el almacenamiento de CO<sub>2</sub> en formaciones geológicas en la UE a lo largo de todo el ciclo de vida de los sitios de almacenamiento, cubriendo los aspectos primordiales que se deben considerar en este tipo de proyectos. Como en cualquier gran proyecto industrial, es crucial que el proceso de obtención de permisos para los proyectos de CCUS sea eficiente y claro. Para que la autoridad competente pueda evaluar y procesar las solicitudes de permisos oportunamente, los gobiernos deben garantizar que la autoridad reguladora tenga los recursos y la capacidad adecuados. La normativa internacional de la Unión Europea incluye. La Figura 10 muestra seis proyectos destacados de la Unión Europea. (International Agency Energy; 2022a, 2022b)

- permisos y autorizaciones
- Evaluación recursos de almacenamiento
- Planes de medición, verificación y seguimiento
- Inspecciones del sitio de almacenamiento
- Responsabilidades operacionales y financieras
- Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo
- Regulación del transporte transfronterizo de CO<sub>2</sub>
- Acceso a infraestructuras de transporte compartidas
- Facilitación de la infraestructura de almacenamiento compartido:
- Interacciones con otros recursos de la superficie y del subsuelo
- Transición del recobro mejorado con CO<sub>2</sub> al almacenamiento exclusivo

**Figura 10***Proyectos destacados en la Unión europea*

Tomado y adaptado de Tomado de (Clean Air Task Force, 2023)

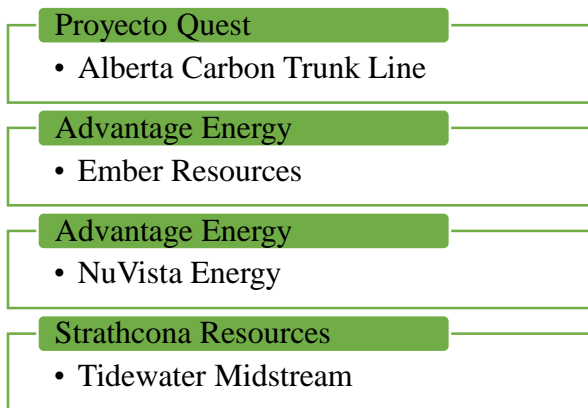
**5.3 Normativa Alberta Canadá**

La ley otorga al gobierno de Alberta la autoridad para administrar, asignar y celebrar acuerdos relacionados con los minerales. Esta ley se aplica a todas las minas, minerales y recursos naturales conexos que pertenecen a la corona, incluyendo pozos, minas, canteras y minerales permisos y autorizaciones. En la ley se modificó los estatutos para la captura y almacenamiento de carbono para incluir disposiciones como permitir al ministro acuerdos para el derecho de inyectar CO<sub>2</sub>, declarar el espacio poroso de Alberta como propiedad de la provincia, fondo de post cierre financiado por pago de arriendos y para destinarlo a cubrir costos y responsabilidades tras el cierre. En la figura 11 denota algunos de los proyectos desarrollados en Alberta Canadá (International Agency Energy; 2022a, 2022b) El marco normativo de Alberta, Canadá incluye:

- ✓ Permisos y autorizaciones
- Legislación extraordinaria y proyectos con enfoques específicos.
- Propiedad del espacio poroso
- Planes de medición, verificación y seguimiento
- Inspecciones del sitio de almacenamiento
- Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo
- Transición de recobro mejorado con CO<sub>2</sub> al almacenamiento exclusivo

**Figura 11**

*Proyectos de Alberta CCUS*



Tomado de (Alberta Energy Regulator, s.f.)

#### **5.4 Normativa Australiana**

La reglamentación que rige en Queensland, Victoria y el occidente de Australia para la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> comprende: (International Agency Energy; 2022a, 2022b) La Figura 12 muestra los proyectos más destacados en Australia.

- Evaluación impacto ambiental

- Permisos y autorizaciones:
- Participación y consulta pública:
- Inspecciones del sitio de almacenamiento
- Proceso de cierre del sitio,
- Legislación puntual o específica para proyectos
- Responsabilidad a largo plazo tras el cierre del sitio
- Evaluación recursos de almacenamiento
- Propiedad del espacio poroso
- Planes de medición, verificación y seguimiento
- Responsabilidades operacionales
- Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo
- Interacciones con otros recursos de la superficie y del subsuelo

**Figura 12**

*Proyectos de CAC en Australia*

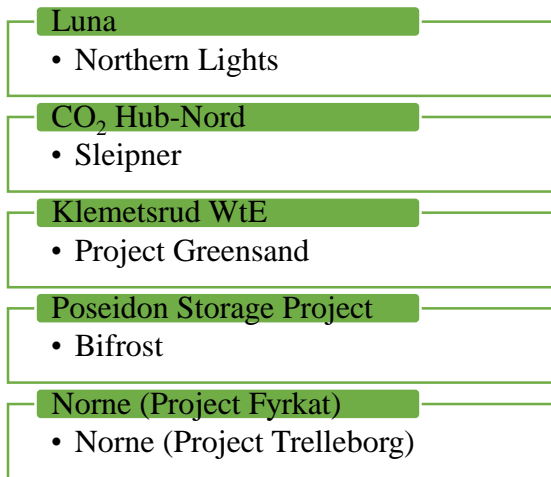


Tomado de (Australian Government Geoscience Australia, 2023)

### 5.5 Normativa Noruega

La normativa establece directrices para la prospección y exploración de reservorios submarinos para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>, así como para la explotación, transporte y almacenamiento de CO<sub>2</sub> en esos reservorios utilizando áreas bajo la jurisdicción de Noruega. Esta normativa se rige bajo: la normativa relativa a la explotación de yacimientos submarinos en la plataforma continental para el almacenamiento de CO<sub>2</sub> y relativa al transporte de CO<sub>2</sub> en la plataforma continental por medio de la cual se podrán reflejar los diversos aspectos que la hacen sobresalir en el manejo de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>. En la Figura 13 muestra los proyectos más destacados en Noruega. (International Agency Energy; 2022a, 2022b) La normativa de Noruega abarca aspectos como:

- Evaluación de impacto ambiental
- Permisos y autorizaciones
- Evaluación de recursos de almacenamiento
- Propiedad del espacio poroso
- Planes de medición, verificación y seguimiento
- Inspecciones del sitio de almacenamiento
- Responsabilidades operacionales y financieras
- Procesos de cierre del sitio
- Responsabilidad a largo plazo tras el cierre del sitio
- Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo
- Interacción de frentes de presión en las fronteras internacionales
- Facilitación de la infraestructura de almacenamiento compartido

**Figura 13***Proyectos de CAC en Noruega*

Tomado y adaptado de (Clean Air Task Force, 2023)

## 5.6 Normativa Reino Unido

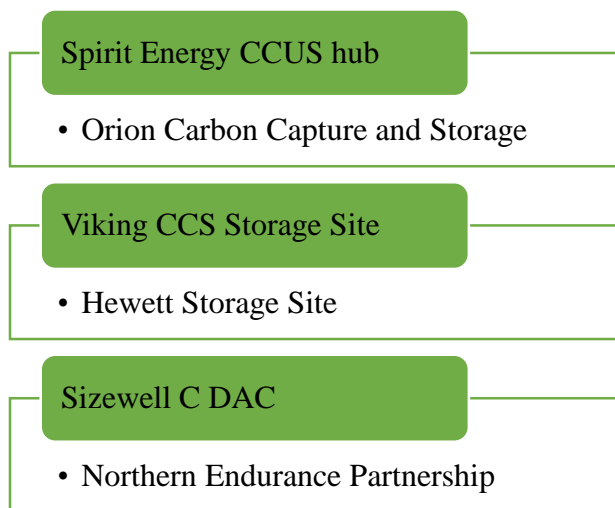
La ley de energía del Reino Unido proporciona un marco general para regular las actividades de secuestro de CO<sub>2</sub> en alta mar, que abarca el mar territorial del Reino Unido y otras aguas específicamente designadas. Dentro de este marco, la ley establece que muchos aspectos detallados se desarrollarán a través de reglamentos elaborados en virtud de esta misma ley, proporcionando directrices asociadas, especialmente en lo que respecta a la emisión de licencias, el funcionamiento y clausura de los sitios, la transferencia de responsabilidades y las contribuciones financieras para la gestión a largo plazo. La normativa del Reino Unido cubre los siguientes aspectos:

- Clasificación y pureza de CO<sub>2</sub>
- Evaluación impacto ambiental
- Permisos y autorizaciones

- Participación y consulta pública
- Inspecciones del sitio de almacenamiento
- Proceso de cierre del sitio
- Responsabilidad a largo plazo tras el cierre del sitio

### Figura 14

*Proyectos CAC en Reino Unido*



Tomado y adaptado de (Clean Air Task Force, 2023).

## 6 Evaluación de los principales aspectos geomecánicos para la inyección y almacenamiento de CO<sub>2</sub>

En consonancia con el acuerdo de París, 197 países han comprometido el desarrollo de tecnologías de bajas emisiones. Este acuerdo establece restricciones sobre las emisiones de GEI de los países comprometidos con el objetivo de minimizar el aumento de la temperatura global a 1,5°C por encima de los niveles preindustriales. Las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> se reducirán mediante el uso de tecnologías como la captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS). Este proceso implica la inyección y almacenamiento de CO<sub>2</sub> en estructuras geológicas específicas - depósitos de hidrocarburos agotados, acuíferos salinos y cavernas subterráneas. La Captura y

almacenamiento de carbono (CCS) se presenta como la opción más viable para eliminar y almacenar gran cantidad de CO<sub>2</sub> generada. (Youngsoo , y otros, 2022)

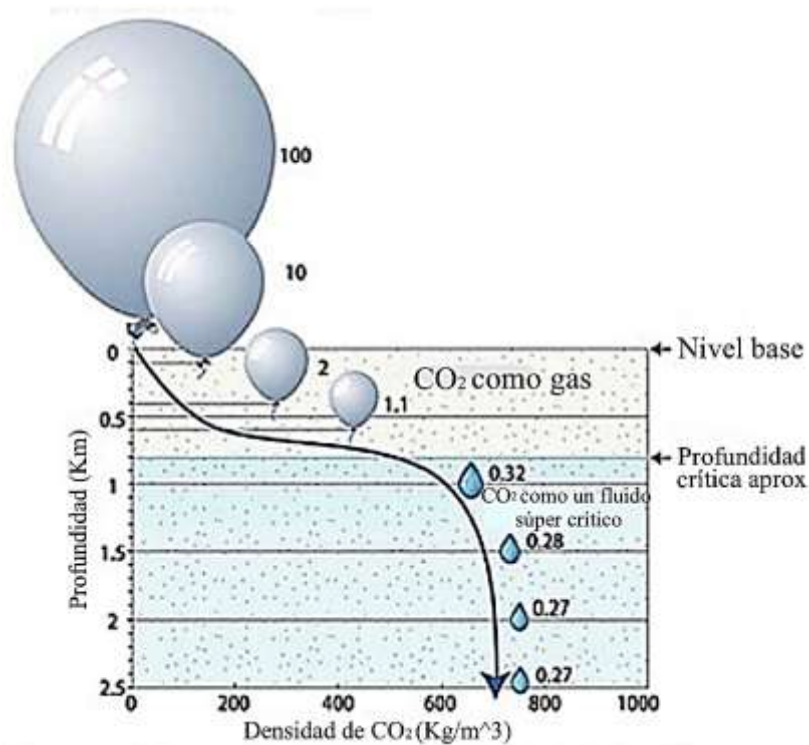
Las formaciones para proyectos GCS deben poseer las siguientes características fundamentales:

1). La zona de inyección debe estar a 850m o más para garantizar que el CO<sub>2</sub> se encuentra en estado supercrítico; 2). La zona de inyección debe caracterizarse por una alta porosidad y alta permeabilidad para garantizar la capacidad de almacenamiento para el CO<sub>2</sub>; 3). La zona de inyección deberá estar sellada por una o más formaciones impermeables para evitar fuga de CO<sub>2</sub>.asi mismo, estudios realizados indican que es viable inyectar CO<sub>2</sub> en condiciones supercríticas, logrando así un secuestro más efectivo, para que sea supercrítico debe tener condiciones de presión de 7,38 MPa y temperatura de 31.1°C y en cuestión de viscosidad tiene similitud al gas y en densidad a la de un líquido. Cuando el CO<sub>2</sub> está en grandes condiciones supercríticas permite mayor almacenamiento de CO<sub>2</sub> a gran escala y esto le permite extenderse de manera inmediata por la formación, disminuyendo la probabilidad de sobrepresión. En la Figura 15 se visualiza que la densidad aumenta rápidamente según la profundidad. (Yongcun , y otros, 2023)

Es crucial destacar que una inyección no controlada puede ocasionar problemas geomecánicos, relacionados con la falta de contención del CO<sub>2</sub> por fallas con la integridad de la roca sello, falta de la integridad del pozo, o por reactivación de fallas. La migración de CO<sub>2</sub> a la superficie pueden dar lugar a un rápido deterioro del entorno ecológico e incluso representar riesgos para la vida humana, por lo tanto, el almacenamiento geológico de carbono es una industria con muchos desafíos.

**Figura 15**

*Variación de la densidad de CO<sub>2</sub> respecto a la profundidad*



*Nota.* El gráfico representa como la densidad aumenta rápidamente según la profundidad. Tomado de (Yongcun , y otros, 2023, pág. 102)

### 6.1 Posibles riesgos geomecánicos durante el proyecto CCS.

El desarrollo de un proyecto CCS, se basa fundamentalmente en la inyección de CO<sub>2</sub> para almacenamiento y esta actividad genera acumulación de presión de poro, generando riesgos geomecánicos por la acumulación de presión de poro como se puede observar en la figura 16. La tasa de inyección es definida y depende de la inyektividad del yacimiento en el que se va a almacenar, si la tasa es demasiado alta, la presión en el fondo del pozo puede exceder la presión de fractura y puede inducir una fractura por tensión. Los métodos de estimulación de pozos, como la fracturación hidráulica y la acidificación, pueden ser una solución al mejorar la permeabilidad

de la región cercana al pozo, es importante tener en cuenta, si la acumulación de presión de poro es severa, la respuesta puede extenderse a la parte superior del yacimiento objetivo y posiblemente a la superficie o al fondo marino.

para el diseño óptimo del proyecto CCS se deberá tener en cuenta los riesgos geomecánicos tales como: fugas, sismicidad inducida, levantamiento de la superficie y contaminación de la formación portadora de agua potable, se puede dar por una inyección agresiva o no controlada de CO<sub>2</sub>. Asimismo, la integridad del pozo debe ser monitoreada durante todo el proceso CCS, debido a que la pérdida de integridad del pozo ocurre cuando el revestimiento o el cemento se dañan por la reacción del CO<sub>2</sub> inyectado. (Youngsoo , y otros, 2022, pág. 2)

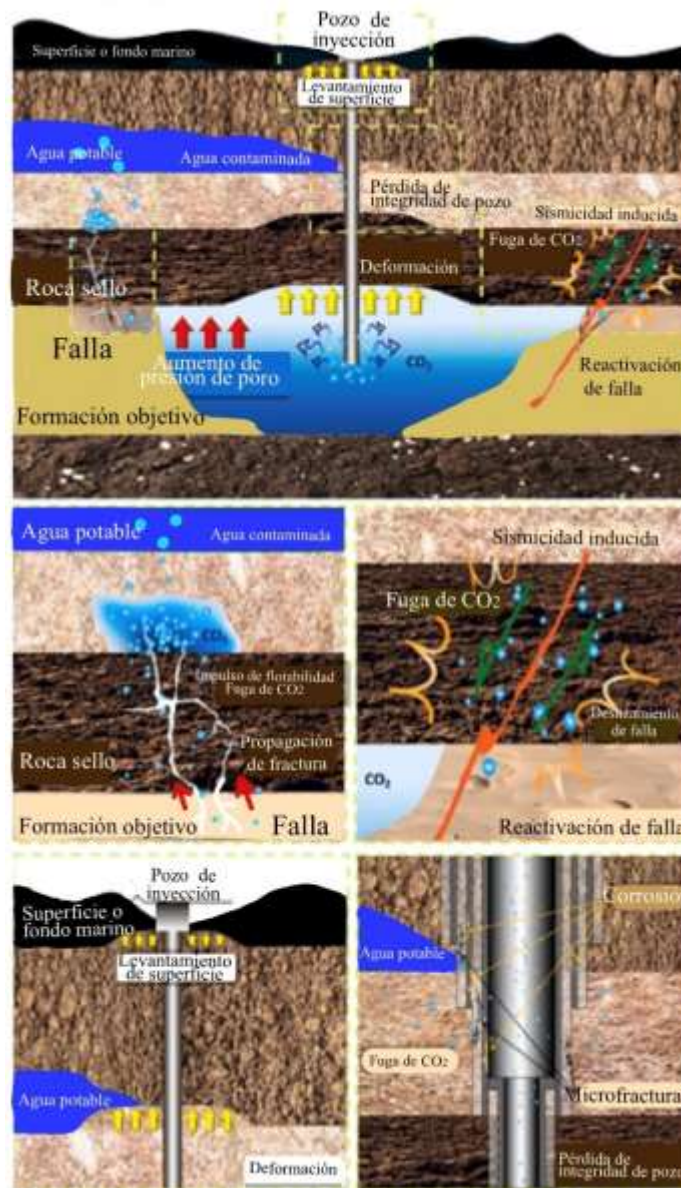
## **6.2 Falla de la roca sello:**

La roca sello es una formación impermeable que aísla la formación objetivo, su estabilidad desempeña un papel fundamental para asegurar la estructura geológica al impedir la fuga del CO<sub>2</sub> inyectado, cuando se presenta cambio de presión por el fluido de CO<sub>2</sub> inyectado no sólo redistribuye el estado de esfuerzos de tensión, sino que también deteriora la estabilidad de la roca, la parte más vulnerable a la falla por cizalla durante la inyección de CO<sub>2</sub> es la interfaz de la roca sello-yacimiento donde se espera la mayor presión de poro. Si existe una falla en el yacimiento objetivo, puede reactivarse una vez que la fricción en el plano de falla se reduce mediante el incremento de presión del poro. Cuando ocurre la falla, el plano de falla puede ser propagado a la capa de roca, lo que puede inducir la fuga de CO<sub>2</sub> para evitar resultados indeseables, es necesario realizar un análisis geomecánico adecuado para para identificar la inestabilidad potencial de la roca sello cuando se diseñe el proyecto CCS. El criterio de falla de Mohr-Coulomb puede ser utilizado para la evaluación de la integridad de la roca sello y el análisis de la reactivación de fallas.

(Youngsoo , y otros, 2022, pág. 5). En la Figura 11 17se muestran los mecanismos potenciales de riesgos geomecánicos durante el proceso de CCS.

**Figura 16**

*Riesgos geomecánicos potenciales causados por la acumulación de presión de poro*



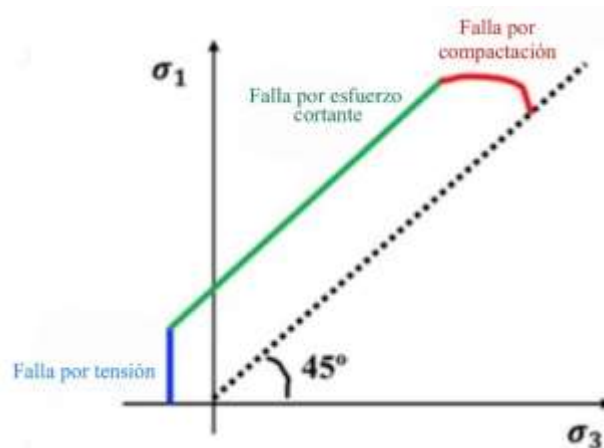
*Nota.* El grafico representa los mecanismos de los potenciales riesgos geomecánicos durante el proceso CCS. Tomado y adaptado de (Youngsoo , y otros, 2022, pág. 3)

### 6.3 Criterios de falla:

Existen tres tipos principales de falla de roca: falla por compactación, falla por tensión y falla por cizalla, como se muestra en la Figura 17. (Youngsoo , y otros, 2022, pág. 4). La falla de compactación ocurre por colapso de los poros y es menos común durante un proceso CCS, esta falla de compactación generalmente ocurre durante el agotamiento del yacimiento. La falla por tensión ocurre cuando el esfuerzo efectivo se reduce significativamente y está por debajo de la resistencia a la tensión de la roca. Finalmente, la falla por cizalla ocurre cuando el esfuerzo cortante que actúa sobre un plano de roca excede su resistencia a compresión en el plano de falla. El criterio de Mohr-Coulomb es el más utilizado para identificar la falla por cizalla de una roca, a pesar de ser muy conservativo, esto se debe a que considera únicamente los esfuerzos principales máximos y mínimas subestiman la resistencia de la roca y, por lo tanto, son apropiadas para los propósitos de diseño. (Youngsoo , y otros, 2022)

#### Figura 17

*Tipos de falla de la Roca*



*Nota.* En el grafico se puede observar varios tipos de fallas en el espacio de tensión principal.

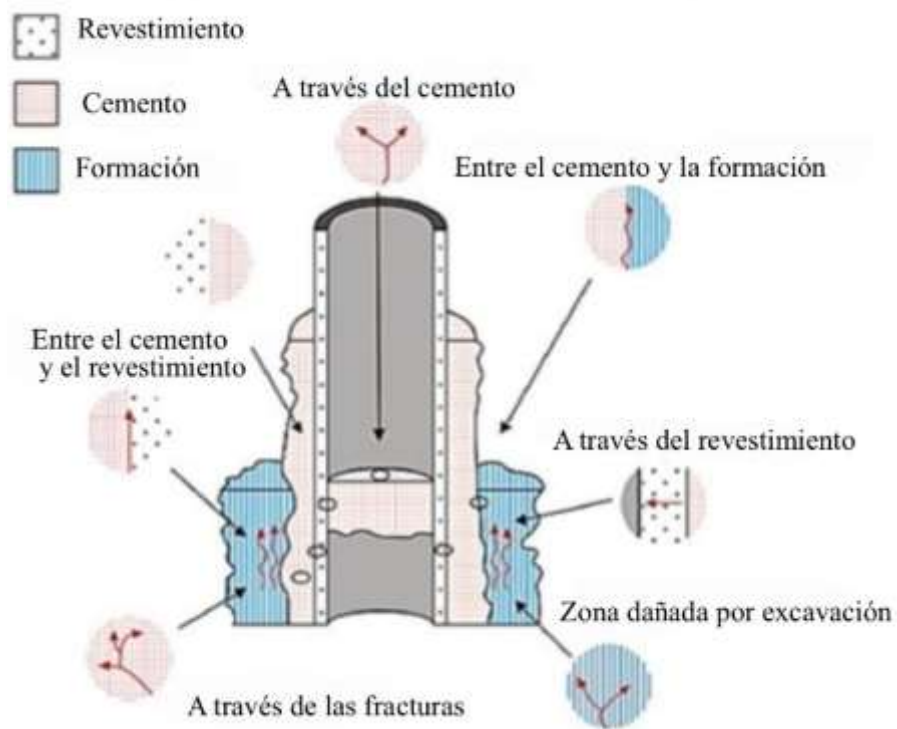
Tomado y adaptado de (Youngsoo , y otros, 2022, pág. 4)

### 6.4 Pérdida de integridad del pozo:

Garantizar la integridad del pozo es clave para un almacenamiento exitoso de CO<sub>2</sub> evitando posibles fugas a la superficie o una capa permeable adyacente. Cuando un pozo se reutiliza para pozo de inyección, se debe garantizar la integridad del pozo es un proceso importante durante el diseño del CCS, ya que mantendrá una presión más alta que el exterior del pozo. En la siguiente figura 18 se pueden observar las posibles vías de fuga, por tal motivo es importante asegurar la integridad del pozo durante el proceso de CAC, dado que un pozo con la tubería de revestimiento y el cemento dañados es una vía de alta conductividad para la posible fuga de CO<sub>2</sub>. (Youngsoo , y otros, 2022)

**Figura 18**

*Posibles vías de fuga el revestimiento y cementación*



*Nota.* El grafico representa las posibles vías de fuga alrededor del pozo. Tomado y adaptado de (Youngsoo , y otros, 2022, pág. 9)

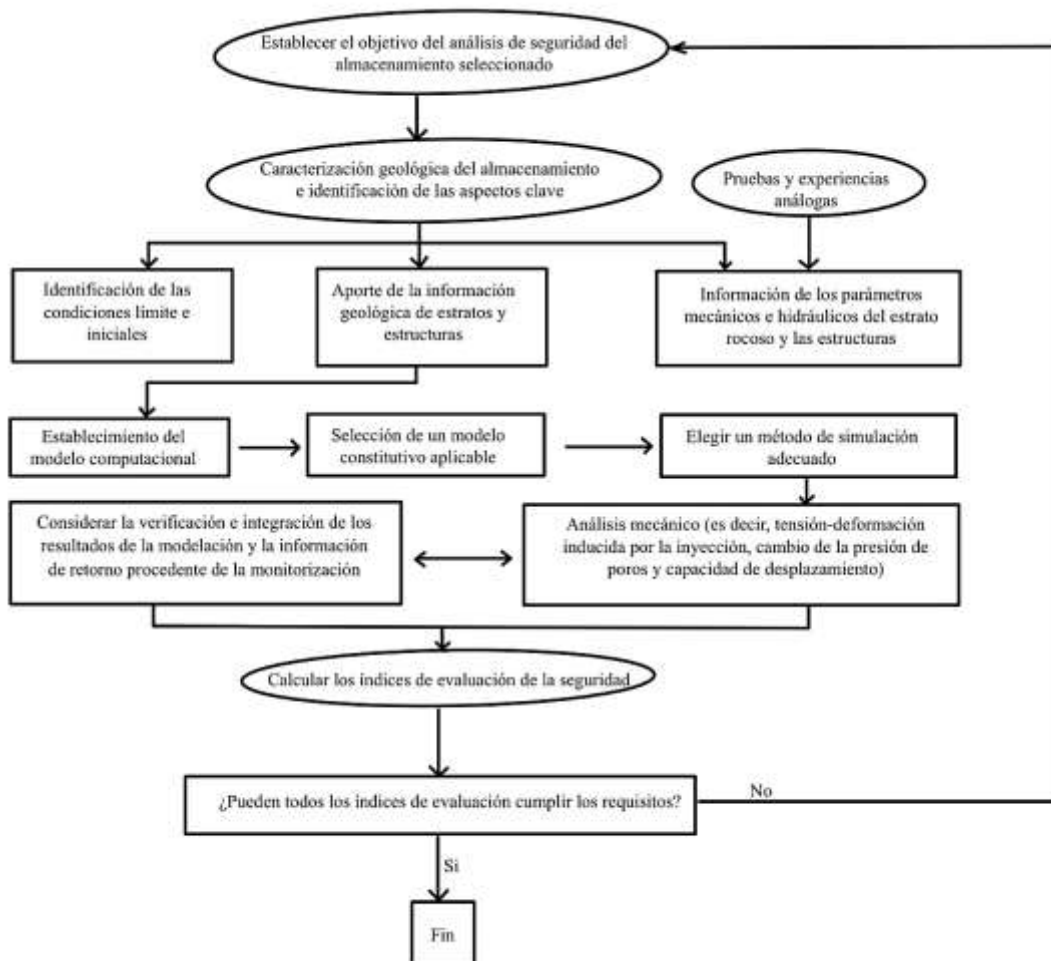
Existen tres tipos principales de daños a la integridad del pozo incluyen el agrietamiento en la interfaz de la roca y el cemento, fracturas en el cemento y el revestimiento del pozo. Las fracturas que aparecen en el cemento y el revestimiento del pozo, la falla o deformación de la roca en la zona de inyección puede ejercer una fuerza de extrusión en el pozo, provocando daños en el pozo. Adicionalmente, la diferencia de temperatura entre las paredes internas y externas del pozo genera una expansión térmica o contracción en el pozo, lo que contribuye a la formación de grietas en el pozo. En consecuencia, las reacciones químicas de CO<sub>2</sub>-agua-roca afectan a las propiedades de la roca y el cemento, modificando indirectamente el estado de tensión del pozo, se debe tener en cuenta que la falla siempre trae efectos negativos sobre el sistema de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>, uno de los cuales es la reactivación de fallas o eventos sísmicos notables. (Xiaochun Li , Qi Li , Bing Bai , & Ning Wei , 2016)

### **6.5 Diagrama de flujo para análisis geo mecánico de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>**

Esta sección se centrará en el diagrama de flujo para el análisis de aspectos geomecánicos en los sistemas de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> asociadas con el modelado geológico, la identificación de los parámetros mecánicos, el modelado numérico, la monitorización y la retroalimentación, etc. La Figura 19 muestra un diagrama de flujo recomendado para el proceso de análisis que incluye siete pasos (Xiaochun Li , Qi Li , Bing Bai , & Ning Wei , 2016)

**Figura 19**

*Diagrama de flujo para el análisis geomecánico.*



*Nota.* El grafico representa el diagrama de flujo para el análisis exhaustivo de las características geomecánicas de los sistemas de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>. Tomado y adaptado de (Xiaochun Li , Qi Li , Bing Bai , & Ning Wei , 2016, pág. 954)

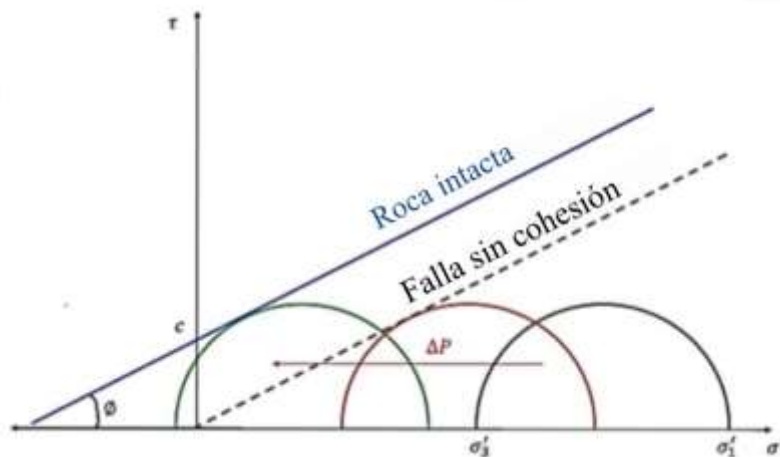
### 6.6 Operar por debajo del criterio de falla de Mohr-Coulomb

La mejor práctica geomecánica es operar por debajo del umbral de Mohr-Coulomb para evitar cualquier falla de las formaciones/rasgos geológicos. Esto debe aplicarse a todas las formaciones a las que la presión pueda migrar. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que este

requisito puede limitar el volumen total almacenado o la tasa de inyección no solo por pozo sino para todo el proyecto. En la Figura 20, el criterio de Coulomb muestra las envolventes de falla. La línea azul y la línea negra discontinua representan las envolventes de falla de la roca intacta y de la falla en una roca sin cohesión, respectivamente. Se muestran tres estados de esfuerzos, que representan el estado estable (círculo negro), la falla por cizalla en una roca sin cohesión (círculo rojo), y la falla por cizalla en una roca intacta (círculo verde). Si la presión de poro  $P$  aumenta debido a la inyección de  $\text{CO}_2$ , el círculo se desplaza hacia la izquierda y alcanza la envolvente de falla. (Youngsoo , y otros, 2022, pág. 5)

### Figura 20

*Círculos de Mohr con los criterios de Coulomb que muestran envolventes de falla.*



*Nota.* El grafico muestran tres estados de tensión y su estado según la falla. Tomado y adaptado de (Youngsoo , y otros, 2022, pág. 5)

### **6.7 Principios para las mejores prácticas geomecánicas:**

1- Disponibilidad de datos: Operar en una cuenca bien caracterizada con datos disponibles abiertamente

2- Caracterización del almacenamiento

- Desarrollar una buena caracterización local que incluya tipos de datos adicionales.
- Elija la zona de inyección en función del contexto local
- Garantizar la disponibilidad de un modelo geomecánicos sólido y verificado.

3- Práctica operativa

- Operar por debajo del criterio de falla de Mohr-Coulomb.
- Disponer de un plan operativo y un sistema de supervisión claro
- Considere otros mecanismos/defectos de fractura
- Gestionar la presión de forma eficaz y continua.
- Monitorear la posible micro sismicidad y responder de forma proactiva. (Global CCS Institute, 2017)

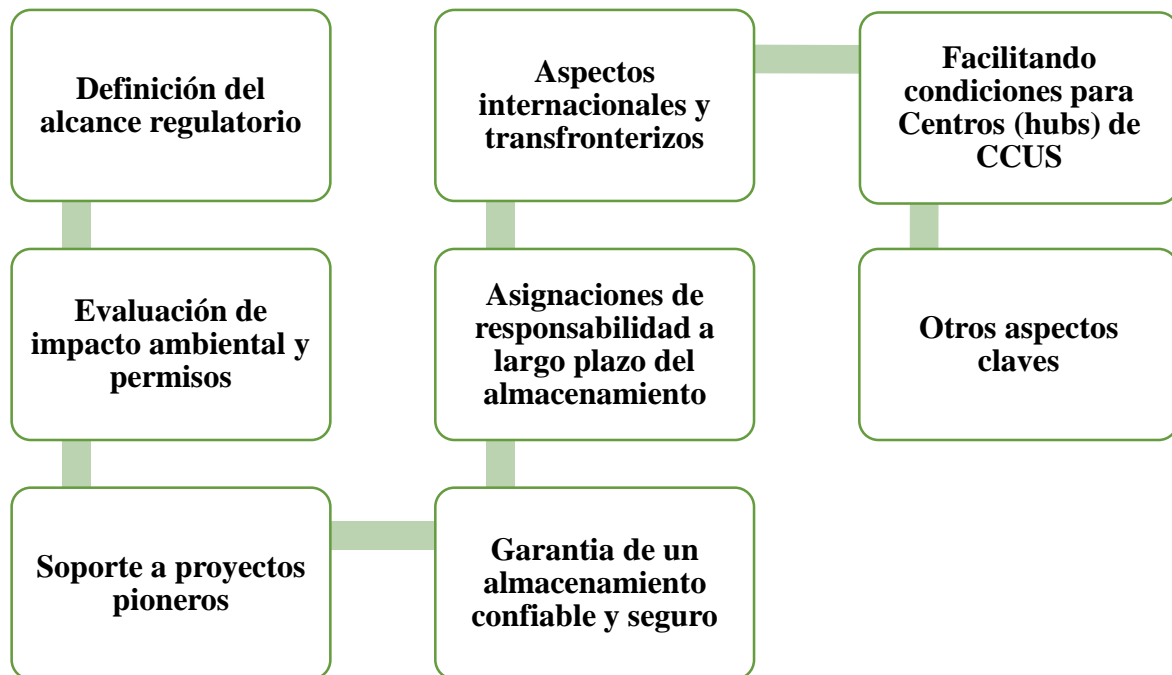
## **7 Análisis comparativo de los marcos legales y normativos internacionales para evaluación del subsuelo en los proyectos de CCUS**

La ampliación de las tecnologías de Captura, Utilización y Almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CCUS en sus siglas en inglés) requiere marcos jurídicos y normativos que garanticen la supervisión eficaz de los sitios de almacenamiento de CO<sub>2</sub>, el cuidado de la salud pública y el medio ambiente, y la seguridad de las actividades de los proyectos de CCUS. La Agencia Internacional de la Energía (AIE) ha identificado veinticinco aspectos legales y reglamentarios prioritarios para el desarrollo efectivo de los proyectos de CCUS. Estos asuntos se agrupan, de

forma general, en ocho categorías. Estos temas abordan todos los aspectos de la cadena de valor de los proyectos de CCUS, con un fuerte enfoque en cómo funcionan los marcos jurídicos y normativos para garantizar el almacenamiento seguro de CO<sub>2</sub>.

**Figura 21**

*Aspectos claves en los marcos regulatorios CCUS*



*Nota* Adaptado de marcos regulatorios y legales para CCUS (International Energy Agency (IEA), 2022)

**Figura 22**

*Aspectos importantes para tener en cuenta en un proyecto de captura almacenamiento y usos de CO<sub>2</sub>*

<p><b>Definición del alcance regulatorio</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⑩ Clasificación y pureza del CO<sub>2</sub></li> <li>⑩ Propiedad y título del CO<sub>2</sub></li> </ul>	<p><b>Evaluación de impacto ambiental y permisos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⑩ Evaluación de impacto ambiental (EIA)</li> <li>⑩ Permisos y autorizaciones</li> <li>⑩ Participación y consulta pública</li> </ul>	<p><b>Soporte a proyectos pioneros</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⑩ Legislación extraordinaria</li> <li>⑩ Proyectos con enfoques específicos</li> </ul>	<p><b>Garantía de un almacenamiento confiable y seguro</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⑩ Evaluación de recursos de almacenamiento</li> <li>⑩ Propiedad del espacio poroso</li> <li>⑩ plan MVM</li> <li>⑩ Inspecciones del sitio de almacenamiento</li> <li>⑩ Definición de responsabilidades operacionales y financieras</li> <li>• Proceso de cierre del sitio</li> </ul>
<p><b>Asignaciones de responsabilidad a largo plazo del almacenamiento</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⑩ Responsabilidad a largo plazo tras el cierre del sitio</li> <li>⑩ Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo</li> </ul>	<p><b>Aspectos internacionales y transfronterizos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⑩ Regular el transporte transfronterizo de CO<sub>2</sub></li> <li>⑩ Cumplimiento del protocolo de Londres</li> <li>⑩ Interacción de frentes de presión en las fronteras internacionales</li> <li>⑩ Superposición entre múltiples marcos</li> </ul>	<p><b>Facilitando condiciones para centros (hubs) CCUS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⑩ Acceso a infraestructuras de transporte compartidas</li> <li>⑩ Facilitación de la infraestructura de almacenamiento compartido</li> </ul>	<p><b>Otros aspectos claves</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⑩ Tratamiento de tecnologías de eliminación de CO<sub>2</sub>.</li> <li>⑩ Interacción con otros recursos superficiales y subterráneos.</li> <li>⑩ Transición de recobro mejorado con CO<sub>2</sub> al almacenamiento exclusivo</li> <li>⑩ Otros requerimientos para la tecnología de CCUS</li> </ul>

La Tabla 2 muestra un comparativo de las categorías del marco regulatorio y legal desarrollado e implementado en cada región/país:

**Tabla 2**

*Análisis comparativo de las categorías de los marcos regulatorios internacionales*

Region/País	Categorías del Marco Regulatorio y Legal: Proyectos CCUS
Estados Unidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Clasificación y pureza de CO<sub>2</sub> - Texas, Dakota del Norte y Montana.</li> <li>✓ Propiedad y título del CO<sub>2</sub> - Ley de almacenamiento geológico de dióxido de carbono Nebraska</li> <li>✓ Permisos y autorizaciones en los estados de Nuevo México, Texas y Estados Unidos:</li> <li>✓ Evaluación de recursos de almacenamiento</li> <li>✓ Propiedad del espacio poroso</li> <li>✓ Planes de medición, seguimiento y verificación</li> <li>✓ Responsabilidades operacionales y financieras</li> <li>✓ Proceso de cierre de sitio</li> <li>✓ Responsabilidad a largo plazo tras el cierre del sitio</li> <li>✓ Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo</li> <li>✓ Acceso a infraestructuras de transporte compartidas</li> <li>✓ Interacción con otros recursos superficiales y subterráneos</li> <li>✓ Transición de recobro mejorado CO<sub>2</sub> al almacenamiento exclusivo</li> </ul>
Alberta Canadá	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Permisos y autorizaciones</li> <li>✓ Legislación extraordinaria y proyectos con enfoques específicos</li> <li>✓ Propiedad del espacio poroso</li> <li>✓ Planes de medición, verificación y seguimiento</li> <li>✓ Inspecciones del sitio de almacenamiento</li> <li>✓ Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo</li> <li>✓ Transición de recobro mejorado con CO<sub>2</sub> al almacenamiento exclusivo</li> </ul>
Australia	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Evaluación impacto ambiental</li> <li>✓ Permisos y autorizaciones</li> <li>✓ Participación y consulta pública</li> <li>✓ Inspecciones del sitio de almacenamiento</li> <li>✓ Proceso de cierre del sitio.</li> <li>✓ Legislación puntual o específica para proyectos</li> <li>✓ Responsabilidad a largo plazo tras el cierre del sitio</li> <li>✓ Evaluación recursos de almacenamiento</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Propiedad del espacio poroso</li> <li>✓ Planes de medición, verificación y seguimiento</li> <li>✓ Responsabilidades operacionales y seguridad financiera</li> <li>✓ Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo</li> <li>✓ Interacciones con otros recursos de la superficie y del subsuelo</li> </ul>
Noruega	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Evaluación de impacto ambiental</li> <li>✓ Permisos y autorizaciones</li> <li>✓ Evaluación de recursos de almacenamiento</li> <li>✓ Propiedad del espacio poroso</li> <li>✓ Planes de medición, verificación y seguimiento</li> <li>✓ Inspecciones del sitio de almacenamiento</li> <li>✓ Responsabilidades operacionales y financieras</li> <li>✓ Procesos de cierre del sitio</li> <li>✓ Responsabilidad a largo plazo tras el cierre del sitio</li> <li>✓ Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo</li> <li>✓ Interacción de frentes de presión en las fronteras internacionales</li> <li>✓ Facilitación de la infraestructura de almacenamiento compartido</li> </ul>
Reino Unido	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Clasificación y pureza de CO<sub>2</sub></li> <li>✓ Evaluación impacto ambiental</li> <li>✓ Permisos y autorizaciones</li> <li>✓ Participación y consulta pública</li> <li>✓ Inspecciones del sitio de almacenamiento</li> <li>✓ Proceso de cierre del sitio</li> <li>✓ Responsabilidad a largo plazo tras el cierre del sitio</li> </ul>
Unión Europea	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Permisos y autorizaciones</li> <li>✓ Evaluación recursos de almacenamiento</li> <li>✓ Planes de medición, verificación y seguimiento</li> <li>✓ Inspecciones del sitio de almacenamiento</li> <li>✓ Responsabilidades operacionales y financieras</li> <li>✓ Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo</li> <li>✓ Regulación del transporte transfronterizo de CO<sub>2</sub></li> <li>✓ Acceso a infraestructuras de transporte compartidas</li> <li>✓ Facilitación de la infraestructura de almacenamiento compartido:</li> <li>✓ Interacciones con otros recursos de la superficie y del subsuelo</li> <li>✓ Transición del recobro mejorado con CO<sub>2</sub> al almacenamiento exclusivo</li> </ul>

*Nota* Adaptado de marcos regulatorios y legales para CCUS (International Energy Agency, s.f.)

En las tablas 3 a 8 se realiza una consolidación de las categorías del marco normativo de cada región/país detallando usos y la regulación correspondiente.

**Tabla 3**

*Aspectos de la Regulación de CCUS Estados Unidos*

<b>Categoría</b>	<b>Usos</b>	<b>Región</b>	<b>Regulación</b>
<b>Definición del alcance regulatorio</b>	Clasificación y pureza de CO2	Montana (Estados Unidos)	Estatuto de gas y aceite de Montana
		Norte de Dakota (Estados Unidos)	Estatuto de almacenamiento de CO2 Norte de Dakota
		Texas (Estados Unidos)	Código administrativo de Texas, Título 16: Economía Regulación, Parte 1 Comisión de Ferrocarriles de Texas, Capítulo 5: Dióxido de carbono
	Propiedad y título del CO2	Nebraska (Estados Unidos)	Ley de almacenamiento geológico de dióxido de carbono Nebraska
<b>Evaluación de impacto ambiental y permisos</b>	Permisos y autorizaciones	Texas (Estados Unidos)	Código de Recursos Naturales de Texas
		Nuevo México (Estados Unidos)	Código 2012 Estatutos de Nuevo México
		Luisiana (Estados Unidos)	Estatuto Revisado de Luisiana 30:1109
	Evaluación de recursos de almacenamiento	Estados Unidos	Clase VI: Pozos utilizados para el secuestro geológico de dióxido de carbono.
<b>Garantía de un almacenamiento confiable y seguro</b>	Propiedad del espacio poroso	Montana (Estados Unidos)	SB 498
		Norte de Dakota (Estados Unidos)	SB 2139
		Wyoming (Estados Unidos)	HB 57
		Nebraska (Estados Unidos)	Ley de Almacenamiento Geológico de Dióxido de Carbono de Nebraska
	Planes de medición, seguimiento y verificación	Estados Unidos	Subparte RR - Secuestro geológico de dióxido de carbono

	Responsabilidades operacionales y financieras	Estados Unidos	Clase VI: Pozos utilizados para el secuestro geológico de dióxido de carbono.
		Texas (Estados Unidos)	Código Administrativo de Texas, Título 16: Regulación Económica, Parte 1: Comisión de Ferrocarriles de Texas, Capítulo 5: Dióxido de carbono
	Proceso de cierre de sitio	Estados Unidos	Clase VI: Pozos utilizados para el secuestro geológico de dióxido de carbono.
<b>Asignación de responsabilidad a largo plazo del almacenamiento</b>	Responsabilidad a largo plazo tras el cierre del sitio	Indiana (Estados Unidos)	SB 442
		Texas (Estados Unidos)	HB 1796
		Luisiana (Estados Unidos)	Ley de secuestro geológico de dióxido de carbono de Luisiana
		Norte de Dakota (Estados Unidos)	SB 2095
		Montana (Estados Unidos)	SB 498
	Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo	Nebraska (Estados Unidos)	Ley de Almacenamiento Geológico de Dióxido de Carbono de Nebraska
		Luisiana (Estados Unidos)	Ley de secuestro geológico de dióxido de carbono de Luisiana
		Kansas (Estados Unidos)	HB 2419
		Wyoming (Estados Unidos)	HB 17
		Montana (Estados Unidos)	SB 498
<b>Facilitación condiciones para centros (hubs) CCUS</b>	Acceso a infraestructuras de transporte compartidas	(Estados Unidos)	Ley de arrendamiento de Minerales
		Texas (Estados Unidos)	Código de Recursos Naturales de Texas
<b>Otros aspectos claves</b>	Interacción con otros recursos superficiales y subterráneos.	Luisiana (Estados Unidos)	Ley de secuestro geológico de dióxido de carbono de Luisiana
		Texas (Estados Unidos)	Código Administrativo de Texas, Título 16: Regulación Económica, Parte 1: Comisión de Ferrocarriles de Texas, Capítulo 5: Dióxido de carbono
	Transición de recobro mejorado CO <sub>2</sub> al	Estados Unidos	Clase II - Pozos de inyección relacionados con petróleo y gas

almacenamiento  
exclusivo

*Nota* Adaptado de marcos regulatorios y legales para CCUS (International Energy Agency, s.f.)

**Tabla 4**

*Aspectos de la Regulación de CCUS Noruega*

<b>Categoría</b>	<b>Usos</b>	<b>Región</b>	<b>Regulación</b>
<b>Evaluación de impacto ambiental y permisos</b>	Evaluación de impacto ambiental	Noruega	Normativa relativa a la explotación de yacimientos submarinos en la plataforma continental para el almacenamiento de CO2 y relativa al transporte de CO2 en la plataforma continental
	Permisos y autorizaciones	Noruega	Normativa relativa a la explotación de yacimientos submarinos en la plataforma continental para el almacenamiento de CO2 y relativa al transporte de CO2 en la plataforma continental
<b>Garantía de un almacenamiento confiable y seguro</b>	Evaluación de recursos de almacenamiento	Noruega	Normativa relativa a la explotación de yacimientos submarinos en la plataforma continental para el almacenamiento de CO2 y relativa al transporte de CO2 en la plataforma continental
	Propiedad del espacio poroso	Noruega	Normativa relativa a la explotación de yacimientos submarinos en la plataforma continental para el almacenamiento de CO2 y relativa al transporte de CO2 en la plataforma continental
	Planes de medición, verificación y seguimiento	Noruega	Normativa relativa a la explotación de yacimientos submarinos en la plataforma continental para el almacenamiento de CO2 y relativa al transporte de CO2 en la plataforma continental
	Inspecciones del sitio de almacenamiento	Noruega	Reglamento sobre la Ley relativa a las actividades petrolíferas

	Responsabilidad es operacionales y financieras	Noruega	Normativa relativa a la explotación de yacimientos submarinos en la plataforma continental para el almacenamiento de CO2 y relativa al transporte de CO2 en la plataforma continental
	Procesos de cierre del sitio	Noruega	Normativa relativa a la explotación de yacimientos submarinos en la plataforma continental para el almacenamiento de CO2 y relativa al transporte de CO2 en la plataforma continental
<b>Asignaciones de responsabilidad a largo plazo del almacenamiento</b>	Responsabilidad a largo plazo tras el cierre del sitio	Noruega	Reglamento sobre la Ley relativa a las actividades petrolíferas
	Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo	Noruega	Normativa relativa a la explotación de yacimientos submarinos en la plataforma continental para el almacenamiento de CO2 y relativa al transporte de CO2 en la plataforma continental
<b>Aspectos internacionales y transfronterizos</b>	Interacción de frentes de presión en las fronteras internacionales	Noruega	Normativa relativa a la explotación de yacimientos submarinos en la plataforma continental para el almacenamiento de CO2 y relativa al transporte de CO2 en la plataforma continental
<b>Facilitando condiciones para centros (hubs) CCUS</b>	Facilitación de la infraestructura de almacenamiento compartido	Noruega	Normativa relativa a la explotación de yacimientos submarinos en la plataforma continental para el almacenamiento de CO2 y relativa al transporte de CO2 en la plataforma continental

*Nota* Adaptado de marcos regulatorios y legales para CCUS (International Energy Agency, s.f.)

**Tabla 5**

*Aspectos de la Regulación de CCUS Unión Europea*

<b>Categoría</b>	<b>Usos</b>	<b>Región</b>	<b>Regulación</b>
<b>Evaluación de impacto ambiental y permisos</b>	permisos y autorizaciones	Unión Europea	Directiva CCS (Artículo 7)
		Unión Europea	Directiva CCS
<b>Garantía de un almacenamiento confiable y seguro</b>	Evaluación recursos de almacenamiento	Unión Europea	Directiva CCS
	Planes de medición, verificación y seguimiento	Unión Europea	Directiva CCS
	Inspecciones del sitio de almacenamiento	Unión Europea	Directiva CCS
		Unión Europea	Directiva CCS (Artículo 28)
	Responsabilidades operacionales y financieras	Unión Europea	Directiva CCS
<b>Asignaciones de responsabilidad a largo plazo del almacenamiento</b>	Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo	Unión Europea	Directiva CCS
<b>Asuntos internacionales y transfronterizos</b>	Regulación del transporte transfronterizo de CO <sub>2</sub>	Unión Europea	Directiva CCS
<b>Facilitando condiciones para centros (hubs) CCUS</b>	Acceso a infraestructuras de transporte compartidas	Unión Europea	Directiva CCS
	Facilitación de la infraestructura de almacenamiento compartido	Unión Europea	Directiva CCS
<b>Otros aspectos claves</b>	Interacciones con otros recursos de la superficie y del subsuelo	Unión Europea	Directiva CCS

Transición del recobro mejorado con CO <sub>2</sub> al almacenamiento exclusivo	Unión Europea	Directiva CCS
---	---------------	---------------

*Nota* Adaptado de marcos regulatorios y legales para CCUS (International Energy Agency, s.f.)

**Tabla 6**

*Aspectos de la Regulación de CCUS Reino Unido*

<b>Categoría</b>	<b>Usos</b>	<b>Región</b>	<b>Regulación</b>
<b>Definición del alcance regulatorio</b>	Clasificación y pureza de CO <sub>2</sub>	Reino Unido	Reglamento de 2010 sobre almacenamiento de dióxido de carbono (licencias, etc.)
<b>Evaluación de impacto ambiental y permisos</b>	Evaluación impacto ambiental	Reino Unido	Reglamento de 2010 sobre almacenamiento de dióxido de carbono (licencias, etc.) <sup>0</sup>
	Permisos y autorizaciones	Irlanda del Norte (Reino Unido)	Reglamento de almacenamiento de dióxido de carbono (licencias, etc.) (Irlanda del Norte) de 2015
	Participación y consulta pública	Reino Unido	Ley de Energía del Reino Unido de 2008
<b>Garantía de un almacenamiento confiable y seguro</b>	Inspecciones del sitio de almacenamiento	Irlanda del Norte (Reino Unido)	Reglamento de almacenamiento de dióxido de carbono (licencias, etc.) (Irlanda del Norte) de 2015
		Reino Unido	Ley de Energía del Reino Unido de 2008
	Proceso de cierre del sitio	Irlanda del Norte (Reino Unido)	Reglamento de almacenamiento de dióxido de carbono (licencias, etc.) (Irlanda del Norte) de 2015
<b>Asignaciones de responsabilidad a largo plazo del almacenamiento</b>	Responsabilidad a largo plazo tras el cierre del sitio	Reino Unido	Normativa de 2011 sobre el almacenamiento de dióxido de carbono (extinción de licencias)

*Nota* Adaptado de marcos regulatorios y legales para CCUS (International Energy Agency, s.f.)

**Tabla 7**

*Aspectos de la Regulación de CCUS Canadá*

<b>Categoría</b>	<b>Usos</b>	<b>Región</b>	<b>Regulación</b>
<b>Evaluación de impacto ambiental y permisos</b>	Permisos y autorizaciones	Columbia Británica (Canadá)	Ley del Petróleo y del Gas Natural
		Alberta (Canadá)	Regulación de tenencia de secuestro de carbono
<b>Soporte a proyectos pioneros</b>	Legislación extraordinaria y proyectos con enfoques específicos	Alberta (Canadá)	Ley de financiación de la captura y almacenamiento de carbono
		Alberta (Canadá)	Ley de Enmienda de los Estatutos de Captura y Almacenamiento de Carbono, 2011
<b>Garantía de un almacenamiento confiable y seguro</b>	Propiedad del espacio poroso	Alberta (Canadá)	Ley de Minas y Minerales
	Planes de medición, verificación y seguimiento	Alberta (Canadá)	Regulación de tenencia de secuestro de carbono
	Inspecciones del sitio de almacenamiento	Saskatchewan (Canadá)	Ley de Conservación del Petróleo y el Gas de Saskatchewan
<b>Asignaciones de responsabilidad a largo plazo del almacenamiento</b>	Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo	Alberta (Canadá)	Ley de Minas y Minerales
<b>Otros aspectos claves</b>	Transición de recobro mejorado con CO <sub>2</sub> al almacenamiento exclusivo	Alberta (Canadá)	Protocolo de cuantificación de EOR

*Nota* Adaptado de marcos regulatorios y legales para CCUS (International Energy Agency, s.f.)

**Tabla 8**

*Aspectos de la Regulación de CCUS Australia*

<b>Categoría</b>	<b>Usos</b>	<b>Región</b>	<b>Regulación</b>
<b>Evaluación de impacto ambiental y permisos</b>	Evaluación de recursos de almacenamiento	Victoria (Australia)	Greenhouse Gas Geological Sequestration Act 2008

	Permisos y autorizaciones	Queensland (Australia)	Greenhouse Gas Storage Act 2010
	Consulta y participación pública	Victoria (Australia)	Greenhouse Gas Geological Sequestration Act 2008
<b>Posibilitar proyectos pioneros</b>	Legislación puntual o específica de proyectos	Victoria (Australia)	Greenhouse Gas Geological Sequestration Act 2009
		Western Australia	Barrow Island Act 2003
<b>Garantizar un almacenamiento seguro y protegido</b>	Evaluación recursos de almacenamiento	Victoria (Australia)	Greenhouse Gas Geological Sequestration Act 2008
	Propiedad del espacio poroso	Victoria (Australia)	Greenhouse Gas Geological Sequestration Act 2008
	Planes de medición, seguimiento y verificación	Sur de Australia	Petroleum and Geothermal Energy Regulations 2013
		Victoria (Australia)	Greenhouse gas geological act 2008
	Responsabilidades operativas y seguridad financiera	Sur de Australia	Petroleum and Geothermal Energy Act 2000
		Victoria (Australia)	Greenhouse Gas Geological Sequestration Act 2008
	Inspecciones del sitio de almacenamiento	Victoria (Australia)	Greenhouse Gas Geological Sequestration Act 2008
	Proceso de cierre de sitio	Victoria (Australia)	Greenhouse Gas Geological Sequestration Act 2008
<b>Direccionamiento de las responsabilidades</b>	Garantías financieras de la administración del sitio a largo plazo	Victoria (Australia)	Greenhouse Gas Geological Sequestration Act 2008
	Responsabilidad a largo plazo posterior al cierre del sitio	Western Australia	Barrow Island Act 2003

---

<b>Otros aspectos y temas emergentes</b>	Interacciones con otros recursos de la superficie y del subsuelo	Victoria (Australia)	Greenhouse Gas Sequestration Act 2008	Geological
--	--	----------------------	---------------------------------------	------------

---

*Nota* Adaptado de marcos regulatorios y legales para CCUS (International Energy Agency, s.f.)

## 8 Conclusiones

La presente investigación tiene como uno de sus objetivos conocer, consolidar y analizar los marcos normativos para los proyectos de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> que algunos países han venido desarrollando e implementando a lo largo de los años. Esta tecnología está siendo considerada como una pieza fundamental para ayudar a gestionar la reducción de GEI, que poseen como agente principal el CO<sub>2</sub>, a fin de cumplir con la meta propuesta de mantener la temperatura global dentro de los límites establecidos y no tener efectos catastróficos en el medio ambiente. Adicionalmente, los proyectos de captura de CO<sub>2</sub> son muy favorables dado que tiene una doble funcionalidad dependiendo de si el CO<sub>2</sub> capturado se destina a almacenamiento de secuestro geológico, o se utilizara para transformación de productos químicos, como eco combustibles o materiales inorgánicos.

Como uno de los resultados de la investigación se consiguieron resaltar, a través de los marcos regulatorios ya implementados, las mejores prácticas para este tipo de proyecto, teniendo en cuenta que algunos países ya cuentan con proyectos en fases avanzadas y otros de escala piloto que han mostrado resultados favorables en su proceso. Asimismo, los marcos normativos ya establecidos resaltan que a medida que transcurra el tiempo se seguirá implementado mayores medidas de seguridad y a la vanguardia de la tecnología para obtener mejores resultados más eficientes. Consecuentemente con este estudio se evidencia que la experiencia ya adquirida en algunos los países en la implementación del marco normativo para los proyectos de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> representan un pilar fundamental de soporte para el desarrollo de un marco normativo en Colombia

Por lo tanto, con este estudio se concluye que los marcos normativos internacionales ya puestos en práctica en proyectos de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, que han sido reconocidos por entidades reguladoras y sus gobiernos, continúan generando múltiples beneficios tanto ambientales, sociales y económicos para las empresas y los países que han adoptado esta tecnología como una de las soluciones para su Transición Energética. Siendo Colombia uno de los países que reconoce a la tecnología CAC como una de las soluciones efectivas para ser implementadas como parte de su estrategia para contribuir en la reducción de GEI y asegurando también velar por la seguridad del medio ambiente y la salud pública, puede y debe tomar partido de todo el conocimiento y experiencia ya adquirido en la implementación y desarrollo del marco normativo legislativo, legal y técnico en países líderes como Estados Unidos.

Adicionalmente, en este estudio se revisaron los aspectos más relevantes de la evaluación geomecánica a fin de garantizar la contención durante los procesos de inyección de CO<sub>2</sub>, así como una visualización del estado del arte y metodologías utilizadas. Esta evaluación geomecánica contempla la evaluación de los riesgos potenciales que pueden surgir durante las operaciones para las diferentes estrategias de inyección adoptadas.

## **9 Recomendaciones**

Plantear en una futura investigación soportes en el desarrollo del marco normativo legislativo, legal y técnico para proyectos de CCUS en Colombia, desde una perspectiva integral considerando cada uno de los aspectos necesarios y visualizados en este estudio.

Para la incorporación de las actividades de CCUS en el marco jurídico colombiano, debe hacerse desde una perspectiva de protección del medio ambiente, los recursos naturales y la salud de la población. Adicionalmente, se debe evaluar el valor agregado de la tecnología dentro del mix de energía adoptado en la ruta de la transición energética en el país.

Adicionalmente, debido a los costos relacionados con la implementación de actividades de Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC), es crucial que en el país se analice los potenciales incentivos a largo plazo para estas actividades como parte de su estrategia de mitigación climática

### Bibliografía

Codigo de regulaciones federales. (7 de 11 de 2023). *Titulo 40*. Obtenido de <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-D/part-145>

ACT, S. D.-(. (6 de 2 de 2020). *Chapter 373 of the 78th Congress, Approved July, 1944, 58 Stat.* Obtenido de As Amended Through P.L. 116–92, Enacted December 20, 2019]: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-05/documents/safe\\_drinking\\_water\\_act-title\\_xiv\\_of\\_public\\_health\\_service\\_act.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-05/documents/safe_drinking_water_act-title_xiv_of_public_health_service_act.pdf)

Administracion Nacional Oceanica y Atmosferica. (24 de 11 de 2008). *Noaa.gov*. Obtenido de [https://www.gc.noaa.gov/documents/gcil\\_imo\\_co2wag.pdf](https://www.gc.noaa.gov/documents/gcil_imo_co2wag.pdf)

Agencia de proteccion ambiental de estados unidos. (17 de 4 de 2023). *Epa.gov*. Obtenido de Protección de las fuentes subterráneas de agua potable frente a la inyección subterránea (UIC): <https://espanol.epa.gov/espanol/proteccion-de-las-fuentes-subterraneas-de-agua-potable-frente-la-inyeccion-subterranea-uic>

Agencia de proteccion ambiental EPA. (15 de 6 de 2023 ). *Environmental Protection Agency*. Obtenido de <https://www.epa.gov/uic/class-vi-geologic-sequestration-permit-application-and-permitting-tools##outline>

Beeck Lee. (24 de 12 de 2019). *Global CCS Institute Ltd*. Obtenido de Clean Energy, 2020, Vol. 4, No. 1, 2–11: [https://watermark.silverchair.com/cleane\\_4\\_1\\_2.pdf?token=AQECAHi208BE49Ooan9k khW\\_Ercy7Dm3ZL\\_9Cf3qfKAc485ysgAAA0owggNGBgkqhkiG9w0BBwagggM3MIIDMwIBADCCAywGCSqGSib3DQEHATAeBglghkgBZQMEAS4wEQQMUhq7Eobxtc2BhIEWAgEQgIIC\\_VjwPXT4FVhrhG3tt7Gu9TvroAQLow8eZGZAiyWcyH](https://watermark.silverchair.com/cleane_4_1_2.pdf?token=AQECAHi208BE49Ooan9k khW_Ercy7Dm3ZL_9Cf3qfKAc485ysgAAA0owggNGBgkqhkiG9w0BBwagggM3MIIDMwIBADCCAywGCSqGSib3DQEHATAeBglghkgBZQMEAS4wEQQMUhq7Eobxtc2BhIEWAgEQgIIC_VjwPXT4FVhrhG3tt7Gu9TvroAQLow8eZGZAiyWcyH)

Canadian Legal information Institute. (27 de Mayo de 2019). *Carbon capture and storage statutes amenment. Act 2010-*. Obtenido de [Modificación del estatuto de captura y almacenamiento de carbono. Ley de 2010]: <https://www.canlii.org/en/ab/laws/astat/sa-2010-c-14/latest/sa-2010-c-14.html>

Canadian Legal Information Institute. (1 de Abril de 2023). *Environmental Protection and Enhancement Act, RSA 2000,* . Obtenido de [Ley de mejora y protección del medio ambiente RSA 2000, : <https://www.canlii.org/en/ab/laws/astat/sa-2010-c-14/latest/sa-2010-c-14.html>

Cerezales, Pablo Gutierrez; Burgos Rodríguez, Silvia; Vigil Montaña , Maria. (10 de Agosto de 2014). *Tecnologías de Captura de CO2*. Obtenido de DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7003>

Clean Air Task Force. (29 de Noviembre de 2023). *Seguimiento de los avances: Proyectos europeos de captura de carbono para 2023*. Obtenido de <https://www.catf.us/es/ccsmapeurope/>

Codigo Federal de regulaciones . (7 de 11 de 2023). *E CFR.gov*. Obtenido de <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-D/part-146>

Codigo, R. F. (7 de 11 de 2023). *Código de Regulaciones Federales (CFR.)*. Obtenido de El Título 40 fue modificado por última vez el 07/11/2023.: <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-D/part-144>

Congreso Nacional del medio Ambiente, cumbre del desarrollo sostenible. (4 de 12 de 2008). Almacenamiento Geologico de CO2, criterios de seleccion de emplazamientos. Madrid, [http://www.conama9.conama.org/conama9/download/files/CTs/2721\\_CRuiz.pdf](http://www.conama9.conama.org/conama9/download/files/CTs/2721_CRuiz.pdf), España

Dr. Sean McCoy. (2009). *Captura y secuestro de carbono: encuadrando las cuestiones para la regulación*. Pittsburgh, PA 15213: Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University.

El Medio Ambiente Secretaría del Ozono programa de las naciones unidas. (2016). *Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono*. Nairobi Kenya: la Secretaría de Ozono PNUMA.

Enviroment, U. (2016). Introduccion a la enmienda de Kigali. *Accion por el Ozono*, 1.

EPA. (s.f.). Obtenido de <https://www.epa.gov/uic/underground-injection-control-regulations-and-safe-drinking-water-act-provisions>

Fundacion Bioplanet Paris. (2015). *Blog*. Obtenido de <https://paris2015cop21.org/que-son-bonos-carbono/>

Galarza Celia. (21 de Febrero de 2013). *Real sociedad española de Química*. Obtenido de Almacenamiento geologico de CO2, una solucion para la mitigacion: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4207871.pdf>

García C , Vallejo, G, Lou, M, & Escobar, E. (2016). *El acuerdo de paris asi actuara colombia frente al cambio climatico*. Obtenido de Fundacion Natural: [https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/el\\_acuerdo\\_de\\_paris\\_\\_asi\\_actuara\\_colombia\\_frente\\_al\\_cambio\\_climatico.pdf](https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/el_acuerdo_de_paris__asi_actuara_colombia_frente_al_cambio_climatico.pdf)

Global CCS Institute. (Enero de 2017). *Principles for Best Practice Geomechanics for CCS Injection Operations and its Application to the CarbonNet Project*. Obtenido de Global CCS institute; Victoria state Government: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/principles->

for-best-practice-geomechanics-for-ccs-injection-operations-and-its-application-to-the-carbonnet-project/

Global CCS institute. (2019). *co2re.co*. Obtenido de <https://co2re.co/FacilityData>

Gobierno de España Ministerio de la Presidencia Justicia y Relaciones con la Corte. (31 de Diciembre de 2010). *Agencia estatal boletín oficial de estado*. Obtenido de Ley 40/2010, de 29 de diciembre, de almacenamiento geológico de dióxido de carbono.: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2010-20049>

González, F. R. (30 de marzo de 2023). *Plataforma tecnológica española de CO2*. Obtenido de Objetivo descarbonización en España: tecnologías de captura, almacenamiento de CO2: <https://files.gridco.comillas.edu/30-03-2023-pteco2.pdf>

González, A. A., Eguilior Díaz, S., Fernández Canteli, P., García Crespo, J., Hurtado Bezos, A., Mediato Arribas, J., . . . Rovira Daúdi, M. ((s.f) de 2018). *Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Departamento de Investigación en Recursos Geológicos*. Obtenido de Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT): <https://www.researchgate.net/publication/337840824>

Government of Alberta. (2024). *Captura, utilización y almacenamiento de carbono – Liderazgo*. Obtenido de Legislación y política: <https://www.alberta.ca/carbon-capture-utilization-and-storage-leadership#:~:text=Mines%20and%20Minerals%20Act%2C%20as,the%20Post%2DClosure%20Stewardship%20Fund>.

Haris Viswanathan, Pawar Rajesh, Stauffer Philip, Kaszuba John p, Carey William, Olsen Seth C, . . . Guthrie George D. (11 de Febrero de 2008). *Development of a Hybrid Process and*

*System Model for the Assessment of Wellbore Leakage at a Geologic CO<sub>2</sub> Sequestration Site*. Obtenido de Environ. Sci. Technol.: <https://doi.org/10.1021/es800417x>

Internacional Energy Agency . (Julio de 2022b). *Legal and Regulatory Frameworks for CCUS- b*. Obtenido de <https://iea.blob.core.windows.net/assets/bda8c2b2-2b9c-4010-ab56-b941dc8d0635/LegalandRegulatoryFrameworksforCCUS-AnIEACCUSHandbook.pdf>

International Energy Agency (IEA). (Julio de 2022). *Legal and Regulatory Frameworks for CCUS*. Obtenido de <https://iea.blob.core.windows.net/assets/bda8c2b2-2b9c-4010-ab56-b941dc8d0635/LegalandRegulatoryFrameworksforCCUS-AnIEACCUSHandbook.pdf>

International Energy Agency. (Julio de 2022a). *CCUS Legal and Regulatory Database-a*. Obtenido de <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/ccus-legal-and-regulatory-database>

International Energy Agency. (s.f.). *IEA 50 Policies database*. Obtenido de <https://www.iea.org/policies>

Ministerio principal energía y minerales Gobierno de Alberta. (2024 ). *Captura, utilización y almacenamiento de carbono – Liderazgo* . Obtenido de Alberta.ca: <https://www.alberta.ca/carbon-capture-utilization-and-storage-leadership#:~:text=Mines%20and%20Minerals%20Act%2C%20as,the%20Post%2DClosure%20Stewardship%20Fund>.

Naciones Unidas. (1998). *Protocolo de Kyoto de la convencion maroc de las naciones unidas sobre cambio climatico* . Obtenido de <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>

Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de Paris* . Paris: [https://unfccc.int/sites/default/files/spanish\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf).

Organizacion Maritima Internacional. (2016). *El protocolo de Londres ¿que es y porque es necesario?* Londres: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/es/OurWork/Environment/Documents/London%20Protocol%20Why%20is%20it%20needed.pdf>.

Perez-Estaun, A., Gómez, M., & Carrera Ramirez, J. (Enero de 2009). *El almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>, una de las soluciones al efecto invernadero*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/254491927\\_El\\_almacenamiento\\_geologico\\_de\\_CO2\\_una\\_de\\_las\\_soluciones\\_al\\_efecto\\_invernadero](https://www.researchgate.net/publication/254491927_El_almacenamiento_geologico_de_CO2_una_de_las_soluciones_al_efecto_invernadero)

Rodríguez S, Liliana. (2007). *Protocolo de Kyoto Debate sobre ambiente y desarrollo en las discusiones sobre cambio climático gestión y ambiente*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Medellín.

Savogal, N. (1995). El protocolo de Montreal, un modelo de concertación de la capa de ozono. *Revista de relaciones internacionales N14*.

Stavro, X. T. (19 de Julio de 2007). *Implementación del Protocolo de Montreal en Colombia*. Obtenido de [http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/523/1/PL\\_V2\\_N1\\_p091-105\\_protocolo\\_montreal.pdf](http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/523/1/PL_V2_N1_p091-105_protocolo_montreal.pdf)

United State Environmental protection Agency. (23 de 10 de 2023). *Epa.gov*. Obtenido de <https://www.epa.gov/uic/class-vi-wells-used-geologic-sequestration-carbon-dioxide>

Vania, L., Jorge, T., & Bertolini, G. (2016). *Bonos de Carbono financiarización del medio ambiente en México*. Obtenido de Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional: <https://www.redalyc.org/journal/417/41744004008/movil/>

Victorian Current Acts. (1 de Enero de 2008). *Greenhouse gas geological sequestration act 2008*. Obtenido de [Ley de secuestro geológico de gases de efecto invernadero de 2008]: [https://www6.austlii.edu.au/cgi-bin/viewdb/au/legis/vic/consol\\_act/gggsa2008398/](https://www6.austlii.edu.au/cgi-bin/viewdb/au/legis/vic/consol_act/gggsa2008398/)

Xiaochun Li , Qi Li , Bing Bai , & Ning Wei . (19 de Abril de 2016). *The geomechanics of Shenhua carbon dioxide capture and storage (CCS) demonstration project in Ordos Basin, China.*

Obtenido de Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.07.002>

Yongcun , F., Shuai , Z., Chengyun Maa,, Fangrao , L., Mojgan , H., & Hyundon , S. (4 de Julio de 2023). *The role of geomechanics for geological carbon storage.* Obtenido de Gondwana

Research: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.07.003>

Youngsoo , S., Sungjun , J., Yoonsu Na, Kyuhyun Kim, Youngho, & Hoon Wanga Ji. (12 de Diciembre de 2022). *Geomechanical challenges during geological CO2 storage: A review.*

Obtenido de Chemical Engineering Journal: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140968>