

**Evaluación de las propiedades petrofísicas y mineralógicas de la roca sello prospecto
para la inyección y almacenamiento de CO₂**

Roberto Luis Moreno Sánchez y Brayán Eduardo Zárate Jiménez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Diego Armando Vargas Silva

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2026

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander, a la Facultad de Ingeniería Físicoquímicas y a la Escuela de Ingeniería de Petróleos, por la formación académica brindada y por proporcionar los espacios y recursos necesarios para el desarrollo de este trabajo de grado.

De manera especial, se agradece a la Dra. Zuly Himelda Calderon Carrillo codirectora del trabajo de grado y al director el Dr. Diego Armando Vargas Silva, por su orientación, acompañamiento académico y valiosos aportes técnicos, los cuales fueron fundamentales para el adecuado desarrollo y culminación de esta investigación.

Asimismo, extendemos un agradecimiento a los docentes que, a lo largo del programa académico, contribuyeron con su conocimiento y experiencia a la formación profesional de los autores, así como a las instituciones y fuentes de información consultadas, cuyo material técnico y científico permitió sustentar el análisis desarrollado en este estudio.

Finalmente, agradecemos a nuestras familias y personas cercanas por el apoyo constante, la comprensión y el respaldo brindado durante el proceso académico, los cuales fueron determinantes para alcanzar este logro.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos	14
2. Metodología	15
3. Generalidades del almacenamiento de CO ₂	19
3.1 Captura y almacenamiento de carbono (CCS).....	19
3.2 Roca sello.....	19
3.3 Roca almacenadora	20
3.4 Cambios petrofísicos y mineralógicos	20
3.5 Estudios internacionales	21
3.6 Prospectividad en contexto colombiano	21
4. Análisis propiedades petrofísicas, mineralógicas y geomecánica de la roca sello.....	22
4.1 Propiedades petrofísicas de la roca sello	23
4.1.1. Permeabilidad	23
4.1.2. Porosidad	24
4.1.3. Presión capilar de entrada.....	24
4.1.4. Mojabilidad.....	25
4.1.5. Espesor y continuidad lateral.....	25
4.2 Propiedades mineralógicas de la roca sello	26
4.2.1 Minerales arcillosos.....	26
4.2.2 Minerales inertes	27
4.2.3 Minerales reactivos.....	28

PROPIEDADES PETROFÍSICAS DE LA ROCA SELLO PROSPECTO	4
4.3 Propiedades geomecánicas	29
4.3.1 Presión de fractura	29
4.3.2 Compresibilidad.....	30
4.3.3 Propiedades elásticas	30
4.3.4 Resistencia mecánica	31
4.3.5 Estabilidad estructural.....	31
4.4 Interacción CO ₂ - roca y efectos a largo plazo	31
5. Estudios a nivel mundial que caracterizan la interacción entre el CO ₂ y la roca sello.	32
5.1 Sleipner (Mar del Norte, Noruega)	34
5.1.1 Composición mineral.....	34
5.1.2 Contenido de arcillas	34
5.1.3 Minerales reactivos.....	35
5.1.4 Espesor y extensión lateral:	35
5.1.5 Integridad estructural.....	36
5.1.6 Condiciones de presión y temperatura	36
5.2 Snøhvit (Mar de Barents, Noruega)	37
5.2.1 Composición mineral.....	37
5.2.2 Contenido de arcillas	37
5.2.3 Minerales reactivos.....	38
5.2.4 Espesor y extensión lateral	38
5.2.5 Integridad estructural.....	39
5.2.6 Condiciones de presión y temperatura	39
5.3 In Salah (Argelia).....	40
5.3.1 Composición mineral.....	40
5.3.2 Contenido de arcillas	41

PROPIEDADES PETROFÍSICAS DE LA ROCA SELLO PROSPECTO	5
5.3.3 Minerales reactivos.....	41
5.3.4 Espesor y extensión lateral	42
5.3.5 Integridad estructural.....	42
5.3.6 Condiciones de presión y temperatura	42
5.4 Decatur (Illinois, EE. UU.)	43
5.4.1 Composición mineral:	43
5.4.2 Contenido de arcillas	43
5.4.3 Minerales reactivos.....	44
5.4.4 Espesor y extensión lateral:	44
5.4.5 Integridad estructural.....	44
5.4.6 Condiciones de presión y temperatura	45
5.5 Quest (Alberta, Canadá)	45
5.5.1 Composición mineral.....	46
5.5.2 Contenido de arcillas	46
5.5.3 Minerales reactivos.....	46
5.5.4 Espesor y extensión lateral	47
5.5.5 Integridad estructural.....	47
5.5.6 Condiciones de presión y temperatura	47
6 Metodología para la selección de la roca sello prospecto para la inyección y almacenamiento de CO ₂	52
6.1 Paso 1. Revisar la permeabilidad y su estimación.....	53
6.2 Paso 2. Revisar la presión capilar de entrada y su estimación	53
6.3 Paso 3. Revisar la mojabilidad de la roca.....	54
6.4 Paso 4. Revisar la porosidad y sus rangos.....	54
6.5 Paso 5. Revisar espesor y continuidad lateral	55

6.6 Paso 6. Análisis de los Parámetros de las propiedades geomecánicas	56
6.6.1 Presión de fractura	56
6.6.2 Compresibilidad de la roca	56
6.6.3 Propiedades elásticas	56
6.6.4 Resistencia mecánica	57
6.6.5 Estabilidad estructural y reactivación de fallas.....	57
6.7 Paso 7. Analizar su composición mineralógica	57
6.7.1 Clasificación de minerales arcillosos	58
6.7.2 Clasificación de minerales reactivos	59
6.7.3 Clasificación de minerales inertes.....	59
6.8 Diagrama de flujo criterios de selección	60
6.9 Caracterización de una roca sello prospecto según sus propiedades petrofísicas.....	62
6.10 Caracterización de una roca sello prospecto según su composición mineralógico	62
7 Estudios a nivel nacional en diferentes regiones para evaluar la prospectividad en la roca sello.....	65
7.1 Cordillera Central	67
7.1.1 Actividad sísmica	69
7.1.2 Falla Agrado Betania.....	70
7.2 La Cordillera Occidental.....	71
7.2.1 Grupo Dagua	71
7.2.2 Grupo Diabasa.....	72
7.2.3 Formación Cisneros.....	73
7.2.4 Formación Espinal.....	73
7.2.5 Formación Barroso	73
7.2.6 Formación Penderisco	76

PROPIEDADES PETROFÍSICAS DE LA ROCA SELLO PROSPECTO	7
7.3 Cordillera Oriental	79
7.3.1 Formación Guadalupe	81
7.4 Cuenca de los Llanos Orientales.....	82
7.4.1 Formación León.....	82
7.4.2 Formación Guayabo	83
7.5 Valle Medio del Magdalena.....	84
7.5.1 Formación Mesa	86
7.5.2 Formación Lisama	87
7.5.3 Formación La Luna	89
7.6 Cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM)	95
7.6.1 Formación Villeta.....	97
8 Conclusiones	104
Referencias Bibliográficas	105

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Resumen de estudios internacionales.....	48
Tabla 2. Cambios en las propiedades antes y después de la inyección.....	50
Tabla 3 Caracterización petrofísica de una roca sello prospecto	62
Tabla 4 Reacción de los minerales en la roca sello ante el CO ₂	63
Tabla 5. Cuadro Comparativo Global de Formaciones Sello para Almacenamiento de CO ₂	98
Tabla 6. Procesamiento de datos nacionales	100

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología para selección de formaciones prospecto ...	18
Figura 2. Estabilidad química del calcio ante la presencia de CO ₂	27
Figura 3. Estabilidad química del magnesio ante la presencia de CO ₂	28
Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología para criterios selección de la roca sello para almacenamiento de CO ₂	61
Figura 5. Mapa de Cuencas Sedimentarias de Colombia	66
Figura 6. Columna generalizada flanco E CORDILLERA CENTRAL.....	68
Figura 7. Fractured volcanic rocks in the Cordillera Central	69
Figura 8. Columna Estratigráfica Generalizada del Grupo Dagua y el Grupo Diabásico	72
Figura 9. Geología y localización de la Formación Barroso y las Diabasas de San José de Urama.....	74
Figura 10. Microfotografías de la Formación Barroso	75
Figura 11. Ilustración de campo de las rocas de la Formación Penderisco	77
Figura 12. Localización de formaciones con secciones delgadas.....	78
Figura 13. Estratigrafía generalizada de la Cordillera Oriental	80
Figura 14. Columna estratigráfica generalizada del Sinclinal Checua-Lenguazaque	81
Figura 15. Cronoestratigrafía generalizada de la Cordillera Oriental y la Cuenca Llanos Orientales	83
Figura 16. Columna Estratigráfica Generalizada del Valle Medio del Magdalena	85
Figura 17. Esquema de las principales provincias tectónicas de Colombia	88
Figura 18. Descripción litológica y registros del pozo Infantas-1613.....	90
Figura 19. Columna estratigráfica generalizada del Valle Superior Del Magdalena	96

Resumen

Título: Evaluación de las propiedades petrofísicas y mineralógicas de la roca sello prospecto para la inyección y almacenamiento de CO₂*

Autores: Brayan Eduardo Zárate Jiménez y Roberto Luis Moreno Sánchez**

Palabras Clave: Roca sello, almacenamiento geológico de CO₂, propiedades petrofísicas, composición mineralógica, seguridad de almacenamiento

Descripción:

La captura y almacenamiento de CO₂ es una estrategia esencial para mitigar gases de efecto invernadero, donde la roca sello desempeña un papel crucial que garantiza el confinamiento seguro a largo plazo. Esta investigación caracteriza unidades prospecto mediante la evaluación de propiedades petrofísicas y mineralógicas, analizando su integridad y respuesta geoquímica ante la interacción con el gas inyectado.

La metodología se fundamentó en un enfoque documental y comparativo, mediante la revisión de experiencias internacionales para definir criterios técnicos de selección basados en la interacción roca-CO₂. Este análisis permitió evaluar diversas unidades litoestratigráficas en Colombia, estableciendo una base metodológica que garantiza la integridad del confinamiento y la seguridad operativa en futuros proyectos de almacenamiento geológico en el país.

Los resultados de la investigación permitieron identificar que la estabilidad a largo plazo del sello está condicionada por una matriz rica en minerales inertes como el cuarzo y arcillas no expansivas como la ilita y caolinita, las cuales minimizan la reactividad geoquímica y mantienen la estanqueidad. Se determinó que la Formación León, en la cuenca de los Llanos Orientales, es la unidad de mayor efectividad en Colombia, caracterizada por permeabilidades ultra-bajas en el rango de 10⁻¹⁸ a 10⁻¹⁹ m² y una porosidad efectiva reducida (menor al 5%). Estos valores, sumados a su continuidad regional y baja deformación tectónica, la consolidan como el prospecto de mayor viabilidad técnica frente a otras unidades del territorio nacional.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Diego Armando Vargas Silva. Doctor en Ingeniería Química. Codirectora: Zuly Himelda Calderon Carrillo. Doctora en Ingeniería Química

Abstract

Title: Evaluation of the petrophysical and mineralogical properties of the prospective cap rock for CO₂ injection and storage *

Authors: Brayán Eduardo Zárate Jiménez y Roberto Luis Moreno Sánchez**

Key Words: Seal rock, geological CO₂ storage, petrophysical properties, mineralogical composition, storage safety

Description:

Carbon dioxide (CO₂) capture and storage has become a key strategy for mitigating greenhouse gas emissions, in which the seal rock plays a fundamental role by ensuring the safe confinement of the gas in the long term. This research aims to characterize the seal rock prospect for CO₂ storage by evaluating the petrophysical and mineralogical properties that determine its integrity and safety against CO₂ injection and how the formation reacts to the interaction with this gas. The methodology employed was based on a documentary, descriptive, and comparative approach, which included a review of representative international studies addressing the interaction between the formation and the injected gas. These studies provided relevant information regarding their petrophysical and mineralogical characteristics.

Furthermore, the study analyzed the formation's behavior in response to injection and its interaction with carbon dioxide, thus enabling the design of a technical selection methodology to ensure successful storage and operational safety of CO₂ injection. Finally, Colombian formations with favorable characteristics for acting as seal rock were identified and evaluated, and technical criteria were proposed to provide a methodological basis for future geological CO₂ storage projects in the country.

* Bachelor's Thesis

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Diego Armando Vargas Silva. Doctor en Ingeniería Química. Codirectora: Zuly Himelda Calderon Carrillo. Doctora en Ingeniería Química

Introducción

Es evidente que para la industria de los hidrocarburos el tema de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero no es un tema irrelevante. La creciente preocupación por el cambio climático y sus efectos adversos sobre el medio ambiente ha impulsado la búsqueda de tecnologías y estrategias efectivas para la mitigación de estos gases. En este contexto, la captura y almacenamiento geológico de CO₂ (CCS) se ha consolidado como una de las estrategias más prometedoras para reducir la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. Este proceso implica la inyección de CO₂ en formaciones geológicas, donde la roca sello desempeña un papel fundamental al actuar como una barrera impermeable que previene la migración del gas. Sin embargo, lo que se busca es que la inyección de CO₂ no llegue a alterar las condiciones de la formación, ya que, si no se tienen claras las características que debe poseer dicha formación y, en especial, la roca sello para que le dé seguridad al proceso de almacenamiento, este podría inducir cambios significativos en las propiedades petrofísicas y mineralógicas de estas formaciones, lo que podría afectar la seguridad y la eficacia del almacenamiento a largo plazo.

Por lo tanto, es claro que la integridad de la roca sello es el factor determinante para la seguridad de los proyectos de almacenamiento geológico de CO₂. Tal como se ha evidenciado en experiencias internacionales de inyección a gran escala como Sleipner, Shovit, In Salah, Quest y Detacur, la eficacia del confinamiento no es una propiedad estática, sino el resultado de una interacción dinámica entre la baja permeabilidad de la roca, su estabilidad geomecánica ante la inyección y su reactividad mineralógica frente al ácido carbónico (H₂CO₃). En este sentido, la justificación de esta investigación radica en la necesidad de comprender, a partir de información existente, los efectos potenciales a largo plazo de la inyección de CO₂ sobre las formaciones geológicas, dado que las alteraciones en sus propiedades pueden influir en la capacidad de sellado, la migración del CO₂ y, en última instancia, en la estabilidad del almacenamiento.

Es por lo dicho anteriormente que el objetivo principal de esta tesis se basa en caracterizar la roca sello prospecto para darle seguridad al almacenamiento de CO₂, mediante un análisis documental y comparativo de información reportada en la literatura científica y técnica, evaluando los cambios mineralógicos y petrofísicos generados por la interacción con el gas. Cabe resaltar que los valores y parámetros analizados en este estudio no provienen de mediciones experimentales directas, sino de estudios previos publicados a nivel internacional, lo cual permite establecer tendencias, rangos de comportamiento y criterios técnicos de selección. Para lograrlo, se llevarán a cabo análisis detallados de las propiedades requeridas en la roca sello que puedan garantizar un almacenamiento seguro, apoyándose en la revisión y comparación de casos de estudio documentados. Además, se analizaron investigaciones a nivel mundial que abordan la interacción entre el CO₂ y la roca sello, permitiendo un entendimiento más profundo de los mecanismos que rigen estas interacciones.

Este proyecto también busca definir cuáles son los cambios que puede generar el gas al ser inyectado e interactuar con la formación, así como identificar el tipo de roca sello más adecuada desde un enfoque teórico y comparativo. Al tener claridad sobre estos aspectos, se podrá diseñar y consolidar una metodología de selección técnica basada en literatura que contribuya al éxito y la seguridad operativa de la inyección de CO₂. Asimismo, se pretende añadir un valor agregado al proceso de selección de formaciones geológicas en Colombia, ya que, ante la falta de protocolos locales que integren la complejidad geológica del país con los estándares petrofísicos internacionales, se hace imperativo establecer una hoja de ruta técnica que permita jerarquizar las formaciones nacionales con mejores condiciones para actuar como roca sello apta para el almacenamiento de dióxido de carbono.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar la roca sello prospecto para almacenamiento de CO₂ e identificar los cambios mineralógicos y petrofísicos generados por la inyección del gas.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar un análisis de las propiedades petrofísicas y mineralógicas requeridas en la roca sello para que permita almacenamiento de CO₂.
- Revisar estudios a nivel mundial que caracterizan la interacción entre el CO₂ y la roca sello.
- Definir una metodología para seleccionar la formación que mejor comportamiento presente como roca sello en almacenamiento de CO₂.
- Establecer las formaciones colombianas que mejores condiciones de sello puedan brindar para almacenar CO₂.

2. Metodología

En el desarrollo de esta investigación se llevó a cabo una metodología basada en un enfoque documental, descriptivo y comparativo, orientado a la recopilación, análisis y síntesis de información técnica existente sobre las características petrofísicas y mineralógicas de las rocas sello frente a procesos de inyección y almacenamiento geológico de dióxido de carbono (CO₂). Es importante resaltar que este estudio no contempla la realización de mediciones experimentales ni trabajo de campo, sino que se fundamenta exclusivamente en información secundaria proveniente de literatura científica, reportes técnicos y estudios previamente publicados.

El estudio se estructuró en cinco etapas metodológicas, las cuales permitieron construir una visión integral del comportamiento de las rocas sello y su aplicabilidad en el contexto colombiano, a partir del análisis comparativo de casos documentados a nivel internacional y nacional.

Etapas 1. Revisión bibliográfica: En esta fase se realizó una búsqueda y revisión exhaustiva de literatura científica y técnica relacionada con el almacenamiento geológico de CO₂ y el papel de la roca sello en este proceso. Las fuentes consultadas incluyeron artículos científicos, informes técnicos, memorias de proyectos piloto y estudios de caso internacionales, a partir de los cuales se recopilaron datos reportados por otros autores.

La información recopilada permitió identificar las propiedades petrofísicas y mineralógicas críticas que determinan la capacidad de una roca para actuar como sello efectivo. Entre estas se destacaron la porosidad, permeabilidad, presión de entrada capilar, mojabilidad, compresibilidad, espesor, continuidad lateral y composición mineralógica. Cada fuente fue analizada en función de su aporte al entendimiento de la interacción entre el CO₂ y los

diferentes tipos de rocas, priorizando estudios experimentales y proyectos piloto documentados en la literatura internacional, sin realizar validaciones experimentales propias.

Etapa 2. Análisis comparativo de formaciones geológicas basado en estudios internacionales: Una vez consolidada la información bibliográfica, se efectuó un análisis comparativo entre proyectos de almacenamiento de CO₂ reconocidos a nivel mundial. Entre los proyectos analizados se incluyeron Sleipner y Snøhvit (Noruega), In Salah (Argelia), Decatur (EE. UU.) y Quest (Canadá). El análisis se realizó a partir de los resultados y parámetros reportados en la literatura, lo que permitió establecer un marco de referencia sobre las propiedades ideales de una roca sello y su comportamiento frente a la inyección de CO₂.

Etapa 3. Definición de criterios técnicos de selección de roca sello: Con base en los resultados obtenidos en las etapas anteriores, se definieron criterios técnicos y cualitativos tales como permeabilidad, porosidad, presión de entrada capilar, composición mineralógica y otras características relevantes. Estos criterios se construyeron a partir del análisis comparativo de estudios previos, y sirvieron como base para definir una metodología teórica de selección de formaciones potenciales para actuar como roca sello ante la inyección de dióxido de carbono, así como para orientar la evaluación de posibles formaciones colombianas con prospectividad para dicho almacenamiento.

Etapa 4. Identificación de formaciones colombianas prospectivas: En esta fase se aplicaron los criterios definidos para evaluar y clasificar formaciones colombianas con potencial de actuar como roca sello. La información utilizada fue obtenida exclusivamente de estudios previos y publicaciones existentes, tales como reportes del Servicio Geológico Colombiano, literatura académica y documentos técnicos de exploración y caracterización de cuencas sedimentarias nacionales.

El análisis se basó en estudios geológicos existentes, mapas litoestratigráficos y reportes de caracterización petrofísica disponibles en la literatura. El enfoque principal fue

determinar, desde un punto de vista documental, las condiciones de sellado, la composición mineralógica y la estabilidad mecánica de las formaciones identificadas. Se evaluaron aspectos como el contenido de arcillas, la presencia de lutitas compactas o evaporitas, la continuidad lateral de los estratos y la relación estructural con formaciones reservorio potenciales.

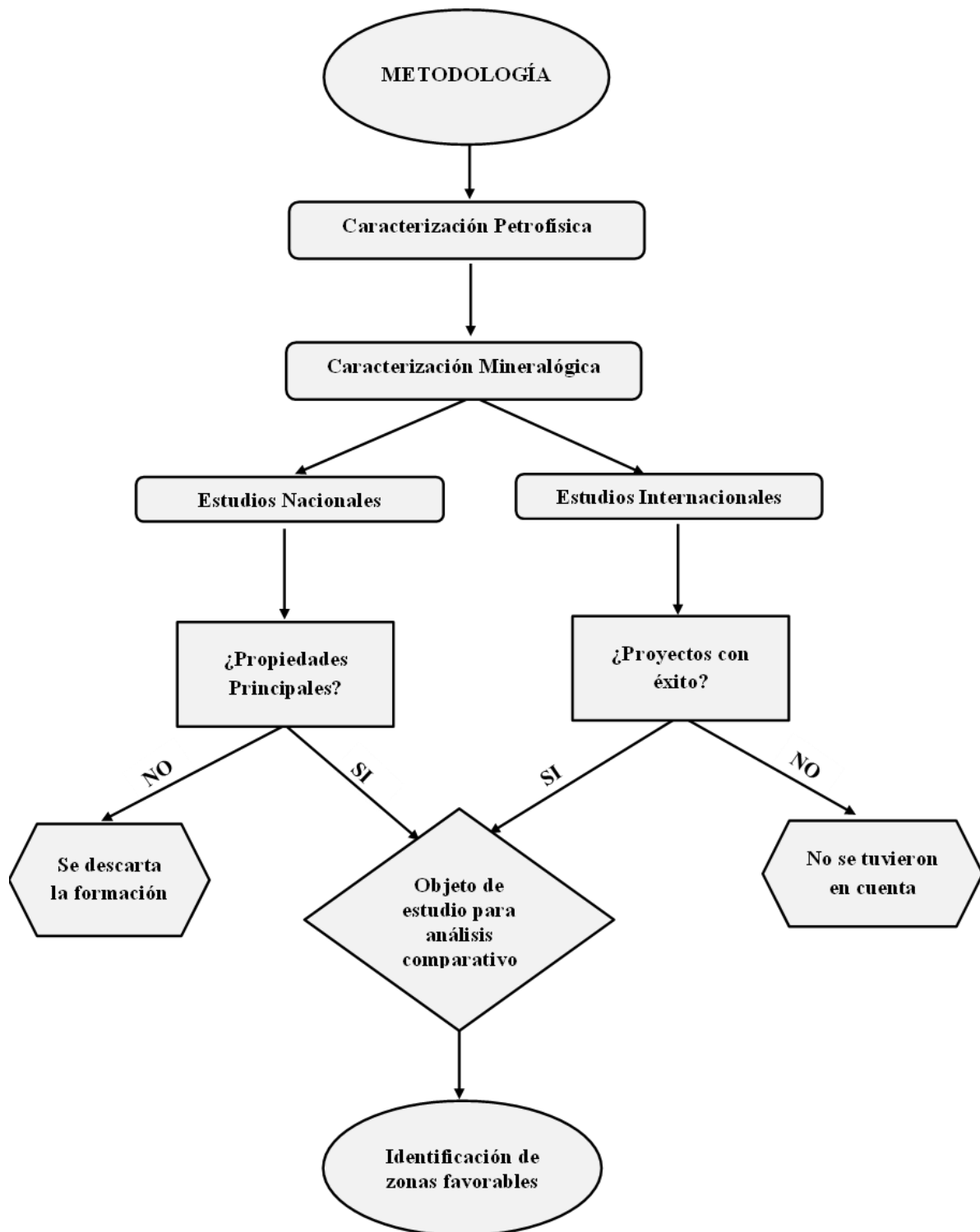
Asimismo, se identificaron y analizaron formaciones con condiciones favorables para el almacenamiento de CO₂, tales como La Luna, Villeta, León, Guayabo, Dagua y La Mesa, pertenecientes a cuencas como el Valle Medio del Magdalena, los Llanos Orientales, la Cordillera Oriental y la Cordillera Occidental, con base en información reportada en la literatura técnica disponible.

Etapas 5. Elaboración del documento técnico final: Por último, se consolidó toda la información obtenida en las etapas anteriores en un documento técnico y académico que integra la caracterización de propiedades petrofísicas y mineralógicas, los estudios comparativos internacionales y la evaluación de prospectividad de las formaciones colombianas.

Durante esta etapa se realizaron procesos de validación y coherencia técnica, verificando la consistencia interna de los datos bibliográficos y la correspondencia entre los criterios aplicados y los resultados obtenidos. El producto final refleja un análisis integral y sistemático de carácter documental, que proporciona una base conceptual sólida para futuras investigaciones experimentales relacionadas con la inyección y almacenamiento geológico de CO₂ en el territorio colombiano.

Figura 1.

Diagrama de flujo de la metodología para selección de formaciones prospecto



3. Generalidades del almacenamiento de CO₂

3.1 Captura y almacenamiento de carbono (CCS)

La captura y almacenamiento de carbono (CCS) es una tecnología emergente diseñada para mitigar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera (International Energy Agency [IEA], 2020). Este proceso implica la captura de CO₂ en fuentes industriales o energéticas, seguido de su transporte y almacenamiento en formaciones geológicas profundas, donde se espera que permanezca durante miles de años (Metz et al., 2005). La CCS es considerada una herramienta crucial en la lucha contra el cambio climático, ya que permite reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2005).

3.2 Roca sello

La roca sello es una formación geológica que actúa como barrera impermeable para el CO₂ almacenado. Las propiedades petrofísicas y mineralógicas de esta unidad son determinantes para garantizar el confinamiento seguro y efectivo a largo plazo (Hildenbrand et al., 2004). Entonces, para cumplir esta función crítica y garantizar la seguridad en el almacenamiento del CO₂ es de suma importancia analizar y caracterizar dichas propiedades y características de la roca las cuales pueden determinar cómo el CO₂ se comportará al entrar en interacción con diferentes minerales y si la roca es adecuada para confinarlo de manera segura a largo plazo.

Entre las propiedades clave de la roca sello se destacan: baja permeabilidad, alta presión de entrada capilar, continuidad lateral, espesor suficiente y estabilidad mecánica que evite fracturas ante la presión del CO₂. Además, la composición mineralógica debe ser resistente a la interacción química con CO₂ y el agua presente en la formación, para mantener la integridad a largo plazo y asegurar un almacenamiento seguro.

3.3 Roca almacenadora

En un proyecto de captura e inyección de CO₂, la roca almacenadora o reservorio es la unidad geológica que recibe y almacena el CO₂. Sus propiedades principales son alta porosidad, buena permeabilidad, continuidad lateral y espesor suficiente, además de estabilidad mecánica frente a la presión de inyección. La combinación adecuada de roca almacenadora y roca sello es fundamental: mientras la primera asegura la capacidad de almacenamiento, la segunda garantiza la contención y evita fugas, definiendo la seguridad y efectividad del proyecto de CCS

3.4 Cambios petrofísicos y mineralógicos

La interacción entre el CO₂ y la roca sello puede generar cambios en las propiedades de la roca a largo plazo. Estudios experimentales han demostrado que la disolución de minerales y la precipitación de nuevas fases minerales pueden alterar la porosidad y permeabilidad de la roca sello, comprometiendo su capacidad de sellado (Kaszuba et al., 2013). Estas reacciones pueden ser de diversos tipos, como disolución de minerales, precipitación de nuevas fases minerales, alteración de la estructura de los minerales existentes o cambios en el pH del agua presente en la roca. un ejemplo beneficioso para este caso se evidencia en la reacción del CO₂ con minerales arcillosos puede generar la formación de carbonatos, lo que podría mejorar la capacidad de sellado a largo plazo.

Sin embargo, también se ha observado que la interacción química entre el CO₂ y ciertos minerales puede generar fracturas o cambios en la estructura de la roca, lo que aumenta el riesgo de fugas (Orlic et al., 2011). Por lo tanto, en este proyecto también se analizan estos cambios que pueden ocurrir ante la inyección y darle esa seguridad técnica a la inyección y almacenamiento del gas.

3.5 Estudios internacionales

A nivel mundial, se han realizado diversos estudios sobre la interacción entre el CO₂ y la roca sello. Estos estudios han demostrado que la efectividad del almacenamiento de CO₂ depende de una comprensión detallada de las propiedades geológicas y de las reacciones químicas que ocurren en el subsuelo. Ejemplos significativos incluyen:

- **Proyectos Piloto:** Iniciativas como el proyecto Sleipner en Noruega y otros como Shovit, In Salah, Quest y Detacur han proporcionado datos valiosos sobre el comportamiento del CO₂ en formaciones geológicas, así como sobre los cambios en las propiedades de las rocas sello a lo largo del tiempo.
- **Modelos Predictivos:** Se han desarrollado modelos que simulan la inyección de CO₂ y sus efectos en las formaciones geológicas, lo que ayuda a anticipar cambios en la estructura de la roca y en la migración del CO₂.

3.6 Prospectividad en contexto colombiano

En Colombia, la evaluación de formaciones geológicas para el almacenamiento de CO₂ es fundamental, dada la necesidad de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir a los compromisos internacionales en materia de cambio climático. Sin embargo, existe una limitada información sobre las características de las rocas sello en el país y su capacidad para almacenar CO₂ de manera segura.

Podemos interpretar como adecuado o con condiciones de interés aquellos yacimientos que cuenten con un tipo de sello ideal para el almacenamiento de CO₂, lo cual debe ser una capa de roca prácticamente impermeable, con un espesor considerable y una extensión lateral que cubra todo el yacimiento. Además, debe ser resistente a fracturas y deformaciones para garantizar la contención del CO₂ a largo plazo, y si hacemos referencia en cuanto al tipo de yacimiento, los que se caracterizan y se relacionan con el almacenamiento de CO₂, son aquellos con arenas bituminosas, yacimientos depletados y formaciones de carbonato (como calizas y

dolomías), los que suelen ser considerados como candidatos potenciales para el almacenamiento de CO₂ debido a sus características porosas y permeables, o a su capacidad de adsorción de CO₂.

De acuerdo con lo anterior, las posibles formaciones colombianas prospecto y que se van a analizar en el desarrollo del proyecto son:

- Cuenca del Magdalena Medio: Esta cuenca ha sido intensamente explorada y producida, y se conocen formaciones con rocas sello de buena calidad como lo es la Formación La Luna, que consta de baja permeabilidad y amplia distribución regional. Bajo este nivel estratigráfico, formaciones como Tablazo y los intervalos arenosos del Grupo Cogollo se perfilan como unidades de almacén candidatas. La cual están compuesta principalmente por lutitas y calizas. (ANH, 2012)
- Cuenca de los Llanos Orientales: La extensión de esta cuenca y la presencia de yacimientos maduros la convierten en una región de interés para el almacenamiento geológico de CO₂, en donde por sus condiciones cabe mencionar la *Formación León*, que se destaca como el principal sello regional de la cuenca. Esta unidad está compuesta predominantemente por lutitas grises a verdosas, densas y plásticas, con espesores que pueden superar los 250 metros en el *depocentro* de la cuenca (Cooper et al., 1995).
- Cuenca del Putumayo: Esta cuenca, con su complejidad geológica, podría albergar yacimientos con sellos superiores de diferentes tipos. La Formación Villeta destaca por su dualidad funcional; según García et al. (2009), sus potentes secuencias de lutitas marinas y calizas densas no solo constituyen la principal roca generadora de la región, sino que actúan como un sello regional de alta integridad.

4. Análisis propiedades petrofísicas, mineralógicas y geomecánica de la roca sello

Hoy en día una de las soluciones o estrategia clave que se están llevando a cabo en la industria petrolera para mitigar las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) y combatir el cambio climático es el almacenamiento geológico de dióxido de carbono (CO₂). Uno de los componentes esenciales para el éxito de esta técnica es la roca sello, una capa geológica que actúa como una barrera impermeable, impidiendo que el CO₂ migre hacia la superficie o hacia otras formaciones no deseadas (Orlic et al., 2011). Por ello se deben tener en cuenta las características petrofísicas y mineralógicas específicas que garanticen la seguridad en el proceso de almacenamiento

En este capítulo, se analizan estas propiedades en detalle, la recopilación de datos se basó en artículos científicos, informes técnicos y archivos ya documentados a partir de los cuales se recopilaron datos, con el fin de proporcionar una comprensión profunda de los requisitos necesarios para una roca sello efectiva en el contexto del almacenamiento geológico de CO₂.

4.1 Propiedades petrofísicas de la roca sello

Las propiedades petrofísicas describen las características físicas de la roca, con las cuales se puede determinar su capacidad para almacenar y confinar fluidos; Ya un poco más enfocados en el contexto del almacenamiento de CO₂ es claro que estas propiedades son fundamentales para garantizar la integridad y eficacia de la roca sello y así mismo la seguridad del almacenamiento, las propiedades más relevantes a tener en cuenta son las siguientes:

4.1.1. Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad de la roca para permitir el flujo de fluidos a través de sus poros. Una roca sello efectiva debe tener una permeabilidad extremadamente baja, idealmente en el rango de microdarcy (μD) o nanodarcy (nD). Esto asegura que el CO₂ no pueda fluir a través de la roca, incluso bajo altas presiones (Orlic et al., 2011). Otro punto para analizar y que sería ideal para la roca sello es que esté libre de fracturas ya que se crearían vías

preferenciales que pueden actuar como canales de flujo para el CO₂ y así mismo migrar hacia zonas no deseadas.

Estudios recientes han demostrado que la permeabilidad de la roca sello puede verse afectada por la presencia de microfracturas y la interacción química entre el CO₂ y los minerales de la roca. Por ejemplo, en un estudio realizado por Zhang et al. (2019), se observó que la exposición prolongada al CO₂ supercrítico puede generar microfracturas en ciertos tipos de rocas, lo que aumenta su permeabilidad y compromete su capacidad de sellado. Por lo tanto, es esencial evaluar la estabilidad mecánica y química de la roca sello bajo condiciones de almacenamiento de CO₂ a largo plazo.

4.1.2. Porosidad

La porosidad es el volumen de espacio vacío en la roca. Si bien se necesita cierta porosidad para el almacenamiento, una porosidad excesiva puede comprometer la capacidad de sellado de la roca. Una roca sello ideal tiene una porosidad total baja, generalmente inferior al 10%, y una porosidad efectiva cercana a cero, ya que los poros interconectados permitirían el flujo de CO₂. La distribución de poros debe ser homogénea para evitar vías preferenciales de migración (Orlic et al., 2011).

En un estudio realizado por Busch et al. (2008), se analizó la porosidad de diferentes tipos de rocas sellos, incluyendo arcillas y lutitas. Los resultados mostraron que las rocas con una porosidad efectiva inferior al 5% presentaban una mayor capacidad de confinamiento del CO₂. Además, se observó que la compactación natural de las rocas a lo largo del tiempo puede reducir aún más la porosidad, mejorando su capacidad de sellado.

4.1.3. Presión capilar de entrada

La presión de entrada es la presión mínima requerida para que un fluido, como el CO₂, ingrese a la roca, en cuanto a la roca almacén la presión de inyección debe ser mayor que la presión capilar de entrada pero para el sello ocurre lo contrario, ya que una roca sello con una

alta presión de entrada es más efectiva para evitar que el CO₂ se desplace hacia zonas no deseadas. Esta presión debe ser estable bajo las condiciones dinámicas de inyección y almacenamiento, y debe ser compatible con los fluidos presentes (CO₂ y agua) para evitar interacciones químicas que afecten su capacidad de sellado (Orlic et al., 2011).

En un estudio realizado por Hildenbrand et al. (2002), se evaluó la presión de entrada de diferentes tipos de rocas sellos bajo condiciones de almacenamiento de CO₂. Los resultados mostraron que las rocas con una alta presión de entrada, como las lutitas y las arcillas, son más efectivas para confinar el CO₂. Sin embargo, se observó que la presión de entrada puede disminuir con el tiempo debido a la degradación química de los minerales de la roca, lo que resalta la importancia de seleccionar rocas con una composición mineralógica estable.

4.1.4. Mojabilidad

La mojabilidad es la tendencia de un fluido a adherirse a la superficie de la roca. Una roca sello ideal para el almacenamiento de CO₂ debe ser mojable por agua, lo que significa que el agua tiene mayor afinidad por la superficie de la roca que el CO₂. Esto genera fuerzas capilares que ayudan a retener el CO₂ en los poros, actuando como una barrera adicional contra su migración (Orlic et al., 2011).

En un estudio reciente realizado por Iglauer et al. (2015), se investigó la mojabilidad de diferentes tipos de rocas sellos en presencia de CO₂ supercrítico. Los resultados mostraron que las rocas con una alta mojabilidad por agua, como las arcillas y las lutitas, presentaban una mayor capacidad de confinamiento del CO₂. Sin embargo, se observó que la mojabilidad puede verse afectada por la presencia de minerales orgánicos y la temperatura, lo que resalta la necesidad de realizar estudios específicos para cada tipo de roca.

4.1.5. Espesor y continuidad lateral

El espesor de la roca sello debe ser suficiente para garantizar un sellado adecuado, generalmente superior a 20-30 metros. Además, la roca sello debe tener una continuidad lateral

que cubra toda el área del reservorio, evitando huecos o interrupciones que permitan la migración del CO₂ (Orlic et al., 2011).

En un estudio realizado por Chadwick et al. (2008), se evaluó la continuidad lateral de diferentes tipos de rocas sellos en varios sitios de almacenamiento de CO₂. Los resultados mostraron que las rocas con una continuidad lateral uniforme, como las lutitas y las arcillas, son más efectivas para confinar el CO₂. Sin embargo, se observó que la presencia de fallas geológicas y pliegues puede comprometer la continuidad lateral de la roca sello, lo que resalta la importancia de realizar estudios geológicos detallados antes de la inyección de CO₂.

4.2 Propiedades mineralógicas de la roca sello

La composición mineralógica de la roca sello constituye un factor determinante en su capacidad de confinamiento a largo plazo. Según Gunter et al. (1997), la presencia de ciertos filosilicatos, como las arcillas del grupo de las esmectitas, puede resultar beneficiosa debido a su potencial de expansión mecánica al interactuar con el fluido inyectado, lo que contribuye a la reducción de la porosidad y al autosellado de microfracturas.

4.2.1 *Minerales arcillosos*

Las arcillas, como la illita y la clorita, son beneficiosas debido a su capacidad de hinchamiento al entrar en contacto con fluidos, lo que ayuda a sellar poros y fracturas. La presencia de arcillas en una roca sello contribuye a su baja permeabilidad general (Orlic et al., 2011). Sin embargo, es importante que la roca sello no contenga minerales reactivos que puedan generar cambios en la porosidad, permeabilidad o resistencia mecánica (Kaszuba et al., 2013).

En un estudio realizado por Gaus et al. (2005), se investigó la interacción entre el CO₂ y los minerales arcillosos en rocas sellos. Los resultados mostraron que la presencia de arcillas, como la montmorillonita, puede mejorar la capacidad de sellado de la roca debido a su capacidad de hinchamiento. Sin embargo, se observó que la degradación química de las arcillas

puede generar cambios en la porosidad y permeabilidad de la roca, lo que resalta la importancia de seleccionar arcillas con una alta estabilidad química.

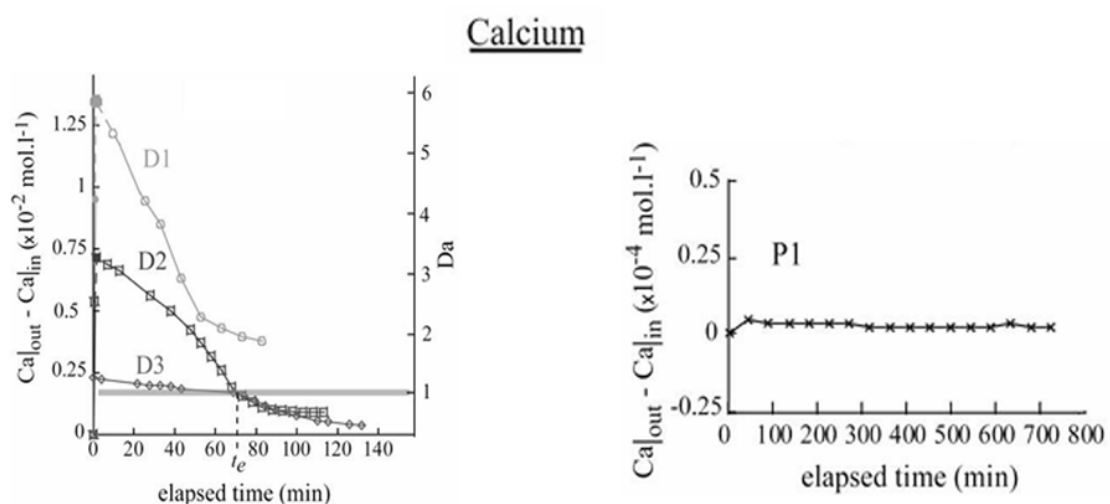
4.2.2 *Minerales inertes*

Los minerales inertes, como el cuarzo y los feldespatos, no reaccionan con el CO₂ y contribuyen a la estabilidad química de la roca sello. La presencia de estos minerales asegura que la roca no experimente cambios químicos significativos a largo plazo debido a su interacción con el CO₂ (Orlic et al., 2011).

En un estudio realizado por Luquot et al. (2014), se evaluó la estabilidad química de diferentes tipos de rocas sellos en presencia de CO₂. Los resultados mostraron que las rocas con una alta proporción de minerales inertes, como el cuarzo y los feldespatos, presentaban una mayor estabilidad química y una menor degradación a largo plazo. Sin embargo, se observó que la presencia de minerales reactivos, como la calcita, puede generar cambios en la porosidad y permeabilidad de la roca, lo que resalta la importancia de seleccionar rocas con una composición mineralógica estable.

Figura 2.

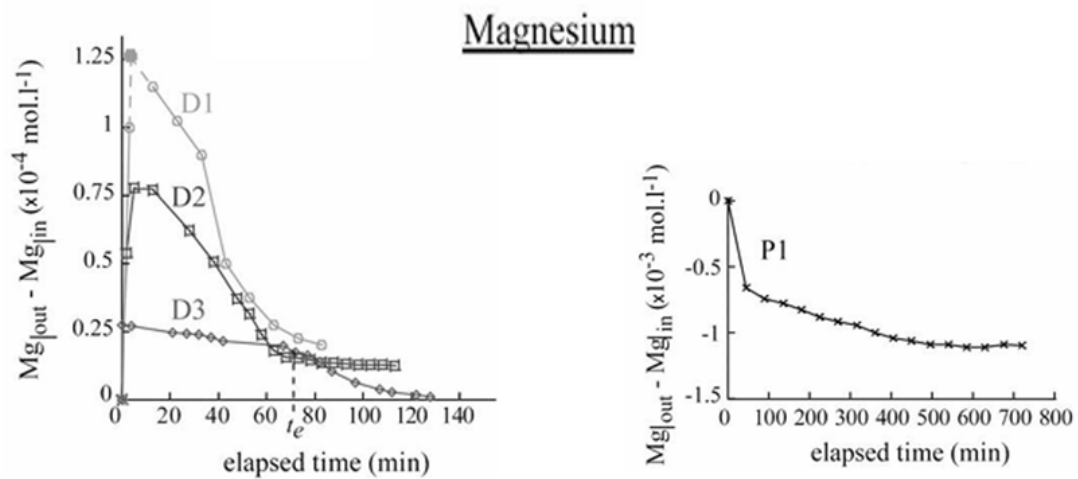
Estabilidad química del calcio ante la presencia de CO₂



Tomado de: Experimental determination of porosity and permeability changes induced by injection of CO₂ into carbonate rocks.

Figura 3.

Estabilidad química del magnesio ante la presencia de CO₂



Tomado de: Experimental determination of porosity and permeability changes induced by injection of CO₂ into carbonate rocks.

4.2.3 *Minerales reactivos*

La estabilidad de la roca sello está intrínsecamente ligada a su composición mineralógica, clasificándose los minerales en reactivos o inertes según su interacción con el fluido inyectado. Los minerales reactivos son aquellos capaces de alterar su estructura mediante procesos de disolución o precipitación al entrar en contacto con el CO₂. En condiciones de almacenamiento profundo (profundidades > 800 m, presiones > 7,38 MPa y temperaturas > 31,1 °C), el dióxido de carbono se disuelve en la salmuera de formación generando ácido carbónico (H₂CO₃), lo que reduce el pH del sistema a niveles ácidos entre 3 y 5 (Kaszuba et al., 2003). Bajo este escenario, los carbonatos como la calcita y la dolomita presentan una cinética de reacción rápida, disolviéndose de forma inmediata y pudiendo generar canales de alta transmisividad o *wormholes* que comprometen la integridad del sello (Luquot et al., 2014).

Las reacciones entre los minerales reactivos y el CO₂ pueden generar cambios en la roca sello que faciliten la migración del CO₂ y aumenten el riesgo de fugas. Por ejemplo, la disolución de ciertos minerales puede aumentar la porosidad y permeabilidad de la roca, mientras que la precipitación de nuevas fases minerales puede fracturar la roca.

Si la roca sello pierde su capacidad de sellado debido a la presencia de minerales reactivos, el CO₂ puede migrar hacia la superficie o hacia otras formaciones geológicas no deseadas, lo que representa un riesgo para el medio ambiente y la salud humana.

4.3 Propiedades geomecánicas

La evaluación geomecánica constituye un componente fundamental en el análisis de sistemas de almacenamiento geológico de CO₂, debido a que la inyección del fluido genera incrementos en la presión de poro que modifican el estado de esfuerzos del reservorio y de la roca sello. El aumento de la presión de poro reduce el esfuerzo efectivo del medio rocoso, lo que puede inducir deformaciones, fracturamiento hidráulico o la reactivación de fallas y fracturas preexistentes, comprometiendo la integridad del sistema de confinamiento (IPCC, 2005).

Por esto la estabilidad mecánica de la roca sello es un factor crítico para garantizar el almacenamiento seguro a largo plazo. A diferencia de los sistemas naturales de hidrocarburos, donde las condiciones de presión se encuentran en equilibrio, el almacenamiento de CO₂ implica un incremento artificial y sostenido de presión, lo que introduce un comportamiento dinámico en la respuesta del sistema. Si las condiciones operativas superan la capacidad resistente del sello, pueden generarse discontinuidades que actúen como vías preferenciales para la migración del CO₂.

4.3.1 Presión de fractura

La presión de fractura corresponde al valor máximo de presión que puede soportar la formación antes de que se generen fracturas hidráulicas. Este parámetro define el límite superior de la presión de inyección y constituye uno de los criterios más importantes para la seguridad operativa del sistema. Al tener una presión de fractura alta garantiza que la presión de inyección se mantenga dentro de una ventana operativa segura y se evite la generación de fracturas hidráulicas que incrementen la permeabilidad del sello. Es importante tener en

cuenta que la presión de fractura debe ser mayor que la presión de inyección y estar en constante monitoreo para que la presión no vaya a sobrepasar dicha presión de fractura.

4.3.2 Compresibilidad

La compresibilidad es la capacidad de una roca para reducir su volumen en respuesta a un aumento de presión. Una roca sello con baja compresibilidad es más resistente a los cambios de presión y volumen asociados con la inyección de CO₂. Esto ayuda a mantener la integridad de la roca y a prevenir fracturas que puedan permitir fugas de CO₂ (Orlic et al., 2011).

En un estudio realizado por Rutqvist et al. (2008), se evaluó la compresibilidad de diferentes tipos de rocas sellos bajo condiciones de almacenamiento de CO₂. Los resultados mostraron que las rocas con baja compresibilidad, como las lutitas y las arcillas, son más efectivas para mantener su integridad bajo altas presiones. Sin embargo, se observó que la compresibilidad puede aumentar con el tiempo debido a la degradación mecánica de la roca, lo que resalta la importancia de seleccionar rocas con una alta resistencia mecánica.

4.3.3 Propiedades elásticas

Las propiedades elásticas, representadas por el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, también desempeñan un papel importante en la respuesta mecánica del material. un módulo de Young moderado a alto indica una mayor rigidez y capacidad de soportar esfuerzos sin deformaciones excesivas. Por su parte, valores moderados de la relación de Poisson favorecen una respuesta mecánica estable y reducen la posibilidad de redistribuciones de esfuerzos que puedan inducir falla.

En general, se busca un comportamiento dúctil o semidúctil, que permita la redistribución de esfuerzos sin desarrollar fallas frágiles, favoreciendo la estabilidad del sistema ante variaciones de presión.

4.3.4 Resistencia mecánica

La resistencia mecánica describe la capacidad de la roca para soportar esfuerzos sin experimentar falla estructural. Se evalúa comúnmente a partir de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), así como de los parámetros de resistencia al corte, como la cohesión y el ángulo de fricción.

Una resistencia mecánica moderada a alta es una condición favorable en rocas sello, ya que disminuye la probabilidad de fracturamiento frágil y limita la apertura de discontinuidades naturales que podrían actuar como vías de migración del CO₂ (Zoback, 2007).

4.3.5 Estabilidad estructural

El análisis geomecánico debe considerar la estabilidad estructural del entorno geológico, ya que el incremento de la presión de poro puede reducir el esfuerzo efectivo sobre planos de debilidad y favorecer la reactivación de fallas o fracturas naturales, generando posibles trayectorias de migración para el CO₂.

Por esta razón, es fundamental evaluar la orientación, continuidad y estado de esfuerzo de estas estructuras, ya que su reactivación constituye uno de los principales mecanismos potenciales de fuga en proyectos de almacenamiento geológico de CO₂ (Rutqvist, 2012).

4.4 Interacción CO₂ - roca y efectos a largo plazo

La inyección de CO₂ en formaciones geológicas rompe el equilibrio termodinámico del sistema roca-fluido, induciendo alteraciones en las propiedades petrofísicas y mineralógicas de la roca sello que son críticas para la seguridad del almacenamiento (Kaszuba et al., 2013). Estas interacciones se dividen principalmente en:

- Alteraciones Mineralógicas: Tras la inyección, el CO₂ se disuelve en el agua de formación creando ácido carbónico (H₂CO₃), lo cual reduce el pH y activa reacciones

de disolución y precipitación. Autores como Gaus (2010) documentan que minerales reactivos como los carbonatos (calcita y dolomita) se disuelven rápidamente, mientras que silicatos como los feldespatos pueden sufrir alteraciones a largo plazo, dando lugar a la precipitación de minerales secundarios como caolinita y carbonatos de hierro (siderita).

- Cambios en la porosidad y permeabilidad: Algunas reacciones pueden disolver minerales y aumentar la porosidad y permeabilidad de la roca, lo que facilitaría la migración del CO₂. Otras reacciones pueden precipitar minerales y reducir la porosidad y permeabilidad, lo que podría ser beneficioso o perjudicial dependiendo del caso (Kaszuba et al., 2013).
- Compromiso de la integridad: Las reacciones entre el CO₂ y la roca pueden generar cambios en la resistencia mecánica de la roca sello, haciéndola más susceptible a fracturas o fallas (Rutqvist et al., 2008).
- Riesgo de fugas: Si la interacción CO₂-roca genera cambios que comprometen la capacidad de sellado de la roca, el CO₂ puede migrar hacia la superficie o hacia otras formaciones geológicas no deseadas (Orlic et al., 2011).

5. Estudios a nivel mundial que caracterizan la interacción entre el CO₂ y la roca sello.

El estudio para una roca sello adecuada es fundamental para el éxito de un proyecto de almacenamiento de CO₂, ya que debe garantizar la contención del gas a largo plazo y evitar fugas hacia acuíferos y a la superficie. En este sentido, la caracterización detallada de las propiedades petrofísicas y mineralógicas de la roca es esencial para evaluar su capacidad y eficiencia para el proceso.

El CO₂ puede interactuar con los minerales que componen la roca sello y generar cambios que afecten su capacidad de sellado. Estas interacciones pueden ocurrir a través de diversas reacciones químicas que pueden afectar su capacidad de sellado. Es crucial comprender estas interacciones y estudiar sus efectos a largo plazo para garantizar la seguridad y eficacia del almacenamiento geológico de CO₂.

Estas interacciones se pueden presentar como:

- **Disolución de minerales:** El CO₂ en fase supercrítica o disuelto en salmuera reacciona principalmente con carbonatos (calcita, dolomita) y ciertos silicatos inestables (feldespatos). Este proceso incrementa la porosidad y permeabilidad de la roca, facilitando potencialmente la migración del gas (Luquot et al., 2014; Espinoza & Santamarina, 2012).
- **Precipitación de minerales:** Bajo condiciones de saturación, el CO₂ puede precipitar en forma de carbonatos secundarios (como siderita o magnesita). Este mecanismo es considerado el más seguro, ya que reduce la porosidad y la permeabilidad, fortaleciendo la capacidad de sellado a largo plazo (Gunter et al., 2000; Bachu et al., 2007).
- **Alteración de minerales:** La interacción del fluido ácido puede modificar la estructura de los filosilicatos. Mientras que algunas arcillas pueden expandirse y sellar microfracturas, otras pueden sufrir alteraciones químicas que afectan su plasticidad y, por ende, su competencia geomecánica (Armitage et al., 2011; Rochelle et al., 2004).
- **Cambios en el pH:** La formación de ácido carbónico disminuye el pH del agua de formación a rangos de 3.0 - 5.0. Este cambio es el motor termodinámico que dispara las reacciones de disolución y precipitación mencionadas anteriormente (Kaszuba et al., 2003).

A continuación, se define información analizada de proyectos existentes de almacenamiento geológicos a nivel mundial llevados a cabo con éxito, con el fin de recopilar

datos necesarios para conocer las interacciones de la roca con el gas y a su vez identificar cuáles son las condiciones necesarias para el almacenamiento del CO₂.

5.1 Sleipner (Mar del Norte, Noruega)

El proyecto de almacenamiento de CO₂ en Sleipner es el referente global de inyección en acuíferos salinos profundos (Formación Utsira). La integridad del sistema depende de las lutitas del Grupo Cromer Knoll principalmente de la formación Nordland, que actúan como el sello regional primario (Torp & Gale, 2003).

5.1.1 Composición mineral

De acuerdo con la caracterización geoquímica del sello en el proyecto Sleipner, la mineralogía se divide en:

- **Minerales Principales:** La matriz está dominada por cuarzo y feldespatos, que proporcionan la estabilidad mecánica de la roca, junto con una fracción significativa de illita y esmectita que definen el comportamiento de la matriz fina (Holloway, 1996).
- **Minerales Accesorios:** Se identifica una presencia menor de caolinita y otros componentes minoritarios que completan la estructura de la lutita sin alterar significativamente su reactividad global (Holloway, 1996).

5.1.2 Contenido de arcillas

El comportamiento hidro-mecánico del Grupo Cromer Knoll depende directamente de su fracción arcillosa:

- **Contenido de Arcilla:** Las lutitas presentan un alto contenido de filosilicatos, con una variación de entre el 40% y 60% en peso, lo que garantiza una baja permeabilidad de matriz (Holloway, 1996).
- **Tipo de Arcilla:** Predominan la illita y la esmectita. La relevancia de esta última radica en su capacidad de hinchamiento al interactuar con fluidos de formación, mecanismo

que favorece el auto-sellado (*self-sealing*) de micro-fracturas y reduce la permeabilidad efectiva del sistema (Chadwick et al., 2004).

5.1.3 *Minerales reactivos*

La estabilidad geoquímica del sello frente a la inyección de CO₂ es un factor determinante para la seguridad del proyecto a largo plazo. En el caso de Sleipner, el comportamiento de los minerales reactivos se define de la siguiente manera:

- **Baja Reactividad General:** Bajo las condiciones termodinámicas del yacimiento (35-40 °C y 8-10 MPa), las lutitas del Grupo Cromer Knoll presentan una alta estabilidad química, lo que minimiza la degradación de la roca sello (Rochelle et al., 2004).
- **Cinética de Disolución de Calcita:** Se ha identificado que la fracción menor de calcita puede experimentar una disolución ligera al interactuar con la salmuera acidificada por el CO₂. Sin embargo, este proceso se considera marginal y no representa un riesgo para la presión de entrada capilar ni para la integridad estructural del sello (Rochelle et al., 2004).
- **Consideraciones a largo plazo:** En escalas de tiempo geológicas, la oxidación de la pirita podría generar trazas de ácido sulfúrico; no obstante, la alta capacidad de neutralización o efecto *buffering* de los minerales arcillosos presentes limita cualquier impacto negativo sobre la porosidad (Rochelle et al., 2004).

5.1.4 *Espesor y extensión lateral:*

El sello presenta un espesor robusto que oscila entre los 200 y 300 metros, actuando como una barrera mecánica competente contra la migración vertical del CO₂. Esta unidad posee una continuidad regional de escala kilométrica en el Mar del Norte, asegurando el confinamiento a nivel de cuenca (Bachu et al., 1994; Zweigel et al., 2004).

5.1.5 Integridad estructural

Propiedades Petrofísicas: La roca posee una permeabilidad de matriz extremadamente baja, en el rango de los nanodarcies 10^{-18} a $10^{-19}m^2$. Esta característica, sumada a una elevada presión de entrada capilar, impide que el gas desplace la salmuera residente, manteniendo la integridad del sello (Zweigle et al., 2004).

Continuidad Estructural: No se han reportado fallas mayores que comprometan la unidad en el área de inyección. Aunque existen micro-fracturas inherentes a la litología, la presencia de esmectita facilita procesos de auto-sellado, preservando la baja transmisividad del sistema (Chadwick et al., 2004).

Monitoreo de Integridad: La seguridad del almacenamiento se verifica mediante sísmica de reflexión 4D (time-lapse), técnica que ha permitido mapear la expansión de la pluma de CO₂ y confirmar que no existen fugas a través de la roca sello (Chadwick et al., 2009).

5.1.6 Condiciones de presión y temperatura

La eficiencia del almacenamiento en el proyecto Sleipner está condicionada por el entorno de presión y temperatura del reservorio, lo cual determina la fase del fluido inyectado:

- Marco de Profundidad: La Formación Utsira se localiza a una profundidad de entre 800 y 1000 metros bajo el nivel del mar, lo que proporciona la carga hidrostática necesaria para mantener el gas confinado (IPCC, 2005).
- Presión y Temperatura: El reservorio mantiene una presión de aproximadamente 8 a 10 MPa (80-100 bar) y una temperatura estimada entre 35 y 40 °C. Estas condiciones superan el punto crítico del CO₂ ($P_c = 7.38$ MPa y $T_c = 31.1$ °C).
- Estado Supercrítico: Debido al gradiente geotérmico y bórico, el CO₂ se encuentra en estado supercrítico. En esta fase, el fluido posee una densidad similar a la de un líquido (optimizando el volumen de almacenamiento) y una viscosidad baja similar a la de un

gas (facilitando su inyektividad en el acuífero), lo que representa el escenario más eficiente para el almacenamiento geológico (IPCC, 2005).

5.2 Snøhvit (Mar de Barents, Noruega)

El proyecto Snøhvit representa un hito en el almacenamiento de CO₂ en condiciones árticas. La inyección se realiza en la Formación Tubåen, utilizando como barrera de confinamiento principal las lutitas del Grupo Hekkingen (Jurásico Superior - Cretácico Inferior), reconocidas por su excelente capacidad de sello (Maldal & Tappel, 2004).

5.2.1 Composición mineral

La caracterización del Grupo Hekkingen revela una matriz compleja diseñada para el confinamiento:

- **Minerales Principales:** Dominada por cuarzo y feldespatos (plagioclasa y feldespato potásico), junto con una alta carga de materia orgánica característica de este intervalo estratigráfico. La fracción fina está compuesta principalmente por illita y esmectita (Maldal & Tappel, 2004).
- **Minerales Accesorios:** Presencia de pirita, calcita, dolomita y siderita, además de otros minerales traza que influyen en el equilibrio geoquímico (Maldal & Tappel, 2004).

5.2.2 Contenido de arcillas

Contenido de Arcilla: Se caracteriza por un contenido volumétrico que generalmente supera el 50% en peso, lo que garantiza una tortuosidad elevada y baja permeabilidad (Hansen et al., 2013).

Tipo de Arcilla: La illita es la fase dominante, proporcionando estabilidad, mientras que la esmectita actúa como un agente de auto-sellado. La capacidad de hinchamiento de la esmectita al contacto con fluidos de formación es crucial para la reducción de la permeabilidad secundaria y el cierre de micro-fracturas (Hansen et al., 2013).

5.2.3 *Minerales reactivos*

Reactividad General: El sistema presenta una alta estabilidad química bajo las condiciones de inyección. La interacción de la pirita con el CO₂ y el agua podría generar trazas de ácido sulfúrico; sin embargo, este es neutralizado por la presencia de carbonatos (calcita y dolomita) y por la capacidad de intercambio catiónico de las arcillas (Maldal & Tappel, 2004).

Consideraciones a Largo Plazo: Aunque el riesgo de fuga por disolución es bajo en estos sistemas dominados por silicatos, la presencia de feldespatos reactivos exige un monitoreo continuo para prevenir la degradación de la presión de entrada capilar a escalas de tiempo geológicas (Armitage et al., 2011).

5.2.4 *Espesor y extensión lateral*

La eficacia del Grupo Hekkingen como barrera de confinamiento se sustenta en sus dimensiones regionales y sus propiedades geomecánicas superiores:

- **Espesor y Extensión Lateral:** La unidad presenta un espesor robusto que oscila entre 100 y 300 metros en el área del proyecto, lo que constituye una barrera física de gran magnitud contra la migración vertical. Su continuidad lateral abarca gran parte de la cuenca del Mar de Barents, garantizando un confinamiento a escala regional (Maldal & Tappel, 2004).
- **Propiedades Petrofísicas:** Las lutitas poseen una permeabilidad extremadamente reducida, situada en el rango de los nanodarcies (10^{-18} a $10^{-19}m^2$). Esta baja transmisividad, sumada a una elevada presión de entrada capilar, asegura que el CO₂ no pueda desplazar la fase acuosa a través de la matriz del sello (Hansen et al., 2013).
- **Fallas y Esfuerzos:** Aunque la cuenca del Mar de Barents presenta sistemas de fallas, estudios geofísicos detallados han confirmado que estas no actúan como vías de fuga en el área de inyección. La integridad se ve favorecida por el grado de compactación de

las lutitas y regímenes de sobrepresión que refuerzan la capacidad de cierre del sistema (Maldal & Tappel, 2004).

5.2.5 Integridad estructural

La competencia del Grupo Hekkingen como barrera de confinamiento ha sido evaluada mediante estudios petrofísicos y de monitoreo geofísico, destacando los siguientes aspectos:

- **Propiedades de Flujo:** Esta configuración de baja permeabilidad, combinada con una elevada presión de entrada capilar, constituye el principal mecanismo de retención del sistema. Dicha presión asegura que el CO₂ inyectado sea incapaz de desplazar la fase acuosa residente en los poros, manteniendo la integridad del sello hidráulico y garantizando que el gas permanezca confinado bajo la base del Grupo Hekkingen sin migrar hacia unidades superiores (Maldal & Tappel, 2004)."
- **Fallas y Continuidad:** A pesar de la complejidad tectónica del Mar de Barents, los modelos sísmicos y geológicos han confirmado que las fallas presentes en la región no actúan como vías de transmisividad vertical. La integridad del sello se ha mantenido estable incluso ante los ciclos de inyección, sin evidencias de reactivación de fracturas (Hansen et al., 2013).
- **Compactación y Regímenes de Presión:** El alto grado de compactación de las lutitas y la presencia de condiciones de sobrepresión en el yacimiento refuerzan la capacidad de confinamiento. Estos factores geomecánicos incrementan el esfuerzo de cierre de la roca, reduciendo el riesgo de micro-fracturamiento inducido por la presión de inyección (Chiaramonte et al., 2015).

5.2.6 Condiciones de presión y temperatura

El entorno operativo del proyecto Snøhvit se caracteriza por condiciones de alta energía, lo que define el comportamiento del fluido inyectado:

- Marco de Profundidad: La Formación Tubåen se localiza a una profundidad considerable, entre los 2500 y 2700 metros bajo el nivel del mar, lo que implica una columna litostática y una presión de confinamiento muy superiores a otros proyectos de almacenamiento (Maldal & Tappel, 2004).
- Presión y Temperatura: El reservorio opera bajo una presión estimada de 25 a 27 MPa (250-270 bar) y temperaturas elevadas de entre 90 y 100 °C. Estas condiciones se encuentran muy por encima del punto crítico del CO₂ (IPCC, 2005).
- Estado del CO₂: Debido a la magnitud de la presión y la temperatura a estas profundidades, el CO₂ se encuentra en un estado supercrítico denso. Esta condición es altamente favorable, ya que maximiza la densidad del fluido y, por ende, optimiza la eficiencia del almacenamiento al permitir una mayor masa de gas por unidad de volumen poral disponible en el reservorio (Hansen et al., 2013).

5.3 In Salah (Argelia)

El proyecto In Salah destaca por ser uno de los pioneros en la inyección de CO₂ en reservorios de gas natural empobrecidos (Formación Carbonífera). A diferencia de los casos de Sleipner y Snøhvit, la integridad del sistema depende de un sello compuesto por una secuencia de capas de evaporitas intercaladas con lutitas, lo que otorga propiedades de confinamiento únicas (White et al., 2014).

5.3.1 Composición mineral

La naturaleza del sello en In Salah presenta una mineralogía diversa debido a su origen sedimentario mixto:

- Minerales Principales: Presencia predominante de anhidrita (CaSO₄) y halita (NaCl), junto con cuarzo y una matriz arcillosa compuesta por illita y caolinita (White et al., 2014).

- **Minerales Accesorios:** Se identifican trazas de calcita y dolomita, además de yeso en las zonas más someras o cercanas a la superficie (White et al., 2014).

5.3.2 Contenido de arcillas

Contenido de Arcilla: La distribución es heterogénea; mientras que los intervalos de lutitas poseen una carga significativa de filosilicatos, las capas evaporíticas presentan un contenido nulo o despreciable.

Tipo de Arcilla: Los filosilicatos dominantes son la illita y la caolinita. Cabe destacar que la esmectita es generalmente escasa o está ausente en los niveles profundos, debido a que las altas temperaturas y la elevada salinidad del entorno favorecen la diagénesis hacia fases arcillosas más estables (White et al., 2014).

5.3.3 Minerales reactivos

- **Inercia de las Evaporitas:** La anhidrita y la halita se comportan como minerales altamente inertes bajo las condiciones de presión y temperatura del yacimiento, lo que garantiza una estabilidad geoquímica superior a largo plazo frente al contacto con el CO₂ (White et al., 2014).
- **Dinámica de Disolución:** Aunque existe la posibilidad teórica de disolución de la anhidrita para formar yeso ante la presencia de agua y CO₂, la cinética de este proceso es extremadamente lenta y no compromete la capacidad de sellado en las condiciones operativas de In Salah.
- **Comportamiento de las Lutitas:** En los niveles arcillosos, las reacciones son similares a las de otros proyectos industriales, aunque con una capacidad de auto-sellado (hinchamiento) más limitada debido a la baja proporción de esmectita (White et al., 2014).

5.3.4 Espesor y extensión lateral

El sello está constituido por una secuencia interestratificada de evaporitas y lutitas de espesor variable. A pesar de que las láminas individuales pueden ser delgadas, su continuidad lateral a escala de cuenca garantiza un confinamiento regional robusto y una barrera impermeable continua (White et al., 2014).

5.3.5 Integridad estructural

- **Propiedades de Flujo:** Las evaporitas, particularmente la halita, presentan una permeabilidad extremadamente baja, alcanzando órdenes de magnitud de $10^{-20}m^2$ o inferiores. Esta característica, sumada a una presión de entrada capilar excepcionalmente alta, impide cualquier comunicación hidrodinámica vertical del CO₂ (White et al., 2014).
- **Comportamiento Reológico:** La halita exhibe un comportamiento dúctil bajo condiciones de confinamiento, lo que le permite deformarse plásticamente en lugar de fracturarse. Esta propiedad es crítica para el auto-sellado de discontinuidades, manteniendo la integridad del sello ante esfuerzos tectónicos (White et al., 2014).
- **Geomecánica e Integridad Mecánica:** Durante la operación, se detectó un levantamiento del terreno mediante interferometría satelital (InSAR), atribuido a la expansión volumétrica del fluido y la deformación de las capas suprayacentes. Este fenómeno resalta la necesidad de considerar la respuesta mecánica del sello ante la presión de inyección para evitar fracturamiento hidráulico (White et al., 2014).

5.3.6 Condiciones de presión y temperatura

El estado físico del CO₂ en el subsuelo argelino está definido por un gradiente de presión y temperatura moderado:

- Marco de Profundidad: El reservorio de la Formación Carbonífera se sitúa a una profundidad operativa de entre 1800 y 2000 metros, proporcionando un sello litostático adecuado para el almacenamiento masivo (White et al., 2014).
- Régimen de Presión y Temperatura: El sistema mantiene una presión de reservorio de 18 a 20 MPa (180-200 bar) y una temperatura estable de entre 70 y 80 °C.
- Estado del CO₂: Bajo estos parámetros, el CO₂ se encuentra en estado supercrítico, lo que asegura una densidad óptima para el almacenamiento en reservorios de gas depletados y facilita su interacción con la matriz porosa (White et al., 2014).

5.4 Decatur (Illinois, EE. UU.)

El proyecto de almacenamiento de CO₂ en Decatur (IBDP) representa uno de los esfuerzos más significativos en reservorios continentales. La inyección se realiza en la Formación Mount Simon, utilizando como barrera de confinamiento principal las lutitas del Grupo Eau Claire (Cámbrico), las cuales presentan una mineralogía distinta a los casos del Mar del Norte (Gollakota & McDonald, 2014).

5.4.1 Composición mineral:

La caracterización del Grupo Eau Claire revela una matriz rica en silicatos y carbonatos:

- Minerales Principales: Dominada por cuarzo y feldespatos (albita y ortoclasa), con una fracción significativa de illita y clorita. A diferencia de otros proyectos, presenta un contenido notable de dolomita y calcita dentro de la matriz de la lutita (Gollakota & McDonald, 2014).
- Minerales Accesorios: Presencia de pirita, anhidrita/yeso, óxidos de hierro y minerales traza que participan en las interacciones geoquímicas (Finley, 2014).

5.4.2 Contenido de arcillas

Contenido de Arcilla: Las lutitas presentan un contenido moderado a alto, variando entre el 30% y 50% en peso, lo que asegura una baja permeabilidad de matriz.

Tipo de Arcilla: Las fases dominantes son la illita y la clorita. Es fundamental señalar que la esmectita es generalmente escasa o inexistente en esta formación; esta ausencia implica que el mecanismo de sellado no depende del hinchamiento mineral, sino de la tortuosidad y la baja conectividad poral de la matriz rica en illita (Gollakota & McDonald, 2014).

5.4.3 *Minerales reactivos*

- **Dinámica de los Carbonatos:** Debido a la presencia de calcita y dolomita, el sistema presenta una reactividad moderada. La acidificación por CO₂ favorece la disolución local de estos carbonatos; sin embargo, estudios de modelado sugieren que este efecto es limitado y no compromete la presión de entrada capilar del sello a largo plazo (Finley, 2014).
- **Oxidación de Pirita y Capacidad Tampón:** La posible generación de ácido sulfúrico por la oxidación de la pirita es neutralizada eficazmente por la reacción con los carbonatos y los feldespatos presentes, manteniendo el equilibrio químico del sistema (Gollakota & McDonald, 2014).

5.4.4 *Espesor y extensión lateral:*

La efectividad del confinamiento en el proyecto IBDP se fundamenta en la continuidad geológica y la capacidad de cierre capilar del Grupo Eau Claire. En la zona de Decatur, el sello presenta un espesor que varía entre 60 y 150 metros. Si bien esta potencia es menor en comparación con los sellos de Sleipner o Snøhvit, es suficiente para garantizar una barrera vertical efectiva debido a su amplia extensión lateral y continuidad regional en la Cuenca de Illinois (Gollakota & McDonald, 2014).

5.4.5 *Integridad estructural*

- **Propiedades Petrofísicas:** Las lutitas del Grupo Eau Claire poseen una permeabilidad que oscila entre los microdarcies y nanodarcies (10^{-15} a $10^{-18}m^2$). Aunque estos valores son ligeramente superiores a los registrados en proyectos marinos

noruegos, se consideran adecuados para el almacenamiento masivo al estar complementados con una elevada presión de entrada capilar que impide la migración del gas en fase supercrítica (Finley, 2014).

- **Mecanismos de Sellado:** Ante la ausencia de esmectita, el sellado no depende del hinchamiento mineral, sino de la baja permeabilidad intrínseca y la tortuosidad de la matriz. Además, la baja densidad de fallas en la región de Decatur, verificada mediante estudios geofísicos, asegura que no existen vías de transmisividad vertical que comprometan el proyecto (Finley, 2014).

5.4.6 Condiciones de presión y temperatura

- **Profundidad:** La Formación Mount Simon se localiza a una profundidad aproximada de 1500 a 1600 metros, lo que garantiza un entorno de presión confinada óptimo para el secuestro geológico (Gollakota & McDonald, 2014).
- **Presión y Temperatura:** El sistema mantiene una presión de reservorio de 15 a 16 MPa (150-160 bar) y temperaturas de entre 50 y 60 °C.
- **Estado del CO₂:** Bajo estas condiciones, el CO₂ se encuentra en estado supercrítico, lo que permite un almacenamiento eficiente al reducir el volumen ocupado por el fluido y mejorar su capacidad de desplazamiento en la arenisca porosa (IPCC, 2005).

5.5 Quest (Alberta, Canadá)

El proyecto Quest, operado por Shell, es un referente en la inyección de CO₂ en acuíferos salinos profundos. La inyección se realiza en la Formación Basal Cambrian (BCS), bajo el confinamiento de las lutitas del Supergrupo Rae (Grupo Precambrian), que actúan como la barrera de sello principal (Duong et al., 2019).

5.5.1 Composición mineral

Minerales Principales: Matriz dominada por cuarzo, moscovita (mica blanca) y feldespatos (albita y ortoclasa). Contiene proporciones variables de dolomita y calcita que influyen en la capacidad de neutralización del sistema (Duong et al., 2019).

Minerales Accesorios: Presencia característica de hematita, magnetita y otros óxidos de hierro, que confieren a las lutitas una coloración rojiza distintiva. También se identifica piritita en trazas (Rock et al., 2017).

5.5.2 Contenido de arcillas

Contenido de Arcilla: Las lutitas presentan un contenido de filosilicatos que varía entre el 30% y 60% en peso, proporcionando la tortuosidad necesaria para el sello.

Tipo de Arcilla: Predominan la illita y la clorita. Al igual que en el proyecto Decatur, la esmectita es generalmente baja o ausente. Esto implica que el mecanismo de sellado depende exclusivamente de la baja permeabilidad intrínseca y la presión de entrada capilar, prescindiendo del mecanismo de auto-sellado por hinchamiento mineral (Duong et al., 2019).

5.5.3 Minerales reactivos

Inercia Química y Limitación por Transporte: El sistema presenta una reactividad baja a moderada. Aunque los carbonatos (dolomita y calcita) son susceptibles de disolución ante el CO₂ acidificado, la extrema baja permeabilidad de la roca limita el flujo de fluidos reactivos, confinando cualquier cambio poroso a la interfase sello-reservorio (Rock et al., 2017).

Dinámica de la Piritita y Óxidos: La oxidación de la piritita es un proceso potencialmente relevante a escala geológica; sin embargo, la baja difusión de oxígeno y la capacidad tampón de los carbonatos presentes neutralizan la posible formación de ácido sulfúrico, preservando la integridad mineralógica (Duong et al., 2019).

5.5.4 Espesor y extensión lateral

La capacidad de almacenamiento masivo del proyecto Quest se apoya en la magnitud y estabilidad del sello precámbrico.

El Grupo Precambrian constituye una barrera excepcionalmente robusta, con espesores reportados que superan los 500 metros en diversas áreas de la zona de inyección. Su continuidad lateral a lo largo del Escudo Canadiense asegura un confinamiento regional de gran escala, minimizando riesgos de migración perimetral (Duong et al., 2019).

5.5.5 Integridad estructural

Propiedades Petrofísicas: La unidad presenta una permeabilidad baja, situada en el rango de los microdarcies a nanodarcies (10^{-15} a $10^{-18} m^2$). Estas propiedades están influenciadas por procesos históricos de compactación y metamorfismo, donde un mayor grado de alteración metamórfica ha resultado en una reducción drástica de la porosidad y permeabilidad intrínseca, favoreciendo una presión de entrada capilar elevada (Rock et al., 2017).

Discontinuidades: Debido a la compleja historia tectónica del basamento en Alberta, el monitoreo se centra en la caracterización de fallas y fracturas preexistentes. Los estudios geofísicos detallados son críticos para asegurar que estas estructuras permanezcan selladas y no se conviertan en vías de transmisividad vertical ante los esfuerzos inducidos por la inyección (Rock et al., 2017).

5.5.6 Condiciones de presión y temperatura

Las condiciones de fondo en la Cuenca de Alberta garantizan que el fluido se mantenga en una fase eficiente para el almacenamiento:

- Marco de Profundidad: El objetivo de inyección (Formación Basal Cambrian) se sitúa a una profundidad de entre 2000 y 2200 metros, lo que asegura un régimen de presión confinada superior al de proyectos como Sleipner o Decatur (Duong et al., 2019).

- Régimen de Presión y Temperatura: El sistema opera bajo una presión de reservorio de 20 a 22 MPa (200-220 bar) y temperaturas de entre 60 y 80 °C.
- Estado del CO₂: Bajo estos parámetros operativos, el CO₂ se mantiene de forma estable en estado supercrítico, optimizando la densidad de almacenamiento dentro de la arenisca salina profunda (IPCC, 2005).

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, en la siguiente tabla (tabla 1) se presenta un resumen de los estudios a nivel internacional que se analizaron.

Tabla 1

Resumen de estudios internacionales

	Detalle	Sleipner (Mar del Norte, Noruega)	Snøhvit (Mar de Barents, Noruega)	In Salah (Argelia)	Decatur (Illinois, EE. UU.)	Quest (Alberta, Canadá)
Permeabilidad	Extremadamente baja para prevenir migración	nD (nanodarcies, ~10 ⁻¹⁷ m ²)	nD (nanodarcies, ~10 ⁻¹⁸ m ²)	10 ⁻²⁰ m ² o menos (evaporitas)	μD-nD (micro- nanodarcies, ~10 ⁻¹⁵ -10 ⁻¹⁸ m ²)	μD-nD (micro- nanodarcies, ~10 ⁻¹⁵ -10 ⁻¹⁸ m ²)
Presión de entrada	Alta para evitar desplazamiento del agua por CO ₂	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Espesor	Gran espesor para mayor barrera	200-300 m (Grupo Cromer Knoll)	100-300 m (Grupo Hekkingen)	100m-950m (Formación Carbonífera)	60-150 m (Grupo Eau Claire)	>500 m en algunas áreas (Grupo Precambria)
Extensión Lateral	Amplia para confinamiento regional	Amplia	Amplia	Amplia	Amplia	Amplia
Arcillas	Baja permeabilidad, la esmectita proporciona sellado por hinchamiento	Illita, Esmectita (40-70%)	Illita, Esmectita (50-70%)	Illita, Caolinita (variable, principalmente en lutitas intercaladas)	Illita, Clorita (30-50%)	Illita, Clorita (30-60%)
Evaporitas	Permeabilidad extremadamente baja, alta Pe, comportamiento dúctil (halita)	Ausente	Ausente	Anhidrita, Halita	Ausente	Ausente
Carbonatos	Pueden influir en la reactividad (disolución/buffer)	Presentes	Presentes	Presentes	Presentes	Presentes

	Detalle	Sleipner (Mar del Norte, Noruega)	Snøhvit (Mar de Barents, Noruega)	In Salah (Argelia)	Decatur (Illinois, EE. UU.)	Quest (Alberta, Canadá)
Pirita	Potencial oxidación y generación de ácido	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente
Profundidad del Reservorio (m)	Determina P/T	~1000	~2500-2700	~1800-2000	~1500-1600	~2000-2200
Presión del Reservorio (bar)	Determina estado del CO ₂	~100	~250-270	~180-200	~150-160	~200-220
Estado del CO₂	Condiciona el comportamiento del fluido	Supercrítico	Supercrítico	Supercrítico	Supercrítico	Supercrítico

Nota: Los valores presentados corresponden a datos in-situ y reportes operativos de cada proyecto específico. Representan estándares de éxito (análogos) para la evaluación comparativa. **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de Ringrose et al. (2013), Michael et al. (2010) y Halland et al. (2014).

Desde una perspectiva de interacción roca-fluido, la competencia de una roca sello está definida por su composición mineralógica y su respuesta geoquímica ante el CO₂. Un elevado contenido de arcillas, especialmente de esmectita, favorece la estanqueidad mediante el hinchamiento mineral que reduce la permeabilidad de matriz (Hansen et al., 2013), mientras que la presencia de evaporitas como la halita resulta óptima debido a su permeabilidad prácticamente nula y su comportamiento reológico dúctil que facilita el auto-sellado de fracturas (Warren, 2016). En cuanto a la estabilidad química, aunque los carbonatos son susceptibles a la disolución, actúan como un sistema buffer que neutraliza la acidez del fluido, y minerales como la pirita no representan un riesgo crítico para la integridad del sello debido a que la baja permeabilidad del sistema limita la difusión de agentes reactivos (Rochelle et al., 2004).

A continuación, en la siguiente tabla (ver tabla 2) se resume y se caracteriza las propiedades petrofísicas y mineralógicas de mayor importancia para la roca sello antes y

después de la inyección y sus posibles alteraciones y reacciones tras el contacto con el CO₂ proporcionando una visión clara de las modificaciones inducidas esta inyección de CO₂.

Tabla 2.

Cambios en las propiedades antes y después de la inyección

Nombre del Proyecto	Roca Sello Principal	Porosidad y Permeabilidad Antes de la Inyección	Porosidad y Permeabilidad Después de la Inyección	Mineralogía Antes de la Inyección	Reacciones Químicas con CO ₂	Cambio en Mineralogía Después de la Inyección
<i>Sleipner</i>	Nordland Shale	Porosidad: 10 -15% Permeabilidad: 750-1500 nD	Ligera disminución de la porosidad prevista (alrededor del 3% en la base)	Cuarzo, mica, caolinita, feldespato, calcita, esmectita, clorita, pirita	Disolución de carbonatos, alteración de feldespatos y moscovita	Formación de siderita, dolomita, caolinita, calcedonia, feldespato potásico
<i>Snøhvit</i>	Grupo Hekkingen	Porosidad: ~5%, Permeabilidad 1 -100 mD	Reducción de permeabilidad por adsorción de CO ₂ y potencial hinchamiento de arcillas.	Lutita orgánica rica en Illita, Esmectita, Cuarzo y Feldespato	Interacción con agua de formación ácida; hidrólisis de silicatos	Posible precipitación de minerales arcillosos secundarios (caolinita) y carbonatos menores.
<i>In Salah</i>	Formación Carbonífera	Porosidad: ~15% Permeabilidad: ~10 mD	Aumento en la roca sello inferior por hidrofracturación	Arcilla (illita, clorita), cuarzo, carbonatos	Disolución de CO ₂ en salmuera	Disolución parcial de albita, clorita, illita y carbonatos, precipitación de boehmita, esmectita y sílice amorfa
<i>Decatur</i>	Formación Eau Claire	Porosidad: 2 -10% Permeabilidad: ~1 mD	Ligero aumento potencial de la porosidad (no significativo)	feldespato, rocas carbonatadas, illita, clorita	Disolución de feldespato potásico y anhidrita; precipitación de illita/esmectita y siderita	Ligera disolución de feldespato potásico y anhidrita; precipitación de illita/esmectita y siderita
<i>Quest</i>	Cámbrico Medio arenisca	Porosidad Promedio: 17% Permeabilidad: alrededor de 1000 mD (milidarcys)	Posible ligera disminución por precipitación cerca de interfaz (no significativo)	Arenisca de grano fino a grueso con intercalaciones lutáceas menores.	Disolución potencial de calcita y feldespatos	Precipitación de calcita en Middle Cambrian Shale

Nota: Los valores presentados corresponden a datos in-situ y reportes operativos de cada proyecto específico. Representan estándares de éxito (análogos) para la evaluación comparativa. **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de Ringrose et al. (2013), Michael et al. (2010) y Halland et al. (2014).

Diferentes tipos de yacimientos pueden tener las características necesarias para un posible almacenamiento de CO₂, pero cabe destacar que aunque el yacimiento cuente con ellas no será posible este proceso a menos que un factor indispensable como lo es la roca sello, se encuentre también en las condiciones ideales, y en general, un sello ideal combina baja permeabilidad, alta presión de entrada capilar, gran espesor y extensión, buena integridad mecánica, y una composición mineralógica con abundancia de arcillas o evaporitas, minimizando la presencia de minerales reactivos.

Como bien ha sido mencionado anteriormente, con el paso del tiempo la tecnología ha permitido desarrollar modelos predictivos que pueden simular la inyección del gas como también posibles efectos que pueden presentarse. A continuación, se describen modelos que abarcan esta función:

Modelos Geomecánicos-Hidráulicos (THM): Códigos como TOUGH-FLAC permiten simular el acoplamiento entre el flujo de fluidos y la respuesta mecánica de la roca, prediciendo riesgos de fracturamiento en el sello por cambios de presión (Rutqvist, 2011)

Modelos de Transporte Reactivo: Simuladores como TOUGHREACT y PHREEQC son fundamentales para modelar la cinética de las reacciones químicas entre la salmuera ácida y los minerales de la roca sello, cuantificando la disolución y precipitación mineral a través del tiempo (Xu et al., 2006).

Simuladores de Yacimientos de Composición: El uso de software comercial como ECLIPSE (E300) o CMG (GEM) permite modelar el comportamiento de fases del CO₂ y su interacción con los fluidos del yacimiento, facilitando el diseño de estrategias de inyección seguras (Bachu et al., 2007).

6 Metodología para la selección de la roca sello prospecto para la inyección y almacenamiento de CO₂

La selección de la roca sello prospecto es un factor determinante en la eficacia del almacenamiento geológico de dióxido de carbono (CO₂). Para evaluar la viabilidad de una roca sello en un yacimiento prospecto, es fundamental caracterizar sus propiedades petrofísicas, tanto como su composición mineralógica. Estos factores juegan un papel crucial en la capacidad de la roca para mantener su integridad durante el almacenamiento del CO₂ a largo plazo.

Con el fin de obtener la metodología de selección se definió acorde con la literatura especializada, las variables de mayor relevancia en la integridad y eficiencia de la roca sello en proyectos de almacenamiento geológico de CO₂ corresponden, en primer lugar, a la permeabilidad, ya que esta propiedad controla directamente la capacidad de la roca para impedir la migración del CO₂. En segundo término, la presión de entrada capilar representa un parámetro crítico debido a su papel fundamental en la retención del CO₂ dentro del reservorio y en la prevención de su ascenso a través del sello, siendo fuertemente influenciada por la mojabilidad esta última teniendo un valor significativo en lo que influye a la retención del gas, otro factor importante es la porosidad por su relación directa con la permeabilidad y su influencia sobre la respuesta mecánica de la roca frente a cambios de presión. Asimismo, el espesor de la roca sello es un factor determinante para garantizar la continuidad lateral y la seguridad del confinamiento a largo plazo. Adicionalmente, la composición mineralógica del sello resulta clave para evaluar la estabilidad geoquímica del sistema frente a la interacción entre el CO₂, el agua de formación y la matriz rocosa, mientras que la compresibilidad de la

roca influye en la seguridad operativa del proyecto debido al comportamiento geomecánica del sello durante la inyección del gas.

Este capítulo se centra en la caracterización de cada una de las propiedades petrofísicas y los principales minerales que comúnmente componen las rocas sello, su función en el proceso de sellado y las interacciones que pueden ocurrir con el CO₂; finalmente se concluye este capítulo con un diagrama de flujo donde se establecerá la ruta a seguir para una selección adecuada de la roca sello prospecto para este tipo de almacenamiento. cabe resaltar que estos Datos provienen de literatura científica, reportes técnicos y estudios previamente publicados ya que en este proyecto no se realizaron mediciones experimentales ni trabajo de campo.

6.1 Paso 1. Revisar la permeabilidad y su estimación

La permeabilidad es una de las propiedades más críticas de una roca sello, ya que determina su capacidad para impedir el flujo de fluidos. En el contexto del almacenamiento de CO₂, una roca sello efectiva debe tener una permeabilidad extremadamente baja.

- Valores estimados: La permeabilidad de una roca sello ideal debe estar en el rango de microdarcy (μD) o nanodarcy (nD). Estudios han demostrado que rocas sellos de arcilla pueden tener permeabilidades tan bajas como 0.01 μD (Zhang et al., 2019). En formaciones de sal (halita), la permeabilidad puede ser aún menor, cercana a 0.001 μD (Orlic et al., 2011).
- Implicaciones: Una permeabilidad baja asegura que el CO₂ no pueda migrar a través de la roca sello, incluso bajo altas presiones de inyección.

6.2 Paso 2. Revisar la presión capilar de entrada y su estimación

La presión de entrada es la presión mínima requerida para que el CO₂ ingrese a la roca, en cuanto a la roca almacenadora la presión capilar de entrada debe ser menor que la presión de inyección para que dicho gas pueda entrar a la formación, pero para la roca sello es todo lo

contrario, debe tener una presión capilar alta ya que esto es esencial para garantizar que el CO₂ no migre a través de la roca sello.

- Valores estimados: La presión de entrada en rocas sellos de arcilla puede superar los 10 MPa, mientras que en formaciones de sal puede ser aún mayor, alcanzando valores de 15-20 MPa (Orlic et al., 2011).
- Implicaciones: Una alta presión capilar de entrada en la roca sello asegura que el CO₂ permanezca confinado en el yacimiento, incluso bajo condiciones de alta presión.

6.3 Paso 3. Revisar la mojabilidad de la roca

La mojabilidad es la tendencia de un fluido a adherirse a la superficie de la roca. Una roca sello ideal para el almacenamiento de CO₂ debe ser mojada por agua, lo que genera fuerzas capilares y el CO₂ sería "rechazado" por el sistema poroso por así decirlo y necesitaría más presión de entrada para poder ingresar a la roca y esto favorece el confinamiento.

- Valores estimados: El ángulo de contacto entre el agua y la roca sello debe ser inferior a 90°, lo que indica una preferencia por la mojabilidad al agua. En rocas sellos de arcilla, este ángulo puede ser tan bajo como 30° (Zhang et al., 2019).
- Implicaciones: Una mojabilidad al agua favorece la retención del CO₂ en los poros, actuando como una barrera adicional contra su migración.

6.4 Paso 4. Revisar la porosidad y sus rangos.

La porosidad es el volumen de espacio vacío en la roca. Aunque cierta porosidad es necesaria en la roca almacenadora; en cuanto a la roca sello una porosidad excesiva puede comprometer la capacidad de sellado.

- Valores estimados: Una roca sello ideal debe tener una porosidad total baja, generalmente inferior al 10%, y una porosidad efectiva cercana a cero. En rocas sellos de arcilla, la porosidad efectiva puede ser inferior al 1% (Zhang et al., 2019).

- Implicaciones: Una porosidad baja y bien distribuida evita la formación de vías preferenciales para la migración del CO₂.

6.5 Paso 5. Revisar espesor y continuidad lateral

El espesor y la continuidad lateral de la roca sello son factores críticos para garantizar un sellado adecuado.

- Espesor estimado: El espesor mínimo para una roca sello efectiva se estima generalmente entre 20 y 30 metros en formaciones lutíticas para garantizar un confinamiento seguro (Orlic et al., 2011). Sin embargo, en formaciones de sal (evaporitas), las propiedades petrofísicas permiten escenarios distintos: debido a su permeabilidad casi nula ($< 10^{-20} m^2$) y un espesor de tan solo 5 a 10 metros de sal pura y continua podría ser teóricamente suficiente para actuar como barrera impermeable (Warren, 2016), por ende, un escenario favorable sería, buscar espesores de sal con una cantidad relevante de espesor para maximizar la integridad geomecánica del sistema a largo plazo.
- Continuidad Lateral: La roca sello debe poseer una extensión lateral ininterrumpida que cubra toda el área de influencia del reservorio. Es fundamental verificar la ausencia de acuñamientos, cambios de facies abruptos o "ventanas" estratigráficas que puedan actuar como puntos de fuga para el CO₂ acumulado (Bachu et al., 1994).
- Implicaciones en la Seguridad de Inyección: La combinación de un espesor robusto y una continuidad lateral adecuada permite que la unidad de confinamiento disipe y soporte las presiones dinámicas generadas durante la inyección. Esta configuración asegura que el sistema responda elásticamente a los cambios de presión de poro, evitando el fracturamiento hidráulico y garantizando la integridad del sello a largo plazo (Chadwick et al., 2004).

6.6 Paso 6. Análisis de los Parámetros de las propiedades geomecánicas

Para la selección y evaluación de una roca sello prospecto en proyectos de almacenamiento geológico de CO₂, es necesario cuantificar los principales parámetros geomecánicos que controlan su estabilidad frente a los incrementos de presión inducidos por la inyección. Estos parámetros permiten definir la ventana operativa del sistema y evaluar el riesgo de falla mecánica o pérdida de integridad.

6.6.1 Presión de fractura

El criterio operativo fundamental consiste en mantener la presión de inyección por debajo de la presión de fractura del sistema ($P_{iny} < P_{fractura}$).

- Valores estimados: 15 a 22 MPa/km (0.7–1.0 psi/ft). Este rango define el límite superior de presión admisible para evitar la generación de fracturas hidráulicas que puedan incrementar la permeabilidad del sello (Zoback, 2010).

6.6.2 Compresibilidad de la roca

La compresibilidad controla la magnitud de la deformación volumétrica inducida por los cambios de presión. Rocas sello adecuadas presentan baja compresibilidad.

- Valores estimados: 0.03 – 0.1 GPa⁻¹ Valores bajos permiten limitar la deformación del medio y reducir el riesgo de apertura de microfracturas o deterioro estructural durante la operación (Zhang et al., 2019).

6.6.3 Propiedades elásticas

Las propiedades elásticas determinan la respuesta del material frente a la redistribución de esfuerzos. Para lutitas y arcillolitas, los rangos típicos reportados son:

- Módulo de Young: 5 – 25 GPa
- Coeficiente de Poisson: 0.2 – 0.35

Estos valores corresponden a materiales con comportamiento relativamente dúctil o semidúctil, favorable para la estabilidad del sello. En evaporitas, los módulos pueden ser

mayores y su comportamiento viscoplastico contribuye a procesos de auto-sellado (Bachu, 2008; Warren, 2016).

6.6.4 Resistencia mecánica

La resistencia a compresión uniaxial (UCS) representa la capacidad del material para soportar esfuerzos sin falla. Una mayor resistencia mecánica incrementa la tolerancia del sello frente a las condiciones de sobrepresión asociadas al almacenamiento (Zoback, 2010). Valores típicos incluyen:

- Lutitas / arcillolitas: 10 – 50 MPa
- Anhidrita / evaporitas: 50 – 100 MPa o superiores

6.6.5 Estabilidad estructural y reactivación de fallas

El incremento de presión de poro reduce el esfuerzo normal efectivo sobre planos de debilidad, lo que puede favorecer la reactivación de fallas. Estudios de campo indican que incrementos de presión del orden de 2 a 10 MPa pueden ser suficientes para inducir deslizamiento en fallas críticamente orientadas, dependiendo del régimen de esfuerzos regional (Rutqvist, 2012).

6.7 Paso 7. Analizar su composición mineralógica

La composición mineralógica de la roca sello constituye un factor clave para evaluar la estabilidad geoquímica del sistema durante el almacenamiento geológico de CO₂. Las rocas sello están predominantemente formadas por minerales que contribuyen a su baja permeabilidad y a su capacidad de confinamiento; sin embargo, la respuesta de estos minerales frente a la presencia de CO₂ disuelto puede variar significativamente.

En función de su comportamiento geoquímico y su impacto sobre la integridad del sello, los minerales presentes en las rocas sello se agrupan en tres categorías principales: minerales arcillosos, minerales reactivos y minerales inertes. Esta clasificación permite evaluar

de manera sistemática los posibles cambios en porosidad, permeabilidad y estabilidad mecánica asociados a la interacción roca-CO₂.

6.7.1 Clasificación de minerales arcillosos

Los minerales arcillosos son componentes esenciales de las rocas sellos debido a su capacidad de hinchamiento y su baja permeabilidad. Estos minerales tienden a ser reactivos en presencia de fluidos, lo que puede mejorar su capacidad de sellado. Algunos de los minerales arcillosos más comunes incluyen:

- **Illita:** La illita es un mineral arcilloso no expansivo que se encuentra comúnmente en rocas sellos. Su estructura laminar y su baja permeabilidad la hacen ideal para sellar microporos y fracturas. Además, la illita es químicamente estable en presencia de CO₂, lo que contribuye a la integridad a largo plazo de la roca sello (Zhang et al., 2019).
- **Clorita:** La clorita es otro mineral arcilloso que contribuye a la baja permeabilidad de la roca sello. Es resistente a la alteración química y ayuda a mantener la integridad de la roca, incluso en condiciones de alta presión y temperatura (Orlic et al., 2011).
- **Montmorillonita (Esmectita):** La montmorillonita es un mineral arcilloso altamente expansivo en presencia de agua. Su capacidad de hinchamiento puede sellar eficazmente los poros y fracturas, lo que la hace útil en rocas sellos. Sin embargo, su reactividad con el CO₂ puede generar cambios en la porosidad y permeabilidad, lo que podría comprometer su capacidad de sellado a largo plazo (Kaszuba et al., 2013).
- **Caolinita:** Aunque menos común en rocas sellos, la caolinita puede contribuir a la baja permeabilidad. Sin embargo, es menos reactivo que otros minerales arcillosos, lo que limita su capacidad de sellado en comparación con la illita o la clorita (Zhang et al., 2019).
- **Vermiculita:** Similar a la montmorillonita, la vermiculita tiene propiedades de hinchamiento que pueden ser útiles para sellar poros y fracturas. Sin embargo, su

presencia en rocas sellos es menos común debido a su menor estabilidad química (Orlic et al., 2011).

6.7.2 Clasificación de minerales reactivos

Los minerales reactivos pueden reaccionar con el CO₂, lo que puede alterar las propiedades de la roca sello. Algunos de los minerales reactivos más comunes son:

- **Calcita (CaCO₃):** La calcita puede reaccionar con el CO₂ para formar bicarbonatos (Ca(HCO₃)₂). Este proceso puede generar cambios en la porosidad y permeabilidad de la roca sello, lo que podría comprometer su capacidad de sellado (Kaszuba et al., 2013).
- **Dolomita (CaMg(CO₃)₂):** Similar a la calcita, la dolomita puede reaccionar con el CO₂, generando cambios en la estructura de la roca. Sin embargo, su reactividad es generalmente menor que la de la calcita (Zhang et al., 2019).
- **Yeso (CaSO₄·2H₂O):** El yeso es soluble en agua y puede disolverse en presencia de fluidos, lo que puede generar huecos y aumentar la permeabilidad de la roca sello (Orlic et al., 2011).
- **Anfíboles:** Minerales silicatados que pueden reaccionar con el CO₂ en condiciones específicas, generando cambios en la porosidad y permeabilidad (Kaszuba et al., 2013).

6.7.3 Clasificación de minerales inertes.

Los minerales inertes son aquellos que no reaccionan significativamente con el CO₂ o los fluidos circundantes, lo que contribuye a la estabilidad química de la roca sello. Estos minerales son importantes para mantener la integridad de la roca a largo plazo. Algunos de los minerales inertes más comunes incluyen:

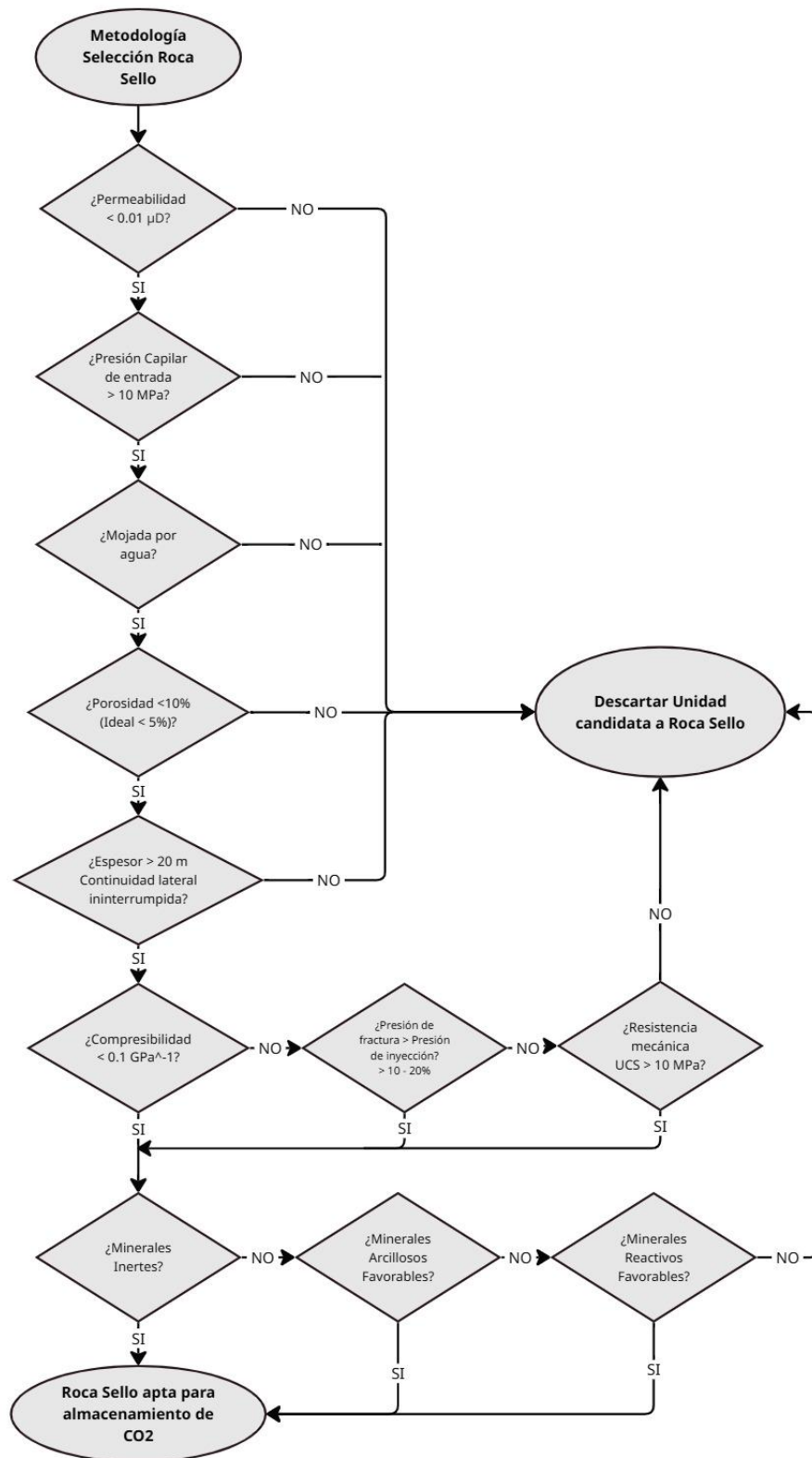
- **Cuarzo:** El cuarzo es un mineral muy común en rocas sedimentarias, conocido por su alta resistencia química y mecánica. No reacciona con el CO₂ y contribuye a la estabilidad de la roca sello. Además, su presencia reduce la permeabilidad y aumenta la resistencia mecánica de la roca (Zhang et al., 2019).

- Feldespatos (Ortoclasa y Plagioclasa): Los feldespatos son minerales comunes en rocas sellos que contribuyen a la resistencia mecánica de la roca. Aunque pueden ser ligeramente reactivos en presencia de fluidos ácidos, en general son considerados minerales estables que no comprometen la integridad de la roca sello (Kaszuba et al., 2013).
- Anhidrita: La anhidrita es un mineral sulfatado que es químicamente estable en presencia de CO₂. Su presencia en rocas sellos contribuye a la baja permeabilidad y a la estabilidad química de la roca (Kaszuba et al., 2013).
- Mica (Biotita y Moscovita): Las micas son minerales laminados que pueden contribuir a la baja permeabilidad de la roca sello. Aunque son menos comunes en rocas sellos que los minerales arcillosos, su presencia puede mejorar la estabilidad mecánica de la roca (Kaszuba et al., 2013).
- Hematita (Fe₂O₃): Un mineral de óxido de hierro que es químicamente estable en presencia de CO₂. Su presencia en rocas sellos no afecta significativamente la capacidad de sellado, pero puede contribuir a la estabilidad mecánica de la roca (Zhang et al., 2019).
- Antracita: Una forma de carbón de alto rango que es químicamente estable en presencia de CO₂. Aunque no es común en rocas sellos, su presencia puede mejorar la capacidad de adsorción de CO₂ (Kaszuba et al., 2013).

6.8 Diagrama de flujo criterios de selección

Figura 4.

Diagrama de flujo de la metodología para criterios selección de la roca sello para almacenamiento de CO₂.



6.9 Caracterización de una roca sello prospecto según sus propiedades petrofísicas

En la siguiente tabla (ver Tabla 3) se presenta la caracterización de la roca sello prospecto para la inyección de CO₂ estimando valores en sus propiedades petrofísicas

Tabla 3

Caracterización petrofísica de una roca sello prospecto

Propiedad Petrofísica	Valor Estimado	Implicaciones
Permeabilidad	0.01 μD	Impide el flujo de CO ₂ , incluso bajo altas presiones.
Porosidad Total	< 10%	Evita la formación de vías preferenciales para la migración del CO ₂ .
Presión capilar de entrada	> 10 MPa	Asegura que el CO ₂ no migre a través de la roca sello.
Mojabilidad	Mojada por agua	Favorece la retención del CO ₂ en los poros.
Compresibilidad	< 0.1 GPa ⁻¹	Mantiene la integridad de la roca sello bajo condiciones de alta presión.
Espesor	> 20 metros	Garantiza un sellado adecuado en toda el área del reservorio.

Nota: Los valores estimados y las implicaciones de las propiedades petrofísicas presentadas en esta tabla corresponden a criterios estandarizados y rangos de referencia extraídos de la literatura colombiana. **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de Bachu (2003), IEA-GHG (2008) y Kaldi et al. (2011).

6.10 Caracterización de una roca sello prospecto según su composición mineralógico

En la siguiente tabla (ver Tabla 4) Los minerales se clasifican en tres grupos principales: Minerales Arcillosos, Minerales Reactivos y Minerales Inertes, según su comportamiento en

presencia de CO₂; también se analiza el Comportamiento ante el CO₂ y se describe cómo reacciona el mineral ante la presencia de CO₂

Tabla 4

Reacción de los minerales en la roca sello ante el CO₂

Mineral	Clasificación	Comportamiento ante el CO ₂	Impacto en el Almacenamiento de CO ₂
Illita	Mineral Arcilloso	Químicamente estable en presencia de CO ₂ .	Contribuye a la baja permeabilidad y al sellado efectivo.
Clorita	Mineral Arcilloso	Resistente a la alteración química, incluso en condiciones de alta presión y temperatura.	Mantiene la integridad de la roca sello, mejorando su capacidad de sellado.
Montmorillonita	Mineral Arcilloso	Puede hincharse en presencia de agua, pero es reactiva con el CO ₂ .	Mejora el sellado de poros y fracturas, pero puede comprometer la integridad a largo plazo.
Caolinita	Mineral Arcilloso	Menos reactiva que otros minerales arcillosos.	Contribuye a la baja permeabilidad, pero con menor capacidad de sellado.
Vermiculita	Mineral Arcilloso	Similar a la montmorillonita, pero menos común en rocas sellos.	Puede sellar poros y fracturas, pero su estabilidad química es menor.
Calcita	Mineral Reactivo	Reacciona con el CO ₂ para formar bicarbonatos.	Puede mejorar el sellado al rellenar poros, pero también puede aumentar la permeabilidad.
Dolomita	Mineral Reactivo	Similar a la calcita, pero con menor reactividad.	Genera cambios en la estructura de la roca, con un impacto moderado en el sellado.
Yeso	Mineral Reactivo	Soluble en agua, puede disolverse en presencia de fluidos.	Aumenta la permeabilidad y puede generar huecos, comprometiendo el sellado.

Mineral	Clasificación	Comportamiento ante el CO ₂	Impacto en el Almacenamiento de CO ₂
Anfíboles	Mineral Reactivo	Pueden reaccionar con el CO ₂ en condiciones específicas.	Generan cambios en la porosidad y permeabilidad, afectando la integridad de la roca sello.
Cuarzo	Mineral Inerte	No reacciona con el CO ₂ .	Contribuye a la estabilidad química y mecánica de la roca sello.
Feldespatos	Mineral Inerte	Ligeramente reactivos en presencia de fluidos ácidos, pero generalmente estables.	Mejoran la resistencia mecánica de la roca sello.
Anhidrita	Mineral Inerte	Químicamente estable en presencia de CO ₂ .	Contribuye a la baja permeabilidad y a la estabilidad química de la roca sello.
Mica (Biotita)	Mineral Inerte	No reacciona significativamente con el CO ₂ .	Mejora la estabilidad mecánica de la roca sello.
Hematita	Mineral Inerte	Químicamente estable en presencia de CO ₂ .	No afecta significativamente el sellado, pero contribuye a la estabilidad mecánica.
Antracita	Mineral Inerte	Químicamente estable en presencia de CO ₂ .	Puede mejorar la adsorción de CO ₂ , aunque no es común en rocas sellos.

Nota: La clasificación de los minerales y la descripción de su comportamiento han sido consolidadas a partir de literatura científica. **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de Gaus (2010), Harvey et al. (2013) y Kaszuba et al. (2003).

En resumen, Una roca sello ideal debe tener una permeabilidad extremadamente baja (en el rango de microdarcy o nanodarcy), una porosidad total baja (inferior al 10%), una alta presión de entrada (superior a 10 MPa), una mojabilidad al agua, una baja compresibilidad (inferior a 0.1 GPa⁻¹) y un espesor suficiente (superior a 20 metros). Estas propiedades garantizan que la roca sello pueda confinar el CO₂ de manera segura y eficiente a largo plazo.

Idealmente, la interacción CO₂-roca en una roca sello debe ser mínima o nula. Es preferible que la roca sello esté compuesta principalmente por minerales inertes que no reaccionen fácilmente con el CO₂. Sin embargo, es importante considerar que estas interacciones pueden ocurrir a lo largo de escalas de tiempo geológicas (es decir, un lapso considerable de tiempo, se podría decir que miles de años). Por lo tanto, es crucial estudiar estas interacciones a largo plazo para predecir posibles cambios en la roca sello y asegurar la integridad del sellado (Gaus et al., 2005).

Por otro lado, existen características litológicas que se consideran desfavorables o controversiales y que, por lo general, conllevan al descarte de la formación, a menos que estudios de detalle demuestren su aptitud mediante tratamientos específicos (Miocic et al., 2016):

- **Unidades Fracturadas:** Las rocas volcánicas (andesitas y basaltos) y metamórficas (esquistos y gneises) suelen presentar planos de debilidad, foliación o clivaje que facilitan la migración secundaria.
- **Litologías Solubles:** Los carbonatos y ciertas evaporitas pueden ser susceptibles a la disolución por fluidos acidificados, comprometiendo la estabilidad estructural a largo plazo.
- **Alta Porosidad o Baja Consolidación:** Sedimentos poco consolidados o arcillas con alta porosidad pueden no ofrecer la presión de entrada capilar necesaria para retener el CO₂ en fase supercrítica.

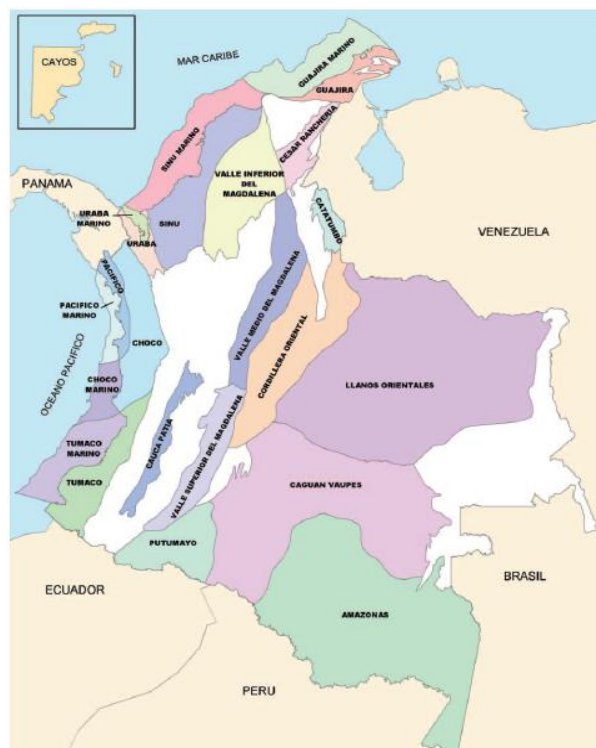
7 Estudios a nivel nacional en diferentes regiones para evaluar la prospectividad en la roca sello.

Colombia, un país geológicamente diverso, alberga una compleja red de formaciones geológicas que han dado lugar a una variada distribución de recursos naturales. La geografía colombiana, marcada por la presencia de tres cordilleras y numerosas cuencas sedimentarias, ha influenciado significativamente la localización y el potencial de las zonas petroleras. Nuestro país se conforma por un mosaico geológico que ha sido objeto de intensos estudios y exploraciones para determinar las áreas con mayor prospectividad petrolera y consecuentemente, como en el presente trabajo, una prospectividad para un almacenamiento geológico de CO₂.

A continuación, con la información a nivel mundial suministrada y la información dada anteriormente, se detallarán diferentes formaciones y grupos geológicos para un posible almacenamiento geológico de CO₂ y evidenciar zonas colombianas en donde no es posible este almacenamiento debido a características desfavorables que presentan regiones específicas del país.

Figura 5.

Mapa de Cuencas Sedimentarias de Colombia



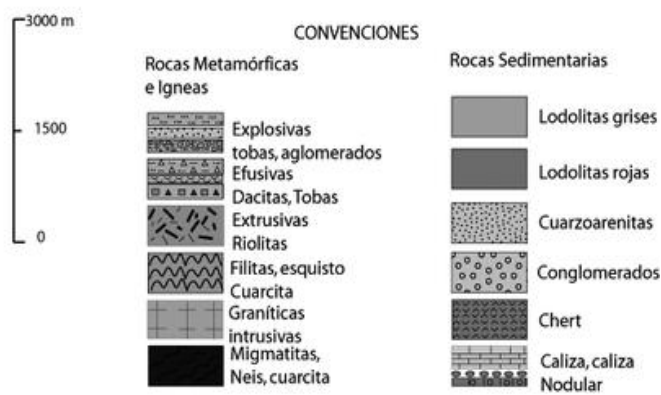
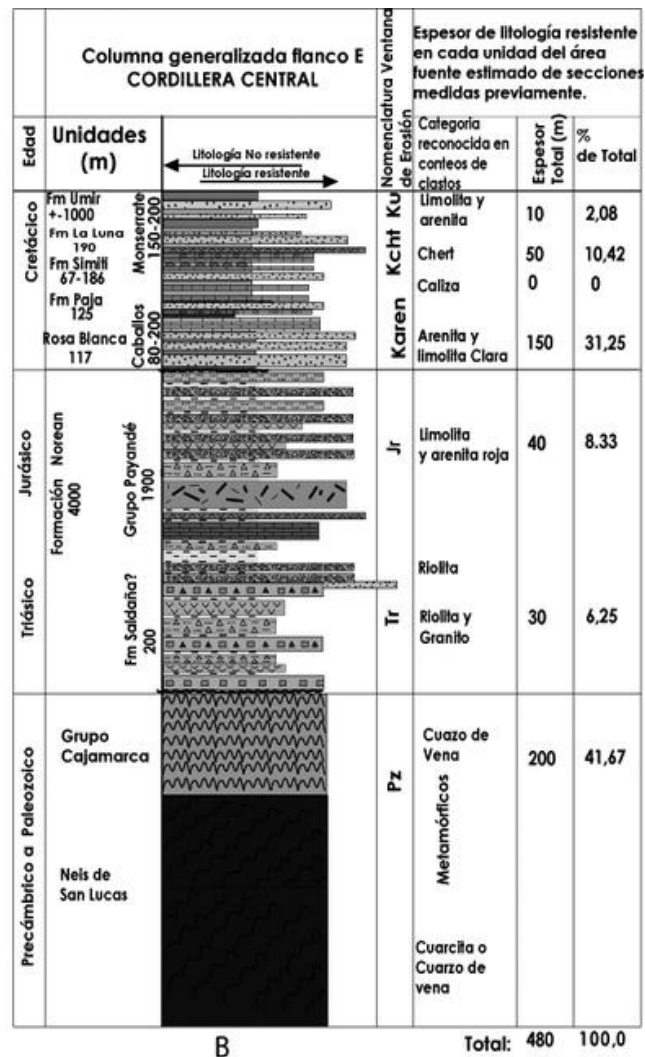
Tomado de: ANH - Gobierno de Colombia (2020).

7.1 Cordillera Central

Esta región está constituida predominantemente por rocas volcánicas e ígneas que, debido a su génesis y a una historia tectónica altamente activa, exhiben un grado de fracturamiento secundario elevado. Esta red de discontinuidades puede actuar como vías de alta transmisividad, comprometiendo la función de barrera impermeable necesaria para el almacenamiento (Miocic et al., 2016).

Figura 6.

Columna generalizada flanco E CORDILLERA CENTRAL



Tomado de: Columna estratigráfica generalizada de las unidades potencialmente productoras de clastos de grava en áreas fuente de las rocas cenozoicas del Sinclinal de Nuevo Mundo. (2012)

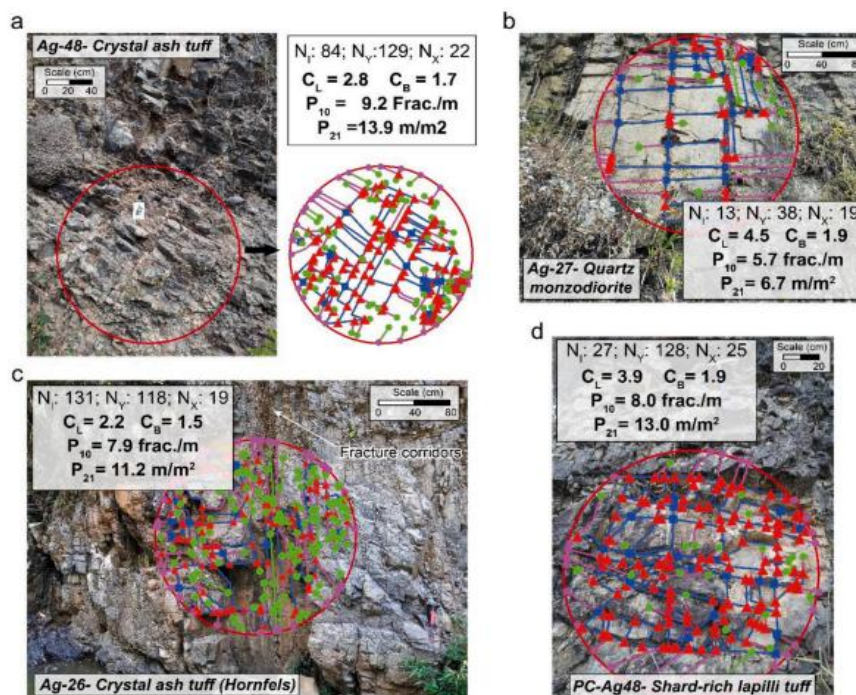
La heterogeneidad de las facies volcánicas presenta un escenario complejo donde la identificación de unidades de sellado continuas es limitada. Si bien la diversidad mineralógica ofrece oportunidades teóricas para la mineralización in situ del CO₂, el control de la integridad del sello frente a la tectónica activa de los Andes colombianos representa el desafío técnico principal para la viabilidad de proyectos en esta zona (Alvarado et al., 2023).

7.1.1 Actividad sísmica

La región se caracteriza por ser geodinámicamente activa. La ocurrencia de eventos sísmicos no solo conlleva el riesgo de generar nuevas redes de fracturamiento, sino que puede provocar la reactivación de fallas preexistentes. Este fenómeno es particularmente crítico si las fallas atraviesan la roca sello, ya que pueden transformarse de barreras de flujo en vías de alta transmisividad para el CO₂ (Zoback & Gorelick, 2012).

Figura 7.

Fractured volcanic rocks in the Cordillera Central



Tomado de: Field measurements of the fractured rocks within the Agrado-Betania fault damage zone. (2024)

7.1.2 *Falla Agrado Betania*

La evaluación de la Cordillera Central revela limitaciones críticas asociadas a su arquitectura estructural. Un ejemplo representativo es la falla Agrado-Betania, una estructura de escala regional que delimita bloques tectónicos en el Valle Superior del Magdalena y cuya zona de daño evidencia una conectividad hidráulica desfavorable para el almacenamiento (Valencia-Gómez et al., 2024).

Las mediciones de campo en la zona de influencia de la falla muestran una red de fracturamiento compleja en diversas litologías:

- Rocas Piroclásticas (Tobas): Tanto las tobas de ceniza cristalina como las de lapilli presentan una conectividad de fractura alta, con corredores de fractura casi verticales que facilitarían el flujo preferencial de fluidos.
- Cuerpos Plutónicos y Metamórficos: La cuarzo-monzodiorita del Plutón Astillero y los *hornfels* asociados mantienen una conectividad moderada a alta, lo que anula la capacidad de sellado intrínseco de estas rocas ígneas (Valencia-Gómez et al., 2024).

La Cordillera Central se clasifica como un prospecto de baja prioridad para el secuestro de CO₂ debido a los siguientes factores de riesgo:

- Vías de Migración Secundaria: La densa red de fallas activas y la alta intensidad de fracturamiento actúan como conductos directos que comprometen la estanqueidad de cualquier formación sello, facilitando el escape del CO₂ hacia la superficie o acuíferos someros.
- Inestabilidad Geoquímica y Petrofísica: La interacción del CO₂ con aguas subterráneas en entornos volcánicos puede inducir reacciones químicas que alteran la mineralogía original, incrementando la permeabilidad en lugar de reducirla.
- Complejidad de Caracterización: A diferencia de las cuencas estables, la heterogeneidad de las rocas volcánicas dificulta la identificación de unidades con la

porosidad y permeabilidad controlada necesarias para un almacenamiento eficiente y predecible a largo plazo.

La Cordillera Central de Colombia presenta desafíos significativos que la hacen un prospecto poco favorable para el almacenamiento geológico de CO₂. Su compleja geología y su densa red de fallas geológicas, caracterizada por una alta actividad tectónica y volcánica, incrementa el riesgo de fugas a través de fallas y fracturas que pueden actuar como conductos para el CO₂, facilitando su escape hacia la superficie, lo que hace que nuestra roca sello se vea comprometida por esta actividad sísmica y la potencial interacción del CO₂ con aguas subterráneas, que pueden alterar su composición y aumentar la permeabilidad, lo cual estas interacciones generan reacciones químicas que comprometen la integridad del almacenamiento a largo plazo.. La presencia de rocas volcánicas, aunque porosas, dificulta la identificación de formaciones con esta permeabilidad y porosidad necesarias para un almacenamiento eficiente. Por lo tanto, la complejidad geológica y los riesgos asociados hacen que la Cordillera Central sea un área de baja prioridad para el almacenamiento geológico de CO₂ en comparación con otras regiones con geología más estable y formaciones rocosas más adecuadas.

7.2 La Cordillera Occidental

La Cordillera Occidental de Colombia se caracteriza por una configuración geológica compleja, producto de procesos de acreción de terrenos oceánicos y eventos magmáticos sucesivos. Dentro de esta región, destacan unidades cuya naturaleza petrográfica condiciona su respuesta ante el almacenamiento de fluidos:

7.2.1 Grupo Dagua

Esta unidad está constituida predominantemente por una secuencia metasedimentaria de origen oceánico que incluye metalimolitas, metagrauvas, metacherts y metabasaltos (Nelson, 1957). Estas rocas han sido afectadas por un metamorfismo regional de bajo a moderado grado, alcanzando la facies Prehnita-Pumpellyita, lo que resulta en la formación de

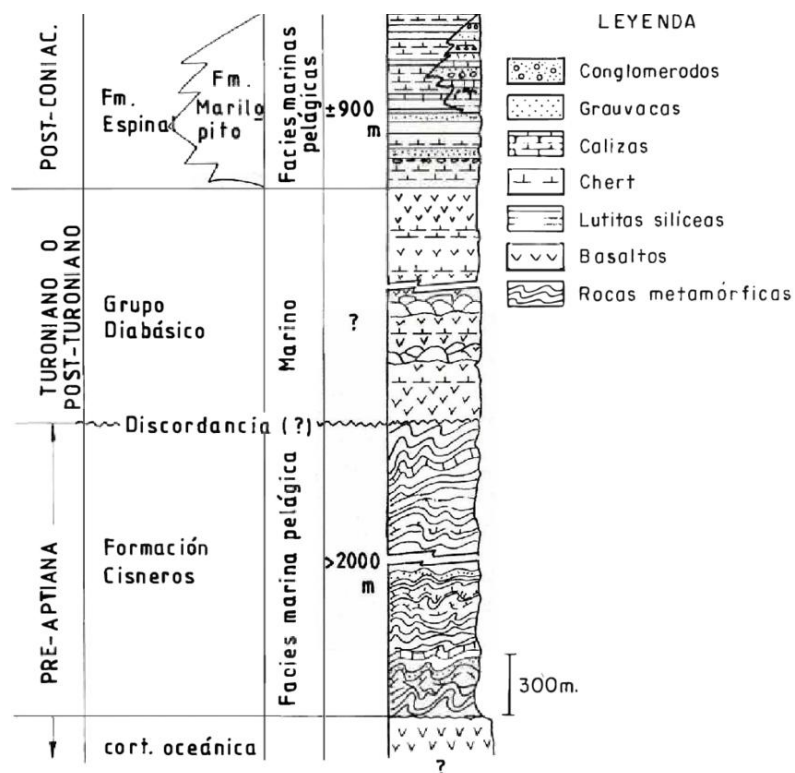
filitas, pizarras y esquistos con intercalaciones de shales. La presencia de foliación y clivaje en estas rocas metamórficas genera planos de debilidad que pueden facilitar la fracturación mecánica (Moreno-Sánchez et al., 2008).

7.2.2 Grupo Diabasa

Se compone principalmente de rocas volcánicas máficas, incluyendo lavas andesíticas, basaltos y diabasas, con intercalaciones subordinadas de chert y shales. Al igual que otras unidades volcánicas de la región, su rigidez y origen magmático suelen derivar en una alta densidad de fracturamiento, lo que limita su capacidad como sello impermeable continuo para el CO₂ (Valencia-Gómez et al., 2024).

Figura 8.

Columna Estratigráfica Generalizada del Grupo Dagua y el Grupo Diabásico



Tomado de: Servicio Geológico Colombiano. (2015)

Posteriormente, Barrero (1979) propuso una nueva nomenclatura, manteniendo los términos "Grupo Dagua" y "Grupo Diabásico" de Nelson, pero otorgando categoría de

formación a las sedimentitas de Espinal y renombrando como Formación Cisneros a las filitas y pizarras. Según Barrero, el Grupo Dagua consta de dos formaciones:

7.2.3 Formación Cisneros

Constituida por filitas y pizarras (claras, verdes y carbonáceas), metacalizas y cherts. Esta unidad presenta un metamorfismo de bajo grado asociado a un intenso cizallamiento tectónico, lo que genera zonas de debilidad estructural. La presencia de grafito y pirita en las pizarras oscuras puede inducir reacciones geoquímicas complejas en presencia de CO₂ acidificado (Nelson, 1957; Moreno-Sánchez et al., 2008).

7.2.4 Formación Espinal

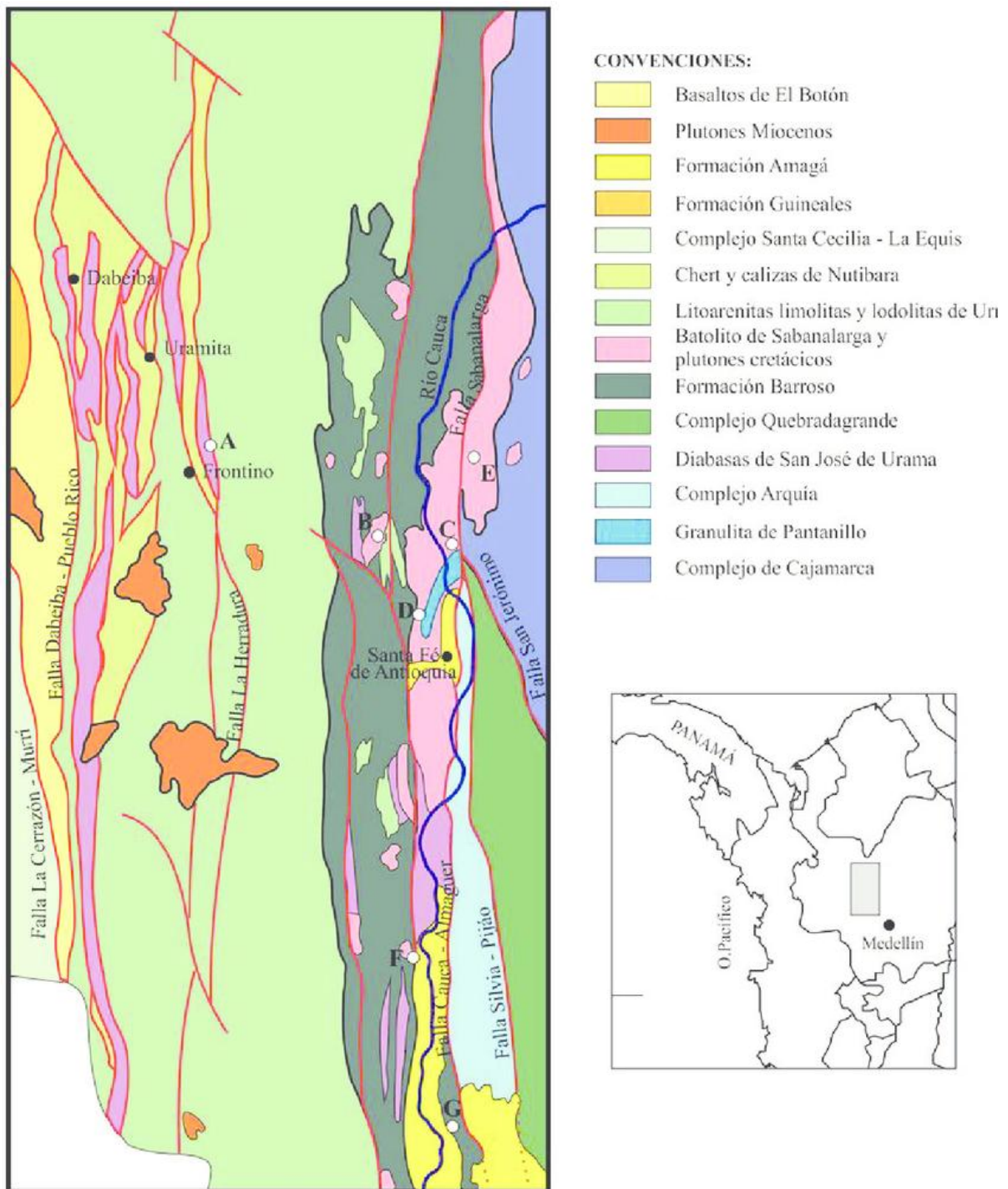
A diferencia de las unidades circundantes, es esencialmente no metamórfica. Se caracteriza por lutitas negras silíceas y secuencias turbidíticas (grauvacas que gradan a lutitas). Aunque las lutitas de grano fino poseen baja permeabilidad intrínseca, el brechamiento y la foliación desarrollados cerca de las fallas principales actúan como factores negativos que comprometen la estanqueidad (Valencia-Gómez et al., 2024).

7.2.5 Formación Barroso

Representa una de las unidades volcánicas de mayor extensión en la Cordillera Occidental. Su composición predominantemente basáltica y andesítica, sumada a su compleja historia tectónica, dificulta la identificación de horizontes sellantes continuos debido a su alta susceptibilidad al fracturamiento mecánico (Álvarez & Ordóñez, 2009).

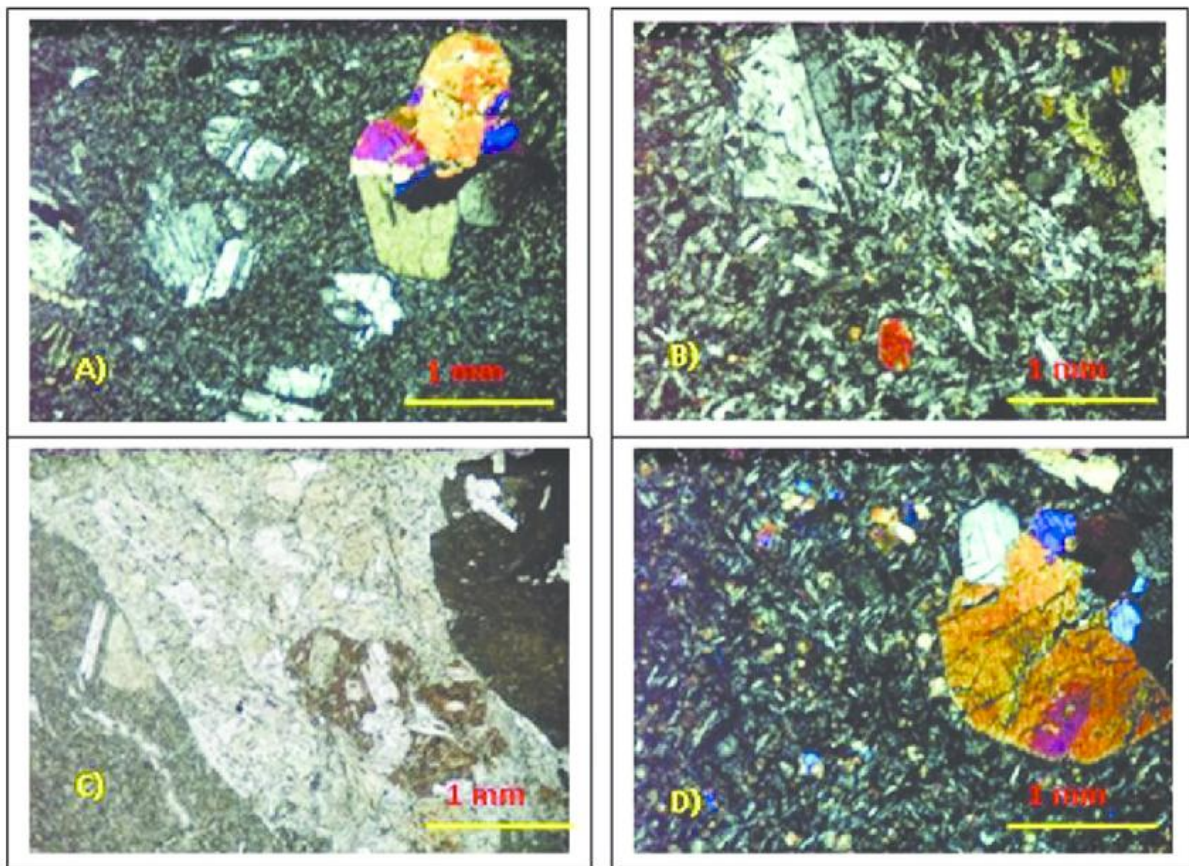
Figura 9.

Geología y localización de la Formación Barroso y las Diabasas de San José de Urama



Tomado de: Formación Barroso: Arco volcánico Toleítico y Diabasas de San José de Urama (2013)

Compuesta principalmente por rocas volcánicas básicas, incluyendo flujos de lava y piroclastos.

Figura 10.*Microfotografías de la Formación Barroso*

Tomado de: Formación Barroso: Arco volcánico Toleítico y Diabasas de San José de Urama (2013)

Aspecto microscópico de basaltos, andesitas y tobas de la Formación Barroso.

- LM-199 Basalto
- VR-269 Andesita
- ER-236 Toba lítica
- GR-209 Basalto.

Esta diversidad de flujos de lava y depósitos piroclásticos genera una arquitectura de roca rígida y densamente fracturada (García & Mejía, 2013).

Desde el punto de vista de la ingeniería de reservorios, la Formación Barroso presenta una alta permeabilidad secundaria debido a su naturaleza volcánica y al intenso fracturamiento tectónico. La ausencia de una roca sello efectiva es el factor crítico de riesgo; las rocas ígneas

carecen de la capacidad de deformación plástica (ductilidad) necesaria para sellar fracturas, lo que facilitaría la migración del CO₂ hacia la superficie (Valencia-Gómez et al., 2024).

Al formar parte de un prisma acrecionario en un entorno geodinámicamente activo, la formación está sujeta a esfuerzos que comprometen la integridad de cualquier posible trampa geológica. Estudios geológicos regionales coinciden en que la Formación Barroso no cumple con los requisitos de estanqueidad y seguridad a largo plazo, clasificándola como una unidad no apta para el almacenamiento geológico de CO₂ (García & Mejía, 2013; Alvarado et al., 2023).

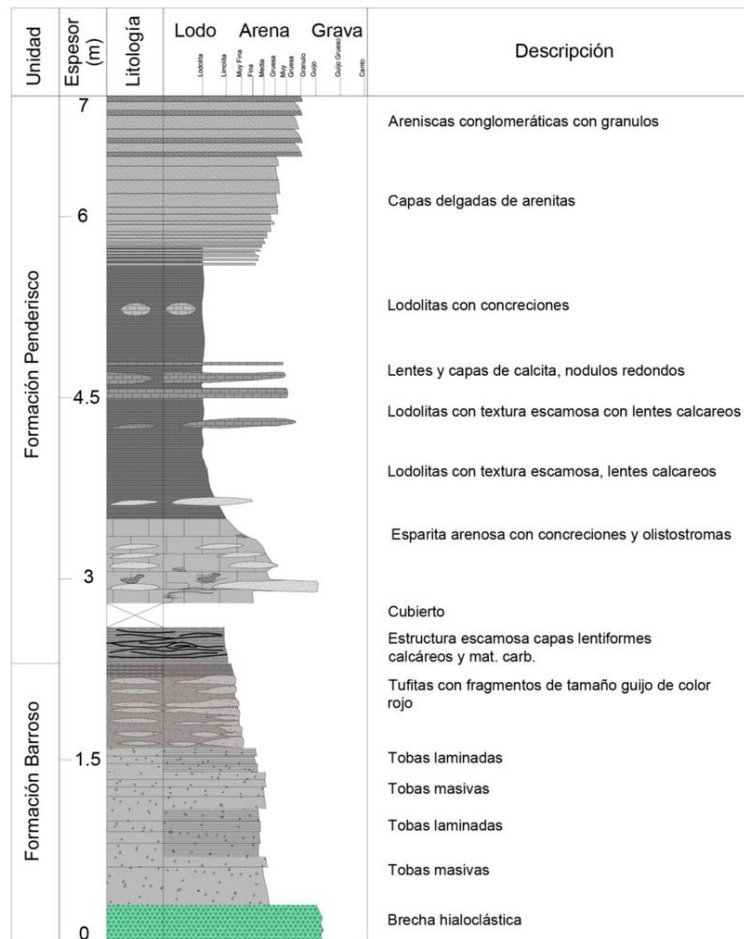
7.2.6 Formación Penderisco

La Formación Penderisco constituye una unidad de gran relevancia estratigráfica en el sector norte de la Cordillera Occidental. Depositada durante el Cretácico Tardío (específicamente entre el Albiano y el Cenomaniano), esta unidad representa un registro crítico de la evolución geodinámica de la región

Esta formación se originó en un ambiente marino profundo y forma parte integral del Grupo Dagua. Su columna estratigráfica se caracteriza por estar intercalada con unidades volcánicas, lo que evidencia una sedimentación sincrónica con eventos magmáticos en un entorno de arco de islas o cuenca marginal (Moreno-Sánchez et al., 2008).

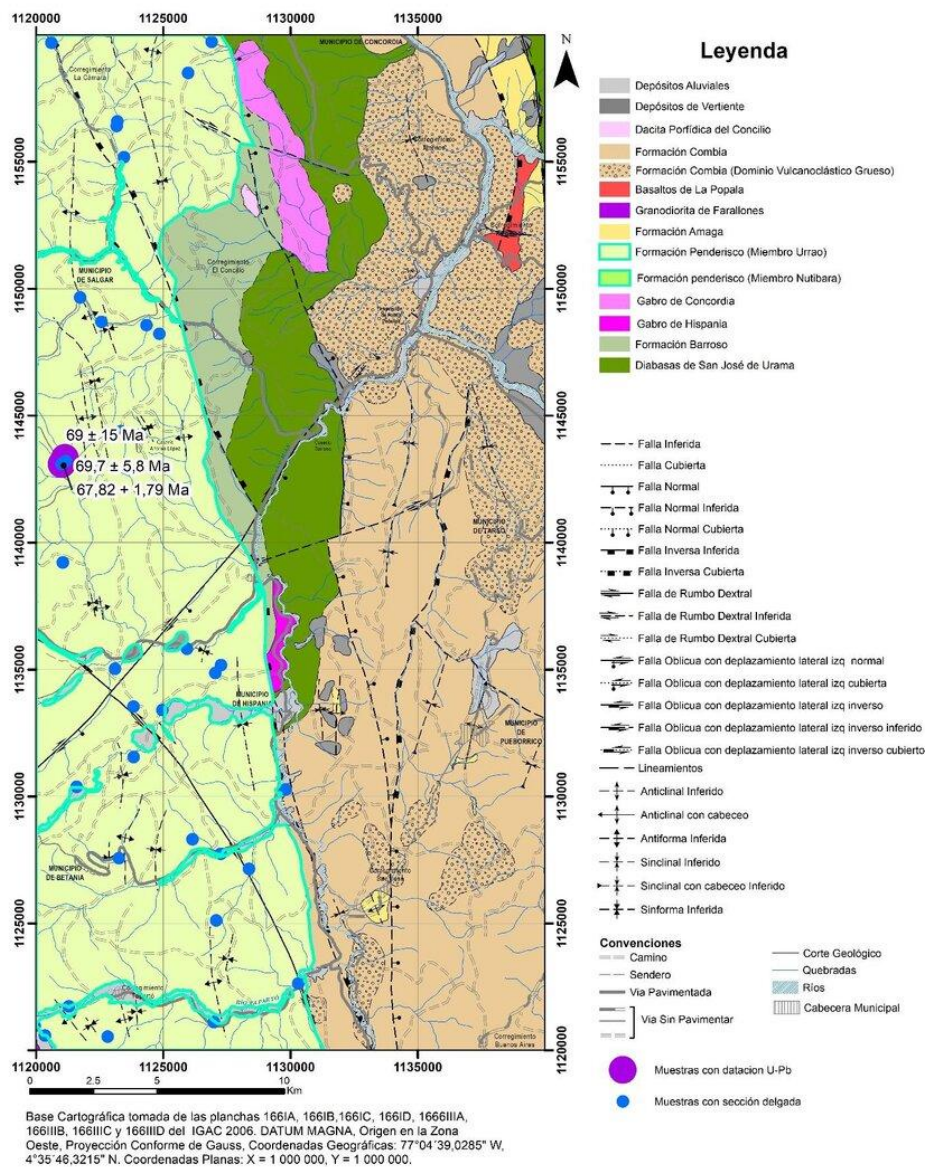
Figura 11.

Ilustración de campo de las rocas de la Formación Penderisco



Tomado de: Marco bioestratigráfico y proveniencia de la Formación Penderisco (2015).

El interés de la Formación Penderisco para la seguridad del almacenamiento de CO₂ radica en su naturaleza sedimentaria dentro de una cordillera mayoritariamente ígnea. Al presentar secuencias de grano fino (lodolitas y limolitas intercaladas), teóricamente podría ofrecer horizontes de baja permeabilidad. No obstante, al estar genéticamente ligada a procesos de acreción y encontrarse intercalada con rocas volcánicas, sufre de las mismas limitaciones estructurales fracturamiento y cizallamiento que afectan la continuidad lateral del sello (Nelson, 1957; Valencia-Gómez et al., 2024).

Figura 12.*Localización de formaciones con secciones delgadas*

Tomado de: Geología del Borde Occidental de la Plancha 166 Jericó (2022).

La formación refleja un ambiente marino activo durante su deposición y ha sido intensamente afectada por la orogenia andina, resultando en una arquitectura compleja de pliegues anticlinales y sinclinales. Estas deformaciones tectónicas imponen una limitación crítica; la inestabilidad estructural y el fracturamiento asociado a los charnelas de los pliegues incrementan el riesgo de migración vertical del CO₂, comprometiendo la integridad del confinamiento a largo plazo (Valencia-Gómez et al., 2024).

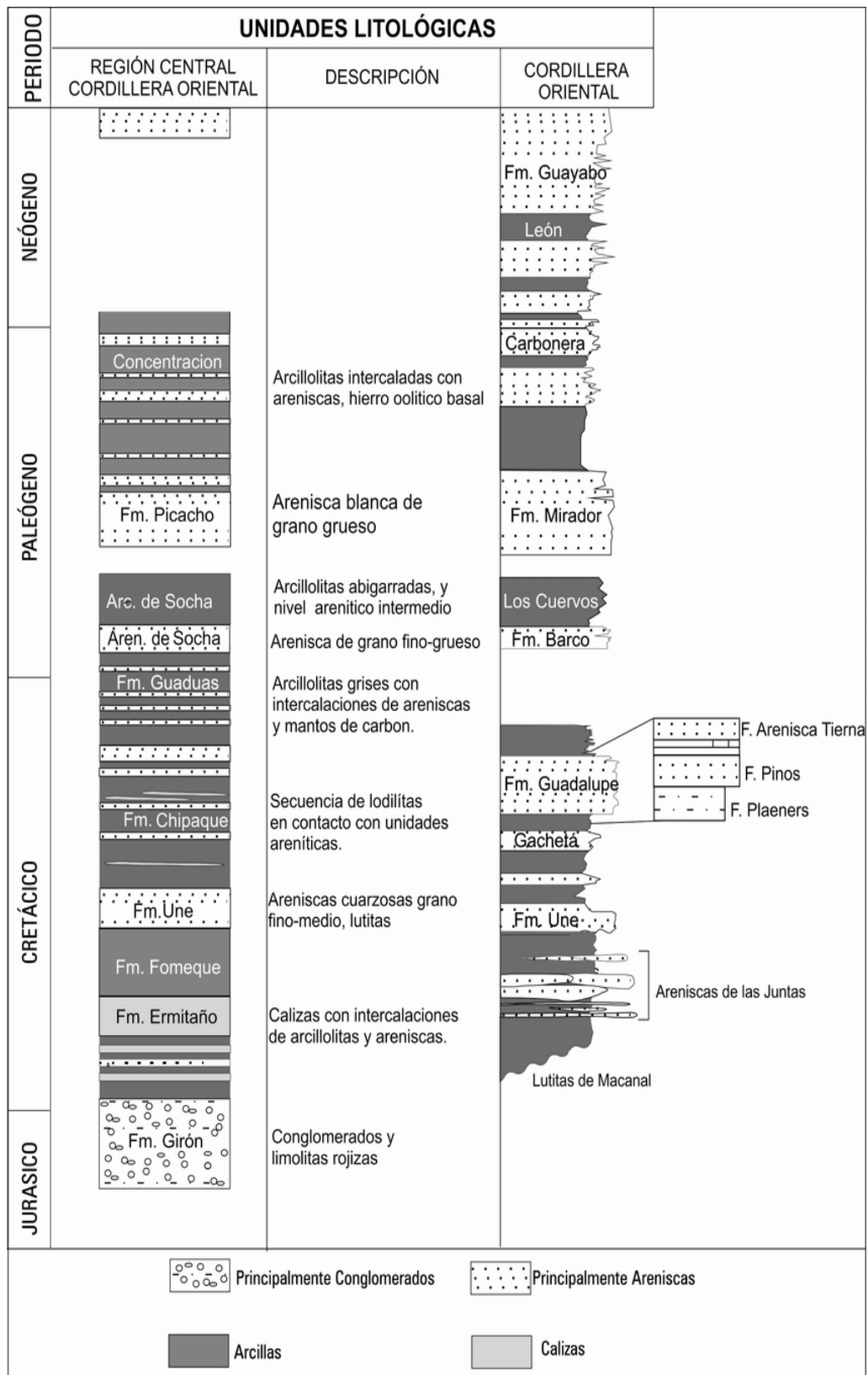
Desde un análisis litológico, la formación presenta características favorables, destacando la presencia de lutitas de baja permeabilidad que podrían actuar como un sello competente. Si se considerara únicamente la calidad intrínseca de la matriz rocosa, la unidad representaría un pilar potencial para el almacenamiento. Sin embargo, en el contexto de la Cordillera Occidental, la calidad de roca se ve subordinada a la integridad estructural, lo que obliga a priorizar formaciones en cuencas con menor complejidad tectónica (Alvarado et al., 2023; Nelson, 1957).

7.3 Cordillera Oriental

Esta región se caracteriza por un predominio de sucesiones sedimentarias de gran extensión lateral, depositadas principalmente durante el Cretácico y Paleógeno. La arquitectura estratigráfica de la Cordillera Oriental presenta una alternancia de unidades siliciclásticas de alta porosidad con potentes paquetes litoestratigráficos que actúan como barreras de flujo. Según Alvarado et al. (2023), la continuidad de estas secuencias ha permitido que unidades como el Grupo Guadalupe se consoliden como reservorios estratégicos, cuya integridad depende de la relación de contacto con sellos locales y la complejidad de los sistemas de fallas inversas que definen la estructura actual de la cordillera.

Figura 13.

Estratigrafía generalizada de la Cordillera Oriental



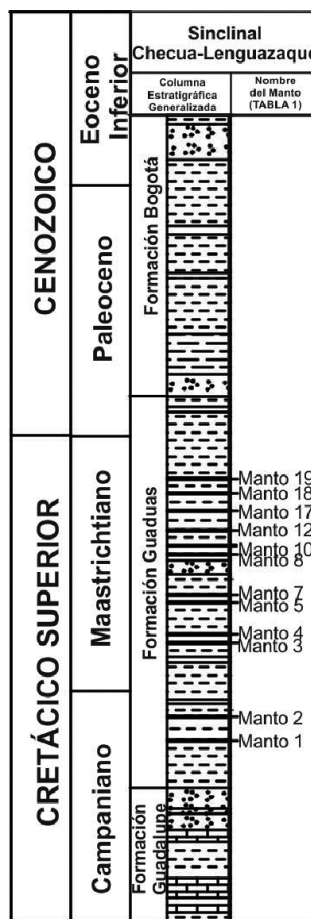
Tomado de: Thermal evaluation of 6 wells of the central part of the eastern cordillera. (2016).

7.3.1 Formación Guadalupe

Esta unidad se distribuye exclusivamente en la Cordillera Oriental, con una presencia predominante en la Sabana de Bogotá y zonas circundantes. Su depósito tuvo lugar durante el Cretácico Superior, bajo condiciones de un ambiente marino somero que favoreció la acumulación de potentes secuencias de areniscas cuarzosas (Alvarado et al., 2023).

Figura 14.

Columna estratigráfica generalizada del Sinclinal Checua-Lenguazaque



Tomado de: Estudio de la maduración termal de kerógeno en los carbones de la Formación Guaduas (2016).

Debido a su alta porosidad y permeabilidad, la Formación Guadalupe se identifica principalmente como una unidad de almacenamiento (reservorio) de gran capacidad. Su evaluación en este estudio es pertinente ya que, para garantizar la eficiencia de un proyecto de CCS, es imperativo analizar la interacción entre estas areniscas y sus sellos suprayacentes,

asegurando que el sistema estratigráfico completo sea capaz de contener el CO₂ inyectado de manera segura (Bachu et al., 1994; Vilarrasa et al., 2019).

Además, la presencia de fracturas y fallas en la formación podría comprometer su integridad como barrera impermeable. Por lo tanto, aunque la Formación Guadalupe no es descartable como posible sitio de almacenamiento, se requieren estudios más detallados para evaluar su potencial real y mitigar los riesgos asociados.

7.4 Cuenca de los Llanos Orientales

La Cuenca de los Llanos Orientales constituye la principal cuenca de antepaís de Colombia, caracterizada por una relativa estabilidad tectónica y una excelente continuidad lateral de sus unidades litoestratigráficas en comparación con las zonas cordilleranas. En este contexto, la Formación León se posiciona como una barrera fundamental de alcance regional; su composición predominantemente arcillosa y su baja permeabilidad intrínseca garantizan la estanqueidad del sistema, actuando como un sello de alta potencia para los reservorios subyacentes (Alvarado et al., 2023). La evaluación de esta cuenca es prioritaria para proyectos de almacenamiento de CO₂ debido a que sus propiedades petrofísicas permiten soportar incrementos en la presión de poro sin comprometer la integridad capilar del sello (Bachu et al., 1994; Kaldi et al., 2013).

7.4.1 Formación León

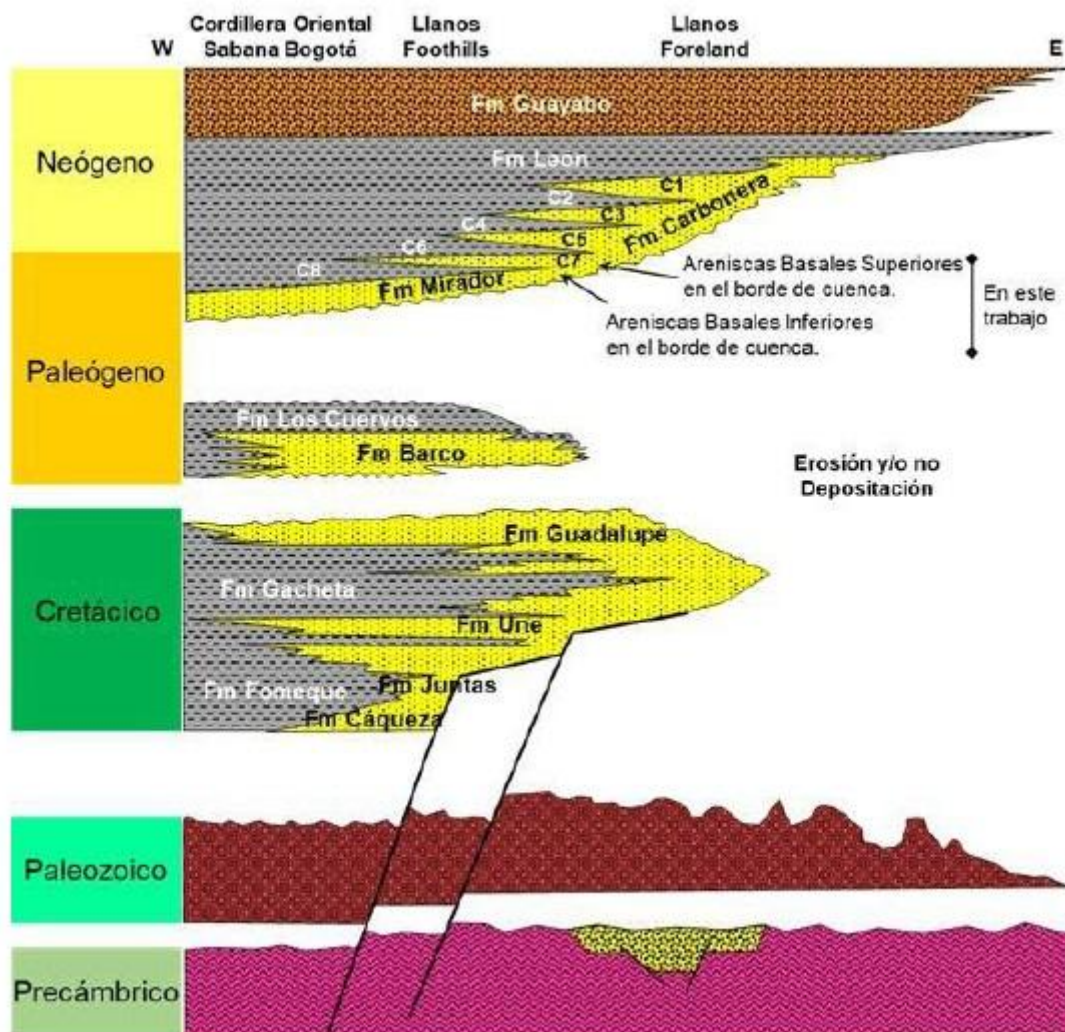
La Formación León se posiciona como una de las unidades litoestratigráficas con mayores atributos para garantizar la seguridad del almacenamiento geológico de CO₂ en el contexto colombiano. Presenta características petrofísicas altamente favorables, derivadas de su composición predominantemente arcillosa y limosa de origen lacustre o marino somero. Su papel como roca sello regional es determinante, ya que proporciona una barrera impermeable de gran extensión lateral que minimiza el riesgo de migración vertical desde los reservorios arenosos subyacentes (Alvarado et al., 2023; Kaldi et al., 2013).

7.4.2 Formación Guayabo

Por su parte, la Formación Guayabo se identifica como una unidad de interés para el confinamiento, aunque su clasificación como sello principal está sujeta a mayor variabilidad litológica. Presenta niveles arcillosos con capacidad teórica de sellado; sin embargo, tanto el espesor como la continuidad lateral de estos niveles son más heterogéneos que en la Formación León. Esto genera una necesidad de caracterización detallada para determinar su viabilidad real como barrera persistente a escala geológica (Alvarado et al., 2023; Vilarrasa et al., 2019).

Figura 15.

Cronoestratigrafía generalizada de la Cordillera Oriental y la Cuenca Llanos Orientales



Tomado de: Entrampamiento estratigráfico en el borde de Cuenca Antepaís-Cuenca Llanos Orientales (2022).

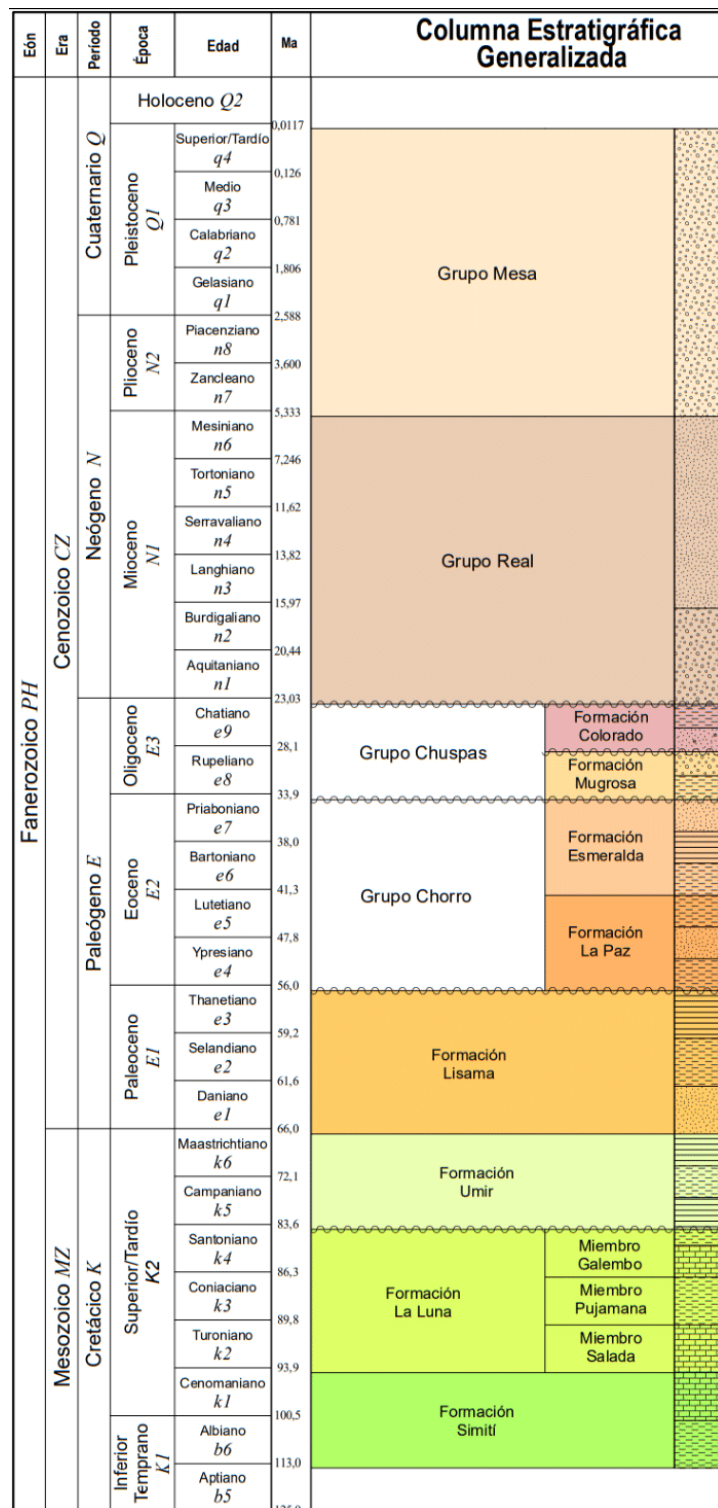
Como se observa en la sección estratigráfica, la interacción entre estas dos unidades define un sistema de protección múltiple. Mientras que la Formación León actúa como el sello primario de alta integridad debido a su homogeneidad, la Formación Guayabo ofrece niveles de sellado secundarios que refuerzan la seguridad del almacenamiento. Esta configuración de sellos superpuestos es análoga a los modelos de éxito internacionales, reduciendo significativamente la incertidumbre sobre la migración vertical del gas y posicionando a la Cuenca de los Llanos como el escenario más estable para la implementación del proceso CCS en el país.

7.5 Valle Medio del Magdalena

El VMM es un sistema complejo de depresiones geológicas que ha acumulado espesas secuencias de sedimentos siliciclásticos y carbonatados desde el Mesozoico. Históricamente, esta cuenca ha sido el pilar de la exploración y producción de hidrocarburos en Colombia, lo que ha permitido una caracterización detallada de sus reservorios y unidades de sellado (Alvarado et al., 2023).

Figura 16.

Columna Estratigráfica Generalizada del Valle Medio del Magdalena



Tomado de: Análisis hidrogeoquímico-multivariado del agua subterránea del sistema acuífero del Valle Medio del Magdalena, (2021).

En las últimas décadas, el conocimiento técnico derivado de la industria petrolera ha permitido reevaluar el VMM no solo como fuente de recursos, sino como un reservorio estratégico para el almacenamiento geológico de CO₂. La presencia de campos petroleros maduros y acuíferos salinos profundos, confinados por sellos regionales de probada efectividad (como las formaciones Umir o Lisama), posiciona a esta cuenca como un prospecto de alta prioridad para proyectos de CCS a gran escala (Bachu et al., 1994; Vilarrasa et al., 2019).

7.5.1 Formación Mesa

Esta unidad se caracteriza por una mezcla de depósitos que incluyen tobas volcánicas, areniscas y conglomerados. Esta distribución "en parches" de sedimentos clásticos y materiales piroclásticos dificulta la predicción de la continuidad lateral de posibles estratos impermeables (Valencia-Gómez et al., 2024).

A diferencia de las cuencas sedimentarias donde los sellos son claramente identificables (como la Fm. León), la naturaleza exacta de la roca sello en la Formación Mesa es objeto de debate científico. La presencia de rocas volcánicas intercaladas introduce un riesgo elevado de permeabilidad secundaria por fracturamiento, lo que genera dudas razonables sobre su capacidad para confinar fluidos como el CO₂ de manera segura y duradera (Alvarado et al., 2023; Nelson, 1957).

La Formación Mesa se analiza en este apartado dentro del contexto del Valle Medio del Magdalena (VMM), donde su presencia es geológicamente significativa como unidad de techo de la secuencia sedimentaria. Aunque esta formación posee una distribución regional que se extiende hacia el Valle Superior (VSM), su evaluación en esta sección es pertinente y válida debido a que permite contrastar la baja aptitud de los depósitos clásticos someros del VMM frente a los sellos profundos de la misma cuenca.

La viabilidad de la Formación Mesa como unidad de confinamiento se encuentra comprometida por barreras técnicas que dificultan una evaluación de seguridad rigurosa debido a la incertidumbre en la determinación de una barrera impermeable efectiva. Esta formación se ve obstaculizada por tres factores determinantes:

- Escasa información geofísica: La falta de datos sísmicos de alta resolución y registros de pozo profundos impide mapear con precisión la geometría del subsuelo.
- Alteración de las rocas: Los procesos hidrotermales y meteorológicos han modificado las propiedades originales de la roca, alterando su porosidad y permeabilidad de manera impredecible.
- Heterogeneidad litoestratigráfica: La composición de la unidad varía drásticamente tanto en sentido lateral como vertical. Esta variabilidad impide realizar una correlación confiable de las unidades litológicas, imposibilitando la garantía de que un nivel arcilloso detectado en un punto tenga la continuidad necesaria para actuar como sello a escala de reservorio (Alvarado et al., 2023; Valencia-Gómez et al., 2024).

En consecuencia, sin una caracterización exhaustiva que supere estas limitaciones, la formación se considera un prospecto de baja prioridad en comparación con los sellos regionales homogéneos de las cuencas sedimentarias (Kaldi et al., 2013).

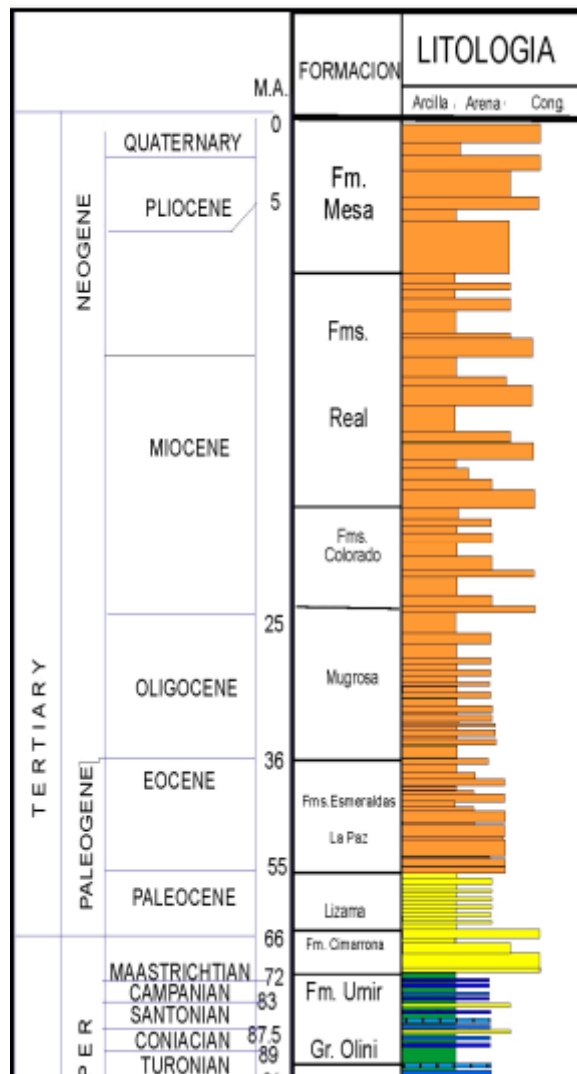
7.5.2 Formación Lisama

La Formación Lisama, depositada durante el Paleoceno en un ambiente de transición a marino somero, constituye una unidad estratégica dentro de la base de la secuencia del Cenozoico en la cuenca del Valle Medio del Magdalena (ANH, 2012; Moreno & Mariño, 2013). Su relevancia para el almacenamiento de CO₂ radica en su arquitectura estratigráfica, caracterizada por una alternancia rítmica de areniscas de grano fino y potentes paquetes de lutitas y arcillas grisáceas que actúan como barreras al flujo de fluidos (Alvarado et al., 2023).

Además de su capacidad de almacenamiento volumétrico considerable, sus datos petrofísicos sugieren que Lisama debe considerarse principalmente como un sello secundario o una barrera de respaldo. Su evaluación es fundamental para garantizar que, en caso de una migración lenta desde horizontes más profundos, esta unidad actúe como una zona de confinamiento adicional, fortaleciendo la seguridad del sistema de almacenamiento multizona en el VMM.

Figura 17.

Esquema de las principales provincias tectónicas de Colombia



Tomado de: Proyecto Geofísico “Linea Regional Transandina” en el Norte de Suramérica (2009).

El análisis estructural y estratigráfico presentado en la Figura 16 permite visualizar la complejidad del subsuelo en el Valle Medio del Magdalena, donde las formaciones Mesa y Lisama ocupan posiciones litoestratigráficas que condicionan su aptitud como sello. En el caso de la Fm. Mesa, su ubicación somera y naturaleza poco consolidada aumentan el riesgo de migración vertical; mientras que para la Fm. Lisama, la configuración de fallas y su heterogeneidad de facies imponen desafíos de estanqueidad regional.

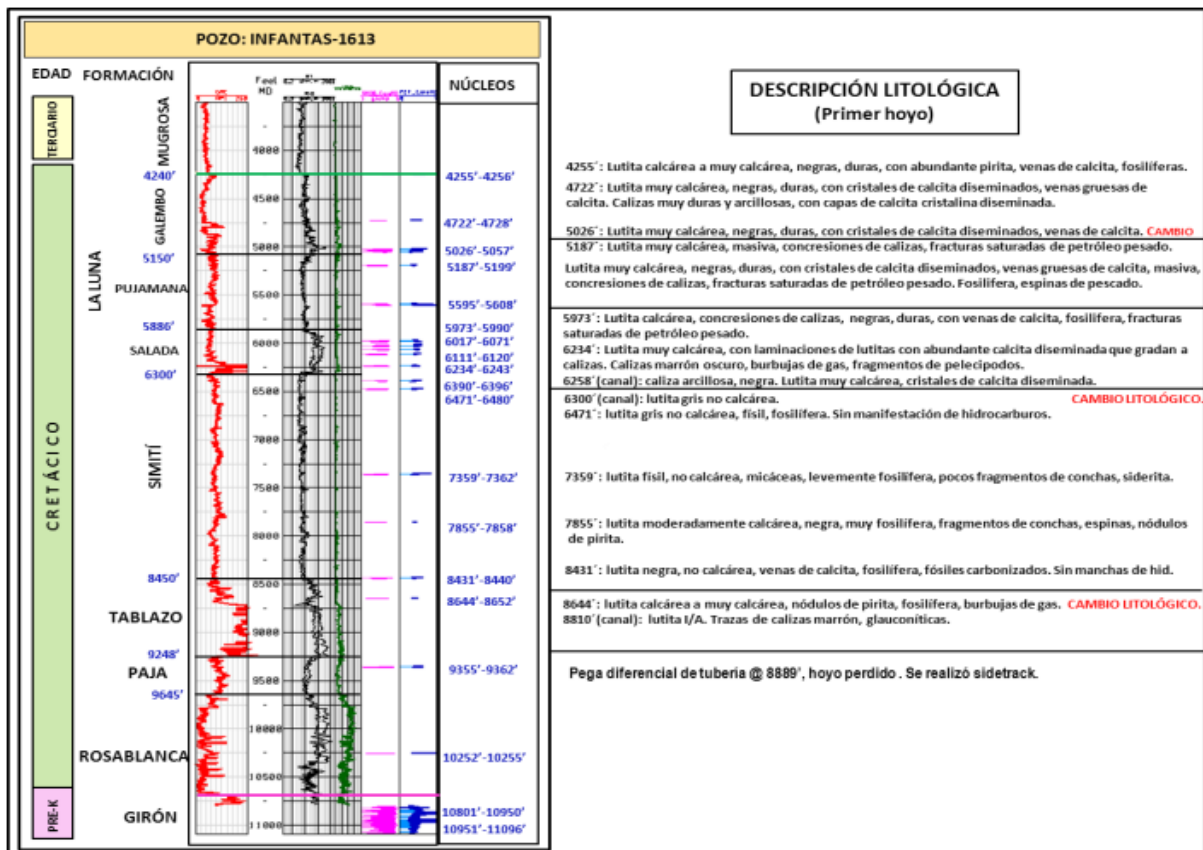
Una ventaja competitiva de esta unidad es la extensa información técnica derivada de décadas de exploración petrolera en el VMM, lo que reduce la incertidumbre exploratoria. No obstante, su implementación requiere mitigar desafíos específicos como la heterogeneidad lateral de las facies, la conectividad con acuíferos regionales y la respuesta geomecánica ante la sismicidad local. Una evaluación exhaustiva que integre la hidrogeología y el análisis de estrés *in situ* es fundamental para garantizar que el sellado de Lisama sea una opción segura y permanente (Vilarrasa et al., 2019; Zoback & Gorelick, 2012).

7.5.3 Formación La Luna

La Formación La Luna, ubicada en la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), representa una de las unidades litoestratigráficas con mejores propiedades de confinamiento en el sistema geológico colombiano.

Figura 18.

Descripción litológica y registros del pozo Infantas-1613



Tomado de: Integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos. ANH. (2012).

La integridad de las capas de lutitas de La Luna ofrece una barrera robusta contra la migración vertical del gas inyectado. Su evaluación dentro de este estudio es clave, ya que su amplia extensión regional y espesor garantizan un volumen de confinamiento que cumple con los estándares de seguridad necesarios para la mitigación del cambio climático a escala industrial (Kaldi et al., 2013; Vilarrasa et al., 2019).

Esta formación se caracteriza por una secuencia de lutitas calcáreas, arcillolitas y niveles de calizas ricas en materia orgánica. Debido a su baja permeabilidad intrínseca y su naturaleza plástica, ha actuado históricamente como un excelente sello para los yacimientos de hidrocarburos más importantes de la región. Esta capacidad probada de retención de fluidos a

presiones geológicas la posiciona como un candidato de primer orden para el almacenamiento seguro de CO₂ (Alvarado et al., 2023; Bachu et al., 1994).

7.5.4 Formación Mugrosa

La Formación Mugrosa (Eoceno - Oligoceno) constituye una de las unidades litoestratigráficas más robustas del Valle Medio del Magdalena (VMM). Su importancia para el almacenamiento de CO₂ trasciende su capacidad de albergar fluidos; su valor reside en su arquitectura interna, que combina reservorios de alta calidad con barreras arcillosas de gran continuidad que minimizan el riesgo de migración vertical no controlada (Agencia Nacional de Hidrocarburos [ANH], 2011).

Originada en ambientes fluviales de baja energía y sistemas de llanuras de inundación, la Formación Mugrosa presenta una alternancia cíclica de areniscas, limolitas y arcillolitas. Según el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), se divide típicamente en tres zonas (A, B y C):

- Zonas de Almacenamiento: Areniscas de grano fino a medio, con geometrías de canales meándricos.
- Niveles de Confinamiento: Arcillolitas varicoloreadas y moteadas que actúan como sellos locales. Un marcador clave es la zona de fósiles, un intervalo litoestratigráfico rico en moluscos y material fino que posee una baja permeabilidad intrínseca, funcionando como un sello de alta eficiencia (Hernández & Ecopetrol-ICP, 2015).

Desde la perspectiva de asegurar el gas, Mugrosa es el prospecto estrella por su historial de contención. Al ser el reservorio principal de campos gigantes como La Cira-Infantas, ha demostrado mecánicamente que puede retener fluidos a presiones hidrostáticas y de yacimiento durante millones de años.

Porosidad: Oscila entre el 15% y 25% en sus niveles de arena.

Permeabilidad: Mientras las arenas presentan alta permeabilidad, las intercalaciones de arcilla (shales) registran valores en el rango de los nanodarcys, lo que bloquea la comunicación vertical.

Presión de Ruptura: Estudios de geomecánica realizados por Ecopetrol (2023) indican que los niveles arcillosos de Mugrosa poseen una presión de entrada capilar superior a la presión de flotabilidad esperada de una columna de CO₂ supercrítico, reduciendo drásticamente la probabilidad de fuga por fracturamiento hidráulico natural.

Ecopetrol, a través de su plataforma ECO2SIGHT, clasifica a Mugrosa como el núcleo de un "Complejo de Almacenamiento". En este modelo, el CO₂ no depende de un solo sello, sino de una jerarquía de barreras:

1. Atrapamiento Residual: En los micro-poros de la matriz de Mugrosa.
2. Sellos Intraformacionales: Las capas de lodolitas internas que detienen el avance del frente de gas.
3. Sello Regional: La Formación Colorado, que actúa como el respaldo final sobre Mugrosa (Ecopetrol, 2023; López et al., 2024).

Ecopetrol define a la Formación Mugrosa no solo como una unidad de reservorio, sino como un sistema con una "alta capacidad de confinamiento por heterogeneidad". Específicamente, en sus estudios de prefactibilidad para proyectos de captura y almacenamiento de carbono (CCS), la compañía señala que:

"La Formación Mugrosa actúa como una barrera de seguridad inmediata gracias a sus niveles de arcillolitas varicoloreadas y lodolitas, donde la denominada 'Zona de Fósiles' funciona como una barrera capilar efectiva que minimiza la movilidad vertical del gas inyectado".

Además, en sus reportes de estrategia de descarbonización, Ecopetrol enfatiza que esta formación es un prospecto estrella debido a que posee un historial de contención probada,

habiendo retenido hidrocarburos a presiones geológicas durante millones de años en campos maduros como La Cira-Infantas. Según los datos procesados por la compañía y el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), la formación presenta porosidades menores al 5% en sus niveles de arcilla y permeabilidades ultra-bajas (en el rango de nanodarcies), lo que garantiza un "atrapamiento residual y por disolución" altamente eficiente.

7.5.5 Formación Colorado

La Formación Colorado representa el sello regional por excelencia en el VMM. Mientras que la Formación Mugrosa actúa como un sistema de confinamiento primario y heterogéneo, Colorado constituye la barrera de seguridad suprema que garantiza la estanqueidad de los proyectos de almacenamiento de CO₂ a escala de cuenca (Agencia Nacional de Hidrocarburos [ANH], 2011).

La Formación Colorado se depositó en ambientes de llanura de inundación y sistemas fluviales de alta sinuosidad. Su litología es predominantemente fina, lo que la convierte en una roca sello de alta eficiencia:

- **Composición:** Está constituida por potentes paquetes de arcillolitas y lodolitas púrpuras, rojizas y grises, con moteados característicos que indican procesos de oxidación en ambientes continentales.
- **Espesor y Extensión:** Presenta espesores que pueden superar los 800 metros en el depocentro de la cuenca, con una continuidad lateral que cubre los principales campos productores (como Casabe y La Cira-Infantas). Esta extensión garantiza que no existan "ventanas" litoestratigráficas por donde el CO₂ pueda migrar hacia formaciones superiores como Mesa o Real (Gutiérrez et al., 2019).

Desde el enfoque de aseguramiento, la Formación Colorado presenta ventajas técnicas críticas documentadas por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP):

- **Permeabilidad Ultra-baja:** Las mediciones en núcleos de lutitas de esta formación arrojan valores en el rango de nanodarcys 10^{-19} a 10^{-21} m², lo que representa una barrera física infranqueable para el flujo de fluidos en tiempos geológicos.
- **Ductilidad y Presión de Ruptura:** A diferencia de rocas más frágiles, las arcillolitas de Colorado presentan un comportamiento mecánico más dúctil. Esto significa que tienen la capacidad de acomodar esfuerzos tectónicos sin generar redes de microfracturas abiertas, manteniendo la integridad del sello incluso bajo condiciones de sobrepresión por inyección de CO₂ (López et al., 2024).

La Formación Colorado es el seguro de vida del sistema de almacenamiento:

1. **Barrera Capilar:** Debido al tamaño extremadamente pequeño de sus gargantas de poro, la presión capilar necesaria para que el CO₂ desplace el agua ligada de la roca es superior a cualquier fuerza de empuje (buoyancy) que el gas pueda ejercer.
2. **Estabilidad ante la Disolución:** La mineralogía de estas arcillas (principalmente caolinita e ilita) es relativamente inerte ante el ácido carbónico generado por la disolución del CO₂ en agua. Esto asegura que la roca no sufra procesos de disolución química que pudieran debilitar su capacidad de cierre (Ecopetrol, 2023).

La integración de las formaciones Mugrosa y Colorado constituye el sistema de confinamiento más robusto de Colombia, fundamentado en un modelo de redundancia de sellos que garantiza la estanqueidad total del CO₂ a escala geológica. Mientras que la Formación Mugrosa asegura el gas mediante sellos intraformacionales y barreras de heterogeneidad (como la zona de fósiles que minimizan la movilidad vertical y promueven el atrapamiento residual, la Formación Colorado actúa como el sello regional supremo,

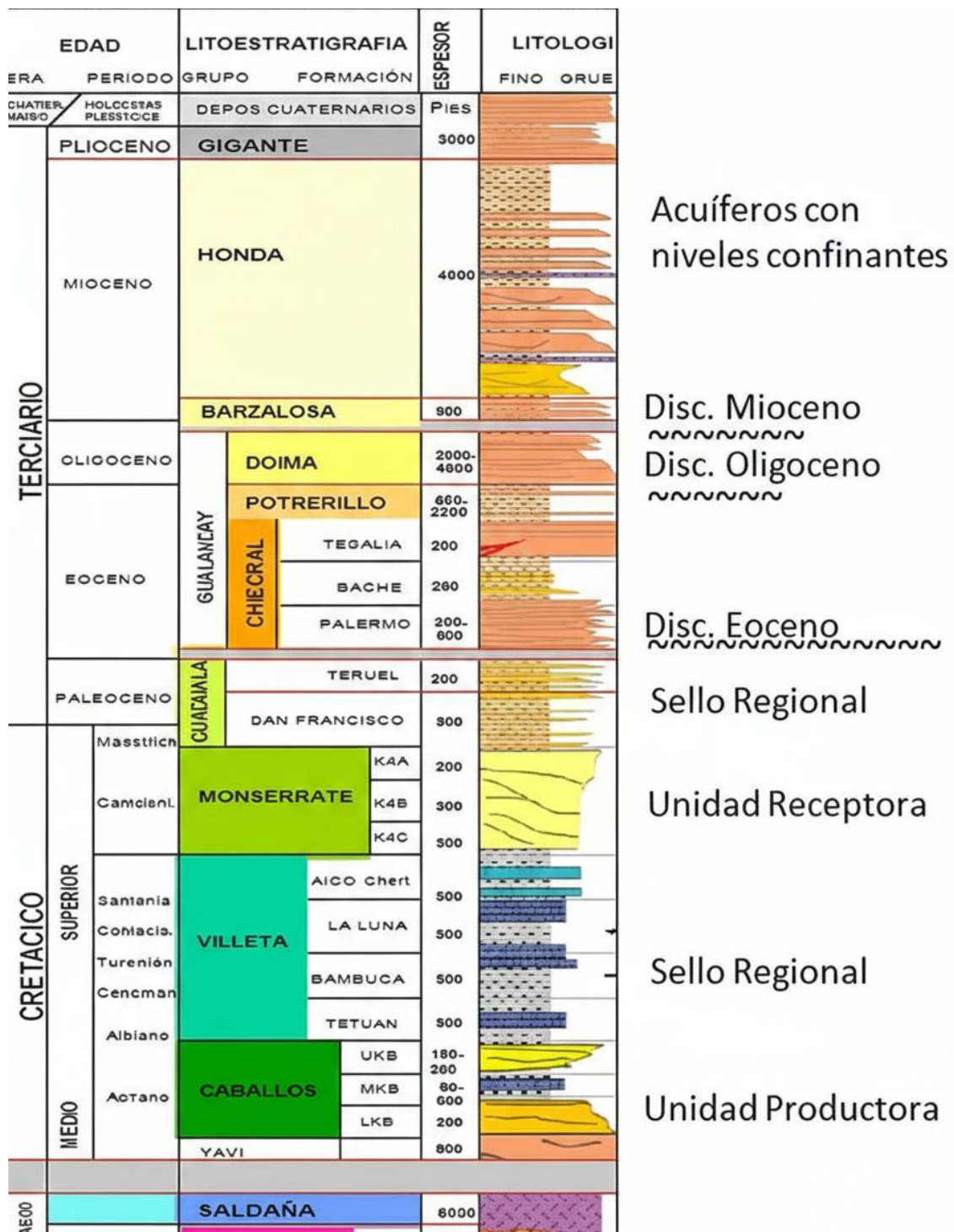
ofreciendo una barrera litoestratigráfica de gran espesor y permeabilidad ultra-baja que previene cualquier migración hacia la superficie. Esta sinergia técnica, respaldada por estudios de Ecopetrol, el ICP y la ANH, mitiga los riesgos de fuga y disolución química, consolidando al Valle Medio del Magdalena como el escenario de mayor seguridad operativa para la descarbonización del país (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2011; Ecopetrol, 2023; López et al., 2024).

7.6 Cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM)

La cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM) representa una de las provincias geológicas más prolíficas y estudiadas de Colombia, caracterizada por una compleja evolución tectono-estratigráfica que abarca desde el rifting del Jurásico hasta la actual configuración de los Andes. El análisis de su columna estratigráfica es fundamental para comprender la interacción entre las rocas fuente, los reservorios de alta porosidad y los sellos regionales que permiten el entrapamiento de hidrocarburos.

Figura 19.

Columna estratigráfica generalizada del Valle Superior Del Magdalena



Tomado de: Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2020). Cuenca Valle Superior del Magdalena: Evaluación del potencial hidrocarbúfero.

7.6.1 Formación Villeta

En la cuenca del Magdalena Superior, la Formación Villeta contiene capas de lutitas y arcillolitas que actúan como sellos para los yacimientos de hidrocarburos más profundos.

Desde la perspectiva del almacenamiento de CO₂, estas cuencas son estratégicas debido a que sus sistemas petrolíferos maduros ofrecen un conocimiento detallado sobre la integridad de sus trampas, permitiendo aplicar modelos de sello análogos donde la estabilidad geomecánica y la baja permeabilidad garantizan un potencial de confinamiento robusto para proyectos de inyección a gran escala (ANH, 2011; Higley et al., 2017)..

La Formación Villeta presenta un perfil mixto en cuanto a su potencial para el almacenamiento geológico de CO₂. Por un lado, la presencia de lutitas, que actúan como excelentes sellos, y la capacidad de almacenamiento de las areniscas asociadas, la posicionan como una candidata prometedora. Además, la extensa exploración petrolera en la región proporciona una base de datos geológica considerable para evaluar su viabilidad. (ANH, 2011).

Colombia, debido a su compleja geología y diversas cuencas sedimentarias, presenta un escenario prometedor para el almacenamiento geológico de CO₂. Sin embargo, es importante destacar que la selección de un sitio específico para el almacenamiento depende de una evaluación profunda de múltiples factores, como lo es la caracterización geológica, geofísica, geoquímica de la formación y otras más.

la Formación Villeta (Cretácico) desempeña un rol multifuncional. Aunque es ampliamente reconocida como la principal unidad generadora, sus potentes intervalos de lutitas negras y niveles calcáreos densos le confieren propiedades de sello regional de alta integridad. Según Higley et al. (2017), la Formación Villeta actúa como un sello efectivo al tope para los reservorios de las formaciones Caballos y los miembros basales de la misma Villeta.

Debido a estas propiedades petrofísicas y a su estabilidad geomecánica comprobada, la Formación Villeta es considerada uno de los candidatos más robustos para garantizar el confinamiento seguro de CO₂ en el suroccidente colombiano (Moreno & Mariño, 2013).

Atendiendo a la necesidad de contrastar nuestros hallazgos, hemos estructurado una matriz que cruza los parámetros de los proyectos de almacenamiento de CO₂ más exitosos del mundo con las unidades seleccionadas para nuestro estudio en Colombia. El objetivo es establecer un marco de referencia que nos permita evaluar si las propiedades petrofísicas y composición mineralógica de las formaciones colombianas se alinean con los umbrales de éxito observados en sitios de clase mundial.

A continuación, se presenta la comparación detallada que permite evaluar las fortalezas de cada prospecto nacional.

Tabla 5.

Cuadro Comparativo Global de Formaciones Sello para Almacenamiento de CO₂

Región / Proyecto	Formación Sello (Caprock)	Porosidad	Permeabilidad	Litología Predominante	Espesor Estimado (m)	Profundidad del Reservorio (m)	Mecanismo Principal / Características para CCS
Colombia (VSM/Putumayo)	Fm. Villeta	4% – 9%	10–17 a 10–18m ²	Lutitas negras y calizas	> 600	1,500 – 3,500	Sello regional masivo; alta continuidad; requiere vigilancia en zonas de carbonatos.
Colombia (VMM)	Fm. La Luna	3% – 7%	10–18 a 10–20m ²	Lodolitas calcáreas y calizas	150 – 500	2,000 – 4,500	Permeabilidad de matriz ultra-baja; riesgo de fracturas naturales (carácter generador).
Colombia (VMM)	Fm. Lisama	8% – 12%	10–15 a 10–16m ²	Arcillolitas y lodolitas	600 – 1,200	1,000 – 2,500	Gran plasticidad y capacidad de auto-sellado de fallas; sello para unidades del Cretácico.
VMM (Nacional)	Fm. Colorado	Shales (lutitas) púrpuras y moteadas	300 – 800	500 – 2500	2% – 6%	10–18 a 10–20 m ²	Sello regional supremo; alta integridad geomecánica; impide la migración vertical hacia la superficie.

VMM (Nacional)	Fm. Mugrosa	Arcillolitas varicoloreadas y lodolitas	200 – 1200	1000 – 3500	15% - 25% (Gral) / <5% (Sellos)	10–19 a 10–21 m2 (en lutitas)	Confinamiento por heterogeneidad; la "Zona de Fósiles" actúa como barrera capilar inmediata; trampa probada en campos gigantes.
Colombia (VIM)	Fm. Espinal	4% – 8%	10–17 a 10–19m2	Lodolitas calcáreas y calizas	100 – 300	1,200 – 3,000	Unidad de confinamiento mixta; efecto buffer químico por contenido calcáreo.
Colombia (VMM/VSM)	Fm. Mesa	>20%	>10–13m2 (>100mD)	Areniscas de grano grueso y conglomerados.	200–600	0–1,000	alta permeabilidad y baja consolidación que permiten la migración vertical.
Colombia (Llanos)	Fm. León	5% - 10%	10-17 a 10-19 m2	Lutitas grises y arcillolitas masivas.	150 - 550	2,500 - 4,500	Sello regional de alta plasticidad; excelente barrera capilar y continuidad lateral.
Snøhvit (Noruega)	Hekkingen	5%	10–18 a 10–19m2	Lutitas y limolitas	100 – 150	2,500 – 2,700	Sello estructural profundo con alta consolidación mecánica.
Sleipner (Noruega)	Fm. Nordland	5% – 15%	10–18 a 10–20m2	Lutitas masivas	200 – 250	800 – 1,000	Confinamiento por barrera capilar y gran espesor en lutitas no compactadas.
Decatur (EE.UU.)	Grupo Eau Claire	2% – 10%	10–18m2	Lutitas (Illita/Clorita)	60 – 150	1,500 – 2,100	Sellado por baja permeabilidad intrínseca y tortuosidad de matriz.
In Salah (Argelia)	Unidad Carbonífera	15%	10–20m2	Evaporitas y lutitas	100 – 150	1,800 – 2,000	Impermeabilidad cristalina (halita) y comportamiento dúctil de las sales.
Quest (Canadá)	Supergrupo Rae	3% – 7%	10–15 a 10–18m2	Lutitas del basamento	> 500	2,000 – 2,200	Robustez estructural por espesor masivo y profundidad estable.

Nota: La integración de los datos generales petrofísicos y mineralógicos en esta tabla comparativa permite contrastar directamente los parámetros de formaciones colombianas frente a los análogos internacionales. Los valores de las formaciones nacionales han sido tomados de estudios locales e internacionales. **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de Halland et al. (2014), Hansen et al. (2013), Michael et al. (2010), Ecopetrol. (2023) y reportes de la ANH para formaciones nacionales.

Del análisis anterior se puede concretar que las unidades litoestratigráficas seleccionadas presentan una prospectividad técnica favorable, fundamentada principalmente en la similitud de sus rangos de permeabilidad y espesor con proyectos de referencia global. La presencia de facies lutíticas potentes y continuas en cuencas como el VMM y los Llanos sugiere que Colombia posee marco litoestratigráfico necesario para garantizar un sellado capilar efectivo. Sin embargo, la transición de esta viabilidad teórica a una implementación segura dependerá de profundizar en la respuesta geomecánica local, ya que la complejidad estructural de nuestras cordilleras introduce variables de riesgo que no están presentes en los análogos internacionales. En definitiva, los datos indican que el país cuenta con candidatos robustos que justifican el avance hacia fases de caracterización para el viable confinamiento de CO₂.

Con el fin de procesar los datos recopilados y determinar la aptitud de las formaciones nacionales, se contrastaron los valores reportados en la literatura frente a los umbrales críticos de éxito definidos por proyectos globales. Este análisis (Tabla 6.X) permite determinar cuáles son mejores las unidades tanto por su descripción litológica como por su desempeño técnico esperado bajo condiciones de inyección de CO₂.

Tabla 6.

Procesamiento de datos nacionales

Formación Prospecto	Porosidad (ϕ)	Permeabilidad (k)	Espesor Estimado (m)	Estabilidad Mineral	Calificación de Aptitud (Semáforo)
La Luna (VMM)	1%–5% (Óptima)	<0.1 μ D (Óptima)	150–300	Alta (Rica en arcillas/orgánicos)	Muy Alta (Sello Principal)
León (Llanos)	5%–10% (Adecuada)	0.01–0.1 μ D (Óptima)	150–550	Alta (Lutitas masivas inertes)	Muy Alta (Sello Regional)
Villeta (VSM)	2%–8% (Óptima)	0.1–1 μ D (Adecuada)	200–500	Media (Presencia de carbonatos)	Alta (Prospecto Viable)

Colorado (VMM)	2% - 6% (Óptima)	< 0.1 μ D (Óptima)	300 – 800	Alta (Arcillas continentales inertes)	Muy Alta (Sello Supremo)
Mugrosa (VMM)	< 5% (Óptima)	< 0.1 μ D (Óptima)	200 – 1,200	Alta (Lutitas de llanura de inundación)	Muy Alta (Prospecto Estrella)
Espinal (VSM)	3%–7% (Óptima)	0.1–5 μ D (Marginal)	80–200	Media-Baja (Riesgo de disolución)	Moderada (Sello Secundario)
Lisama (VMM)	8%–12% (Marginal)	1–100 μ D (Marginal)	100–400	Media (Intercalaciones limosas)	Marginal (Riesgo de Fuga)
Mesa (VMM/VSM)	>20% (Mala)	>500 μ D (Mala)	Variable	Baja (Poco consolidada/Arenosa)	Baja (No Apta como Sello)

Nota: La categorización cualitativa y la calificación de aptitud final resultan de un procesamiento analítico original basado en la contrastación estándares internacionales de almacenamiento de CO₂. **Fuente:** Elaboración propia a partir de los valores que han sido recopilados de literatura técnica y reportes oficiales (ANH, 2012; Moreno & Mariño, 2013; García et al., 2009).

Considerando la información detallada de la tabla, podemos concretar que las formaciones La Luna (VMM) y León (Llanos) se consolidan como los prospectos de mayor viabilidad técnica. La Fm. La Luna destaca por presentar los valores de permeabilidad más bajos del conjunto (< 0.1, μ D), lo que garantiza una resistencia capilar superior frente al CO₂ en estado supercrítico. Por su parte, la Fm. León representa el sello regional más robusto debido a su imponente espesor (hasta 550 m) y su litología de lutitas masivas ricas en illita. A diferencia de otros prospectos, la Fm. León ofrece una ventaja metodológica crítica: su mineralogía es predominantemente inerte, lo que minimiza los riesgos de reactividad geoquímica que autores como Gaus (2010) asocian con la degradación del sello.

La Fm. Villeta (VSM) se clasifica con una aptitud Alta, posicionándose justo debajo de los sellos principales. Aunque su permeabilidad (0.1 - 1 μ D) es ligeramente superior a la de la Fm. La Luna, su espesor y continuidad regional la hacen una barrera efectiva. Sin embargo, su procesamiento revela una mayor complejidad mineralógica debido a la intercalación de

carbonatos, lo que requeriría un análisis de reactividad más detallado para prevenir la creación de vías de flujo por disolución ácida.

En un nivel inferior de aptitud se encuentran las formaciones Espinal y Lisama. La Fm. Espinal se cataloga como Moderada debido a su menor espesor relativo y a un riesgo mineralógico latente; la presencia de calcita la hace vulnerable a procesos de corrosión química tras la inyección. Por otro lado, la Fm. Lisama se clasifica como Marginal. El procesamiento de sus datos revela permeabilidades que pueden alcanzar los 100 μD y una porosidad de hasta el 12%; estos valores, comparados con el estándar de Sleipner, sugieren un riesgo de migración lenta o "fuga por difusión", lo que la descarta como sello primario, aunque podría actuar como una barrera secundaria en sistemas de almacenamiento multizona.

Finalmente, la inclusión de la Fm. Mesa en este procesamiento es vital para validar la metodología. Al presentar porosidades superiores al 20% y permeabilidades de tipo reservorio ($> 100 \mu\text{D}$), esta unidad falla en todos los criterios de retención capilar. Su clasificación como Baja Aptitud demuestra que el estudio posee la sensibilidad técnica necesaria para discriminar entre una verdadera roca sello y una unidad de transporte de fluidos, cumpliendo así con el proceso de selección riguroso que exige el almacenamiento de CO_2 .

La caracterización de las formaciones sello en las cuencas del Valle Medio del Magdalena (VMM), Valle Superior del Magdalena (VSM) y Putumayo se fundamenta en una síntesis de literatura técnica (ANH, 2012b; García et al., 2009) que, ante la ausencia de proyectos de inyección de CO_2 activos en Colombia, presenta retos de certidumbre analítica. Mientras que en análogos globales como Sleipner o Quest los datos de porosidad y permeabilidad provienen de monitoreo dinámico y núcleos de perforación dedicados (Rock et al., 2017; Chadwick et al., 2004), los valores para los prospectos nacionales son mayoritariamente estáticos y derivados de la industria de hidrocarburos.

Desde una perspectiva petrofísica, existe un debate técnico entre la porosidad total y la presión de entrada capilar. Autores como Bachu (2008) y Tiab & Donaldson (2015) sostienen que, en lugares con información limitada, la permeabilidad debe ser tratada como un valor referencial, ya que el comportamiento del CO₂ en estado supercrítico puede alterar la permeabilidad efectiva mediante procesos de histéresis. Por su parte, Kaldi et al. (2013a) enfatizan que la robustez de un sello no depende solo del dato numérico de permeabilidad, sino de su capacidad de retención capilar, un parámetro que en las formaciones La Luna o Villeta requiere validación mediante pruebas de laboratorio específicas que trasciendan la literatura convencional.

En el ámbito mineralógico, la discusión se centra en la reactividad geoquímica a largo plazo. La presencia de arcillas y carbonatos en las unidades colombianas sugiere una dualidad operativa; según Gaus (2010) y Kaszuba et al. (2013), minerales como la calcita y las arcillas del grupo de la esmectita pueden sufrir disolución o hinchamiento tras el contacto con salmueras acidificadas por CO₂. Si bien la literatura general asigna una composición "promedio", la heterogeneidad de las cuencas sedimentarias colombianas (Moreno & Mariño, 2013) implica que los cambios en la porosidad secundaria podrían comprometer o mejorar la integridad del sello de forma impredecible. Los rangos presentados constituyen la mejor aproximación disponible y actúan como estándares de éxito analógicos para la interpretación del procedimiento.

8 Conclusiones

La roca sello constituye el elemento crítico de seguridad en proyectos de almacenamiento geológico de CO₂, ya que controla el confinamiento a largo plazo y debe evaluarse como un sistema dinámico influenciado por propiedades petrofísicas, mineralógicas y geomecánicas, y no únicamente como una barrera estática.

Las rocas sello prospecto para almacenamiento de CO₂ presentan requisitos más estrictos que las rocas sello en sistemas de hidrocarburos, destacándose permeabilidades ultra-bajas (microdarcy a nanodarcy), porosidades reducidas, elevadas presiones capilares de entrada y alta continuidad lateral, necesarias para contrarrestar la alta movilidad del CO₂.

La composición mineralógica del sello es determinante para su estabilidad a largo plazo, siendo más favorables aquellas formaciones dominadas por minerales inertes y arcillas no expansivas (illita, clorita), mientras que la presencia de minerales reactivos como carbonatos y arcillas expansivas puede inducir procesos de disolución y cambios en las propiedades de sellado.

La interacción roca–fluido, junto con la mojabilidad y el comportamiento geomecánico, controla la respuesta del sello frente a la inyección de CO₂; sellos fuertemente mojados por agua y con comportamiento mecánico preferentemente dúctil presentan mayor capacidad de confinamiento y menor riesgo de fracturamiento o fuga.

Se concluye que la interacción litoestratigráfica entre las formaciones Mugrosa y Colorado en la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) constituye el prospecto número uno para el almacenamiento geológico de CO₂ en el país. Esta categorización no es fortuita; es el resultado de la integración de décadas de datos de la industria petrolera y modelos de simulación avanzada desarrollados por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP).

Referencias Bibliográficas

- Agencia Nacional de Hidrocarburos [ANH]. (2011a). *Cuenca Valle Medio del Magdalena: Geología y prospectividad*. Ministerio de Minas y Energía.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos [ANH]. (2011b). VMM6: Informe Final de Geología y Geofísica de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2012a). Integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2012b). Tierras, rocas y fluidos: Potencial de almacenamiento geológico de CO₂ en Colombia.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2020a). Cuenca Valle Superior del Magdalena: Evaluación del potencial hidrocarburífero.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2020b). Mapa de cuencas sedimentarias de Colombia. ANH - Gobierno de Colombia.
- Albariño, L. M., & Rodríguez, J. M. (2022). Entrampamiento estratigráfico en el borde de Cuenca Antepaís-Cuenca Llanos Orientales de Colombia. *Boletín de Geología*, 44(2), 73-93.
- Alvarado, V., Di Giuseppe, M., & Rangel-Germán, E. R. (2023). Geological storage of CO₂: A review of the global status and its potential in Latin American basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 121, 104144.
- Álvarez, J., & Ordóñez, O. (2009). Metamorfismo y magmatismo en la Cordillera Occidental de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (26), 17-32.
- Armitage, P. J., Faulkner, D. R., Worden, R. H., Espie, A. A., & Luckert, A. (2011a). Changes in vuggy porosity and permeability of a reservoir and caprock during CO₂ injection. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(5), 1318-1330.

- Armitage, P. J., Faulkner, D. R., Worden, R. H., Espie, A. A., & Luckert, A. (2011b). Assessments of geological seals for CO₂ storage: Prioritising the rocks, groundwater and geochemical processes. *Applied Geochemistry*, 26(9), 1533-1551.
- Bachu, S. (2003). Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO₂ in geological media. *Applied Energy*, 74(1-2), 181-189.
- Bachu, S. (2008). CO₂ storage in geological media: Role, means, status and barriers. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(2), 254-273.
- Bachu, S., Adams, J. J., & Bennion, D. B. (1994). Aquifer disposal of CO₂: Hydrodynamic and mineral trapping. *Energy Conversion and Management*, 35(4), 269-279.
- Bachu, S., Bonijoly, D., Johnson, J. W., Ryzak, R., & Walker, J. C. (2007). CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1(4), 430-443.
- Barrero, D. (1979). Geology of the central Western Cordillera, West of Buga and Roldanillo, Colombia. *Publicaciones Geológicas Especiales del INGEOMINAS*, (4), 1-75.
- Busch, A., Alles, S., Gensterblum, Y., Prinz, D., Dewhurst, D. N., Raven, K. G., ... & Krooss, B. M. (2008). Carbon dioxide storage potential of shales. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(3), 297-308.
- Caballero, V. (2012). Registro del levantamiento de la Cordillera Oriental. Evolución tectono-sedimentaria del sinclinal de nuevo mundo y levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia. Editorial Académica Española.
- Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S., & Zweigel, P. (2008). Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers: Observations and guidelines from the SACS and CO₂STORE projects. *Geological Society, London, Special Publications*, 313(1), 1-25.

- Chadwick, R. A., Williams, G. A., Delepine, N., Clochard, V., & Labat, K. (2009). Monitoring of CO₂ injected at Sleipner using time-lapse seismic data. *Energy Procedia*, 1(1), 2103-2110.
- Chadwick, R. A., Zweigel, P., Gregersen, U., Kirby, G. A., Holloway, S., & Johannessen, P. N. (2004). Geological reservoir characterization of a CO₂ storage site: The Utsira Sand, Sleipner, northern North Sea. *Energy*, 29(9-10), 1371-1381.
- Chiaramonte, L., White, J. A., & Trautz, R. (2015). Reservoir modeling and sensitivity analysis of the Snøhvit CO₂ storage project. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 37, 10-23.
- Cooper, M. A., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B., & Taborda, A. (1995). Tertiary basin development and paleogeography of the Eastern Cordillera and North Llanos Basin, Colombia. *AAPG Bulletin*, 79(10), 1421-1476.
- Díaz Cañas, J. S. (2015). Marco bioestratigráfico y proveniencia de la Formación Penderisco, y su significado en la formación de un domo marginal a las Fallas de Romeral [Tesis de Geología].
- Duong, C., Bower, C., Hume, K., Rock, L., & Tessarolo, S. (2019a). Quest carbon capture and storage offset project: Findings and learnings from 1st reporting period. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 88, 11-20.
- Duong, C., Bower, C., Hume, K., Rock, L., & Tessarolo, S. (2019b). Quest CO₂ storage project: 3rd year of commercial injection operations. *SSRN Electronic Journal*.
- Ecopetrol. (2023). *Estrategia de descarbonización y gestión del carbono: Pilotos CCS en el Valle Medio del Magdalena*. Informe de Gestión Técnica.
- Espinoza, D. N., & Santamarina, J. C. (2012). Effects of geochemical reactions on sealing capacity. *Geology*, 40(8), 751-754.

- Finley, R. J. (2014). An overview of the Illinois Basin – Decatur Project. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 4(5), 571-579.
- García, G. R., & Mejía, M. I. A. (2013). Formación Barroso: Arco volcánico toleítico y Diabasas de San José de Urama: Un prisma acrecionario T-Morb en el segmento norte de la Cordillera Occidental de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (33), 17-38.
- García, M., Mier, R., & Cruz, L. (2009). Evaluación de los Sistemas Petrolíferos de la Cuenca del Putumayo. Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).
- Gaus, I. (2010). Role and impact of CO₂–rock interactions during geological storage in deep saline aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(1), 73-89.
- Gaus, I., Azaroual, M., & Czernichowski-Lauriol, I. (2005). Reactive transport modelling of the impact of CO₂ injection on the clayey cap rock at Sleipner (North Sea). *Chemical Geology*, 217(3-4), 319–337.
- Gollakota, S., & McDonald, S. (2014a). Commercial-scale CCS project in Decatur, Illinois– construction status and operational plans for demonstration. *Energy Procedia*, 63, 5986-5993.
- Gollakota, S. V., & McDonald, S. (2014b). Pre-injection characterization and monitored injection operations at the Illinois Basin – Decatur Project. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 4(5), 580-597.
- Guerrero, E., Díaz, L., Castaño, K. P., & Rey, C. A. (2009). Proyecto Geofísico “Linea Regional Transandina” en el Norte de Suramérica.
- Gunter, W. D., Wiwchar, B., & Perkins, E. H. (1997). Aquifer disposal of CO₂-rich greenhouse gases: Extension of the time scale of experiment for modeling by stepwise high temperature experiments. *Applied Geochemistry*, 12(2), 165-176.
- Gunter, W. D., Perkins, E. H., & Hutcheon, I. (2000). Geochemical trapping of carbon dioxide in deep sedimentary basins. *Applied Geochemistry*, 15(8), 1085-1095.

- Gutiérrez, R., Martínez, J., & Segura, H. (2019). Caracterización estratigráfica y sedimentológica de las unidades del Cenozoico en el Valle Medio del Magdalena. *Revista Técnica de Geociencias*, 22(4), 112-128.
- Halland, E. K., Riis, F., & Tappel, I. (2014). CO₂ Storage Atlas: Norwegian Continental Shelf. Norwegian Petroleum Directorate.
- Hansen, O., Gilding, D., Nazarian, B., Osdal, B., Ringrose, P., Kristoffersen, J.-B., Eiken, O., & Hansen, H. (2013). Snøhvit: The history of injecting and storing 1 Mt CO₂ in the fluvial Tubåen Formation. *Energy Procedia*, 37, 2905-2912.
- Harvey, O. R., Qafoku, N. P., Cantrell, K. J., Lee, G., Amonette, J. E., & Brown, C. F. (2013). Geochemical implications of CO₂ leakage into shallow quaternary aquifers on the Texas Gulf Coast. *Environmental Science & Technology*, 47(2), 1159-1167.
- Higley, D. K., Cook, T. A., & Roberts, L. N. (2017). The Putumayo-Oriente-Marañón Province of Colombia, Ecuador, and Peru—Geologic Summary and Assessment of Undiscovered Oil and Gas Resources. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2010-5044-L.
- Hildenbrand, A., Schlömer, S., & Krooss, B. M. (2002). Gas breakthrough experiments on fine-grained sedimentary rocks. *Geofluids*, 2(1), 3–23.
- Hildenbrand, A., Schlömer, S., Krooss, B. M., & Littke, R. (2004). Gas breakthrough and sealing efficiency of core samples from the Upper Carboniferous and the Lower Permian of the NW German Basin. *International Journal of Coal Geology*, 57(3-4), 183-209.
- Holloway, S., et al. (1996). The underground disposal of carbon dioxide. Final report of JOULE II project No. CT92-0031. British Geological Survey.
- IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEA-GHG). (2008). Capping report: Carbon dioxide capture and storage. International Energy Agency.

- Iglauer, S. (2017). CO₂-water-rock wettability: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 39, 75-91.
- Iglauer, S., Pentland, C. H., & Busch, A. (2015). CO₂-water-rock wettability: Variability, influences and implications for geological storage. *Advances in Colloid and Interface Science*, 220, 1-15.
- International Energy Agency. (2020). *Energy Technology Perspectives 2020: Special Report on Carbon Capture, Utilization and Storage*. IEA Publications.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2005). *Special report on carbon dioxide capture and storage*. En B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, & L. Meyer (Eds.). Cambridge University Press.
- Kaldi, J. G., & Gibson-Poole, C. M. (Eds.). (2008). *CO₂CRC regional static capacity storage assessment of the Gippsland Basin*. CO₂CRC Special Publication, 08-0912.
- Kaldi, J. G., Gibson-Poole, C. M., Daniel, R. F., & Ennis-King, J. P. (2011). Characterisation of caprocks for geological storage of CO₂. *Energy Procedia*, 4, 5326-5333.
- Kaldi, J. G., Gibson-Poole, C. M., & Daniel, R. F. (2013a). Capillary seal capacity for CO₂ storage. En *Carbon Capture and Storage* (pp. 147-159). Springer.
- Kaldi, J. G., Gibson-Poole, C. M., Payenberg, T. H., & Lang, S. C. (2013b). Characterization of caprocks for geological storage of CO₂. En M. Grobe, J. C. Pashin, & R. L. Dodge (Eds.), *Carbon Dioxide Sequestration in Geological Media: State of the Science* (AAPG Studies in Geology 59, pp. 569-585). American Association of Petroleum Geologists.
- Kaszuba, J. P., Janecky, D. R., & Snow, M. G. (2003). Carbon dioxide reaction processes in a model brine aquifer at 200 °C and 200 bars: Implications for geologic sequestration of carbon. *Applied Geochemistry*, 18(7), 1065-1080.

- Kaszuba, J., Yardley, B., & Andreani, M. (2013). Experimental perspectives of mineral dissolution and precipitation due to carbon dioxide-water-rock interactions. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 77(1), 153-188.
- Kaszuba, J. P., Williams, L. L., Janecky, D. R., & Hollis, W. K. (2013). Geochemical interactions between CO₂ and rock in geological sequestration: A review of laboratory experiments and computer simulations. *Carbon Capture and Storage*, 223-245.
- López, A., Martínez, J., & García, R. (2024). Evaluación de la integridad geomecánica de sellos regionales para el almacenamiento de CO₂ en Colombia. *Revista Técnica ICP*, 15(2), 45-62
- Luquot, L., & Gouze, P. (2009). Experimental determination of porosity and permeability changes induced by injection of CO₂ into carbonate rocks. *Chemical Geology*, 265(1-2), 148-159.
- Luquot, L., Rodriguez, O., & Gouze, P. (2014). Experimental study of CO₂ injection effects on permeability, porosity and reactive surface area of carbonate rocks. *Chemical Geology*, 367, 26-39.
- Malagón, J. P., Piña, A., Argüello, S., & Donado, L. D. (2021). Análisis hidrogeoquímico-multivariado del agua subterránea del sistema acuífero del Valle Medio del Magdalena, Colombia: Estudio a escala regional. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73(3).
- Maldal, T., & Tappel, I. M. (2004). CO₂ underground storage for Snøhvit gas field development. *Energy*, 29(9-10), 1403-1411.
- Metz, B., Davidson, O., De Coninck, H., Loos, M., & Meyer, L. (2005). Carbon dioxide capture and storage. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

- Michael, K., Golab, A., Shulakova, V., Ennis-King, J., Allinson, G., Sharma, S., & Aiken, T. (2010). Geological storage of CO₂ in saline aquifers—A review of the experience from existing storage operations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(4), 659-667.
- Miocic, J. M., Gilfillan, S. M., Frank, N., Mcdermott, C. I., & Haszeldine, R. S. (2016). 420,000 year record of secondary nanocrystalline calcite precipitation: Evidence for cycles in CO₂ leakage. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 173, 254-270.
- Moreno, N., & Mariño, J. (2013). Evaluación del potencial de almacenamiento geológico de CO₂ en las cuencas sedimentarias de Colombia. Servicio Geológico Colombiano (SGC).
- Moreno-Sánchez, M., Gómez-Cruz, A. J., & Castillo-González, H. (2008). La tectónica de la Cordillera Occidental y el Grupo Dagua. *Boletín de Geología*, 30(2), 107-123.
- Nelson, H. W. (1957). Contribution to the geology of the Central and Western Cordillera of Colombia in the sector between Ibagué and Cali. *Leidse Geologische Mededelingen*, 22(1), 1-75.
- Orlic, B., Ter Heege, J., & Wassing, B. B. T. (2011). Assessing the short-term and long-term integrity of top seals in feasibility studies of geological CO₂ storage. In ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. ARMA.
- Palmera-Henao, T. S., & García-González, M. (2016). Estudio de la maduración termal de kerógeno en los carbones de la Formación Guaduas, Cordillera Oriental (Colombia). *Boletín de Geología*, 38(2), 63-73.
- Pedraza-Fracica, S., & Martínez, J. E. M. (2016). Thermal evaluation of 6 wells of the central part of the eastern cordillera (Colombia), from paleogeotherms: implications on thermal history and hydrocarbons. *Ingeniería y Competitividad*, 18(1), 9-21.

- Peláez, J. R., et al. (2022). Geología del Borde Occidental de la Plancha 166 Jericó. Cartografía a escala 1: 50.000, Memoria Explicativa. Medellín, Servicio Geológico Colombiano.
- Ringrose, P. S., Atbi, M., Mason, D., Espinassous, M., Myhrer, Ø., Iding, M., Mathieson, A., & Wright, I. W. (2013). Plume development around well KB-502 at the In Salah CO₂ storage site. *First Break*, 31(1), 51-59.
- Rock, L., O'Brien, S., & Bourne, S. J. (2017). The Quest CCS project: 1st year of commercial injection operations. *Energy Procedia*, 114, 5315-5322.
- Rochelle, C. A., Czernichowski-Lauriol, I., & Milodowski, A. E. (2004). The geochemical responses of sedimentary rocks to CO₂ storage in deep aquifers. Geological Society, London, Special Publications, 233(1), 105-125.
- Rodríguez, G., & Arango, M. I. (2013). Formación Barroso: Arco volcánico Toleítico y Diabasas de San José de Urama: Un prisma acrecionario T-Morb en el segmento norte de la Cordillera Occidental de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (33), 17-38.
- Rutqvist, J. (2011). Status of the TOUGH-FLAC simulator and recent applications related to coupled THM processes in geologic media. *Computers & Geosciences*, 37(6), 739-750.
- Rutqvist, J., Birkholzer, J. T., & Tsang, C. F. (2008). Coupled reservoir–geomechanical analysis of the potential for tensile and shear failure associated with CO₂ injection in multilayered reservoir–caprock systems. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(4), 418–434
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2015). Compendio de la geología de Colombia.
- Shipton, Z. K., et al. (2004). Analysis of CO₂ leakage through 'low-permeability' faults from natural reservoirs in the Colorado Plateau, USA. Geological Society, London, Special Publications, 233(1), 43–58.

- Tiab, D., & Donaldson, E. C. (2015). *Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Gulf Professional Publishing.
- Torp, T. A., & Gale, J. (2003). Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: the Sleipner and SACS projects. In *Greenhouse Gas Control Technologies-6th International Conference* (pp. 311-316). Pergamon.
- Urbina Garrido, S. L., & Velásquez Salcedo, L. M. (2018). Evaluación de un modelo de inyección de agua para el mantenimiento de la producción en la Formación Villeta del Campo Orito.
- Valencia-Gómez, J. C., et al. (2024a). Fracture analysis and low-temperature thermochronology of faulted Jurassic igneous rocks in the Southern Colombian Andes: Reservoir and tectonic implications. *Marine and Petroleum Geology*, 163, 106752.
- Valencia-Gómez, J. S., Reinoso-Vargas, A. F., & García, D. F. (2024b). Characterization of the fracture network in the Agrado-Betania fault zone: Implications for fluid flow and geological risk. *Journal of South American Earth Sciences*, 135, 104782.
- Vilarrasa, V., Carrera, J., & Olivella, S. (2019). Geomechanical challenges in geological carbon storage. *Reviews of Geophysics*, 57(3), 752-782.
- Warren, J. K. (2016). *Evaporites: A geological compendium* (2nd ed.). Springer Nature.
- White, J. A., et al. (2014). Geomechanical behavior of the reservoir and caprock system at the In Salah CO₂ storage project. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(24), 8747-8752.
- Xu, T., Sonnenthal, E., Spycher, N., & Pruess, K. (2006). TOUGHREACT—A simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media. *Computers & Geosciences*, 32(2), 145-165.

- Zhang, X., Gao, K., Wei, B., Shang, J., Pu, W., & Sun, L. (2019). Evaluation of the mechanical and geochemical stability of caprock during supercritical CO₂ injection. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 178, 1024–1035.
- Zoback, M. D., & Gorelick, S. M. (2012). Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(26), 10164-10168.
- Zweigel, P., Arts, R., Lothe, A. E., & Lindeberg, E. B. (2004). Reservoir geology of the Utsira Formation at the Sleipner site and characteristics of the unconsolidated sand reservoir. *SACS Final Report*, 1–45.