

Análisis del efecto de la inyección de CO₂ sobre la interacción química y características morfológicas de una roca almacén representativa del Valle Medio del Magdalena

César Augusto Sierra Reyes

Trabajo de grado para optar al título de geólogo

Director

Carlos Alberto Villarreal Jaimes

Geólogo, MSc en Energías renovables

Codirectora

Luz Yolanda Vargas Fiallo

Química, MSc en química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Geología

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

Agradezco principalmente mi familia, por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A mis gatos, que son un pilar fundamental y fuente de motivación para todo lo que hago.

A mi director Carlos Villarreal, por su guía, confianza y apoyo a lo largo del proceso investigativo.

A los profesionales, técnicos y personal administrativo del Parque Tecnológico de Guatiguará, cuya colaboración fue esencial para el desarrollo y montaje experimental de este proyecto.

Y a mis amigos y personas cercanas, que me han acompañado y aportado a mi crecimiento personal y profesional a lo largo de esta carrera.

Tabla de contenido

Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos	13
2. Marco teórico y estado del arte	13
2.1 Cambio climático y emisiones de CO ₂	13
2.2. Almacenamiento geológico de CO ₂	15
2.3 Estudios previos relevantes	17
2.4 Análisis en recobro mejorado	24
2.5 Observaciones adicionales	27
3. Geología regional	28
3.1 Valle Medio del Magdalena	28
3.2 Sinclinal de Nuevo Mundo	33
3.3 Formación Esmeraldas	35
3.4 Formación Mugrosa	36
3.5 Localización de las muestras	38
4. Metodología	39
5. Caracterización inicial de las muestras	41
6. Resultados	48

6.1 Análisis cualitativo.....	50
6.2 Análisis cuantitativo (DRX).....	60
6.3. Interpretación de los datos	79
7. Discusión y recomendaciones.....	85
8. Conclusiones.....	88
Referencias bibliográficas.....	89

Lista de figuras

Figura 1. Mediciones de CO ₂ atmosférico desde hace 800.000 años hasta hoy (NASA, 2024).	14
Figura 2. Esquema general del concepto de captura y almacenamiento de carbono. Tomado y modificado de (J. Li et al., 2019).....	16
Figura 3. Interacciones geoquímicas durante la inyección de CO ₂ en un acuífero salino. Tomado y modificado de (Xu et al., 2017).	18
Figura 4. Desprendimiento de la matriz arcillosa intergranular y eliminación parcial de la muestra de areniscas debido al aporte de CO ₂ supercrítico (Berrezueta et al., 2013).	20
Figura 5. (A) Cambio en la permeabilidad de la arenisca en función del tiempo de inyección de dead brine y la velocidad de inyección. (B) Cambio en la permeabilidad de la arenisca en función del tiempo de inyección de live brine y la velocidad de inyección (Iglauer et al., 2014).	23
Figura 6. Modelo de elementos discretos de la capa de roca de anhidrita a) antes de la reacción con CO ₂ y b) después de 50,000 años de exposición a fluidos ricos en CO ₂ (Orlic et al., 2011).	27
Figura 7. Localización de la cuenca Valle Medio del Magdalena (Barrero et al., 2007).....	30
Figura 8. Columna estratigráfica generalizada del Valle Medio del Magdalena (Madero et al., 2010).	31
Figura 9. Área de interés para el almacenamiento de CO ₂	33
Figura 10. Sinclinal de nuevo mundo (Ward et al., 1977).	34
Figura 11. a) Afloramiento de la Formación Mugrosa, paquetes arenosos pierden espesor lateralmente. b) Afloramiento Formación Mugrosa, estratificación cruzada en artesa. Tomado y modificado de Madero, Rueda, Ortiz, y Colegial (2010).	36

Figura 12. Columnas de los afloramientos de la base de la Formación Mugrosa (Quintero et al., 2010).	37
Figura 13. Imagen satelital y localización de puntos de muestreo en el área de estudio.....	38
Figura 14. Puntos de recolección de las muestras.	42
Figura 15. Plug de la muestra M301-B.....	42
Figura 16. Plug de la muestra M302.....	44
Figura 17. Plug de la muestra M303-A.....	46
Figura 18. Plug cortado de M303A después de ser saturado con inyección de salmuera.	47
Figura 19. Afloramiento de recolección de M303-A.....	47
Figura 20. Ejemplo espectro DRX del cuarzo. Data set: Spruce Claim, King County, Washington USA 73 Mindat.org (2025).	49
Figura 21. Arenisca de la formación Esmeraldas tratada con CO ₂ y agua destilada a 65°C de temperatura.	50
Figura 22. Arenisca de la Formación Esmeraldas tratada con CO ₂ y agua destilada a 130°C. ...	51
Figura 23. Arenisca de la Formación Mugrosa tratada con CO ₂ seco a 65°C.	53
Figura 24. Arenisca de la Formación Mugrosa tratada con CO ₂ seco a 130°C.	55
Figura 25. Arenisca de la Formación Mugrosa tratada con CO ₂ salmuera a 65°C.....	56
Figura 26. Arenisca de la Formación Mugrosa tratada con CO ₂ con salmuera a 130°C.	59
Figura 27. Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 301 sin alterar.....	60
Figura 28. Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 301 a 65°C.....	62
Figura 29. Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 301 a 130°C.....	65
Figura 30. Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 302 sin alterar.	67
Figura 31. Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 302 a 65°C.....	69

Figura 32. Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 302 a 130°C.....	71
Figura 33. Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 303 sin alterar.	72
Figura 34. Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 303 a 65°C.....	75
Figura 35. Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 303 a 130°C.....	77

Lista de tablas

Tabla 1. Metodología de la investigación.	39
Tabla 2. Datos de petrofísica básica.	41
Tabla 3. Resultados de análisis DRX de la muestra M301 sin alterar.....	60
Tabla 4. Resultados del análisis DRX de la muestra M301 post-inyección a 65°C.....	62
Tabla 5. Resultados del análisis DRX de la muestra M301 post-inyección a 130°C.....	64
Tabla 6. Resultados del análisis DRX de la muestra M302 sin alterar.	66
Tabla 7. Resultados del análisis DRX de la muestra M302 post-inyección a 65°C.....	68
Tabla 8. Resultados del análisis DRX de la muestra M302 post-inyección a 130°C.....	70
Tabla 9. Resultados del análisis DRX de la muestra M303 sin alterar.	72
Tabla 10. Análisis fisicoquímico del agua de inyección.	73
Tabla 11. Resultados del análisis DRX de la muestra M303 post-inyección a 65°C.....	74
Tabla 12. Resultados del análisis DRX de la muestra M303 post-inyección a 130°C.....	76

Resumen

Título: Análisis del efecto de la inyección de CO₂ sobre la interacción química y características morfológicas de una roca almacén representativa del Valle Medio del Magdalena.¹

Autor: César Augusto Sierra Reyes.²

Palabras claves: Almacenamiento geológico de CO₂, interacción roca-fluido, geoquímica inorgánica, cambios mineralógicos, Valle Medio del Magdalena (VMM).

Descripción: El presente trabajo de grado se enfoca en el análisis de los efectos geoquímicos y morfológicos provocados por la inyección de dióxido de carbono (CO₂) en areniscas representativas de las Formaciones Esmeraldas y Mugrosa, ubicadas en el Valle Medio del Magdalena (VMM), una región con potencial para el almacenamiento geológico de carbono. El estudio se enmarca en los desafíos globales relacionados con la mitigación del cambio climático mediante tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, siendo el almacenamiento geológico una de las estrategias más prometedoras.

A través de una aproximación experimental, se evaluó la interacción roca-fluido que ocurre durante la inyección de CO₂ en distintos escenarios: con CO₂ seco, con CO₂ mezclado con agua destilada, y con CO₂ mezclado con agua de pozo de producción. Estos experimentos se realizaron bajo condiciones térmicas controladas de 65 °C—representativas de ambientes subsuperficiales realistas—y 130 °C, utilizadas para analizar el efecto de temperaturas elevadas.

La caracterización previa de las muestras incluyó análisis mineralógico (DRX), petrofísico (porosidad y permeabilidad), y textural (microscopía de secciones delgadas), permitiendo establecer un punto de referencia para interpretar los cambios inducidos tras la inyección. Posteriormente, se analizaron las transformaciones composicionales y estructurales de la roca con el fin de evaluar la reactividad mineral, los productos de precipitación o disolución, y su influencia sobre la capacidad de almacenamiento y la estabilidad del sistema poroso.

El objetivo final fue determinar la viabilidad de almacenamiento geológico de CO₂ en estas formaciones, a partir de la observación directa de los efectos físico-químicos generados en condiciones de laboratorio.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Carlos Alberto Villarreal Jaimes. Geólogo, MSc en Energías renovables. Codirectora: Luz Yolanda Vargas Fiallo. Química, MSc en Química.

Abstract

Title: Effect of CO₂ Injection on the Chemical Interaction and Morphological Characteristics of a Reservoir Rock Representative of the Middle Magdalena Valley.¹

Author: César Augusto Sierra Reyes.²

Keywords: Geological CO₂ storage, rock–fluid interaction, inorganic geochemistry, mineralogical changes, Middle Magdalena Valley (MMV).

Description: This undergraduate thesis focuses on analyzing the geochemical and morphological effects caused by the injection of carbon dioxide (CO₂) into representative sandstones from the Esmeraldas and Mugrosa Formations, located in the Middle Magdalena Valley (VMM), a region with potential for geological carbon storage. The study is framed within global efforts to mitigate climate change through carbon capture and storage technologies, with geological storage being one of the most promising strategies.

An experimental approach was used to evaluate rock–fluid interactions during CO₂ injection under different scenarios: dry CO₂, CO₂ mixed with distilled water, and CO₂ mixed with produced well water. These experiments were conducted under controlled thermal conditions of 65 °C—representative of realistic subsurface environments—and 130 °C, used to assess the effect of elevated temperatures.

The initial characterization of the samples included mineralogical (XRD), petrophysical (porosity and permeability), and textural (thin section microscopy) analyses, allowing the establishment of a reference point for interpreting the changes induced after injection. Subsequently, the compositional and structural transformations of the rock were analyzed to evaluate mineral reactivity, precipitation or dissolution products, and their influence on storage capacity and the stability of the porous system.

The final objective was to determine the feasibility of geological CO₂ storage in these formations, based on the direct observation of physicochemical effects generated under laboratory conditions.

¹ Degree work

² Faculty of Physical and Chemical Engineering. Geology. Advisor: Carlos Alberto Villarreal Jaimes. Geólogo, MSc en Energías renovables. Codirectora: Luz Yolanda Vargas Fiallo. Química, MSc en Química.

Introducción

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos del siglo XXI, impulsado principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero, con el dióxido de carbono (CO₂) siendo uno de los principales contribuyentes. Para mitigar este problema, se han desarrollado diversas estrategias, entre las cuales la captura y almacenamiento de carbono (CAC) se destaca como una opción viable y prometedora; la CAC involucra la captura de CO₂ de fuentes industriales y su almacenamiento seguro en formaciones geológicas profundas, previniendo su liberación a la atmósfera. Almacenar CO₂ en formaciones geológicas ofrece una solución para el almacenamiento seguro de gases de efecto invernadero (GEI), así como también puede ser una estrategia útil en la recuperación de hidrocarburos en yacimientos agotados y campos maduros.

Las rocas del Valle Medio del Magdalena que datan del periodo paleógeno, comprenden una región con condiciones geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO₂ debido a su rica historia de explotación de hidrocarburos y características sedimentarias adecuadas. En particular, las areniscas y demás rocas porosas de las Formaciones Esmeraldas y Mugrosa presentan propiedades que las hacen aptas para ser una roca almacén, lo cual hace que esta sea una oportunidad favorable para el desarrollo de estrategias efectivas de almacenamiento geológico de CO₂. La porosidad y permeabilidad de la roca son propiedades clave a estudiar en esta investigación, ya que de estas depende el total de espacio vacío y accesible dentro de la roca, determinando así, la capacidad de almacenamiento de la misma. Por ello, se seleccionaron muestras representativas, es decir, que cumplan con los parámetros necesarios para ser roca almacén (Bashir et al., 2024).

La utilidad de la técnica de CAC también podría emplearse en la recuperación de hidrocarburos residuales en yacimientos agotados de petróleo y gas. Este factor de recobro

mejorado se puede evidenciar mediante la disolución del CO₂ en el petróleo: disminuye su viscosidad y su tensión interfacial, además, la inyección aumenta el volumen y la presión del sistema, facilitando su movimiento a través de la roca hacia los pozos de producción. Los estudios efectuados en esta investigación permitirán identificar los mecanismos subyacentes que influyen en la interacción del CO₂ con otros fluidos contenidos en las rocas. Esto se logra simulando las condiciones de presión y temperatura a la que están sometidas las rocas soterradas a la profundidad correspondiente a su gradiente geotérmico. También se crean escenarios variando las condiciones, ya sea con temperaturas y presiones más elevadas, o combinando el CO₂ con diferentes fluidos como agua destilada o agua de producción; esto contribuirá a tener un mayor entendimiento de las reacciones geoquímicas que ocurren durante la CAC, permitiendo así encontrar mecanismos adecuados y optimizar las estrategias de almacenamiento y recobro mejorado. La variación en las propiedades determinantes de la roca almacén antes y después de la inyección de CO₂ proporcionará información sobre todas las variables involucradas en la interacción química y mecánica entre el CO₂ y la roca, para así comprender la alteración de la estructura interna y composición química de la roca, y de qué forma estos cambios influyen en la capacidad de almacenamiento de fluidos y la formación de nuevos compuestos minerales.

Se espera que los resultados de esta investigación contribuyan al avance del conocimiento en el campo del almacenamiento geológico de CO₂, proporcionando una base sólida para el desarrollo de estrategias efectivas y sostenibles para la mitigación del cambio climático y el sostenimiento ambiental, así como a la identificación de oportunidades para la aplicación práctica de esta tecnología en yacimientos agotados y otras formaciones geológicas adecuadas para almacenar CO₂ residual.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Analizar la interacción roca-fluido durante la inyección de CO₂ en areniscas de las Formaciones Esmeraldas y Mugrosa, determinando los cambios composicionales, texturales y petrofísicos resultantes mediante pruebas experimentales.

1.2 Objetivos específicos

Caracterizar las propiedades mineralógicas y texturales iniciales en muestras de areniscas de las Formaciones Esmeraldas y Mugrosa mediante métodos de porosimetría, permeabilidad al aire, análisis de secciones delgadas y difracción de rayos X (DRX).

Analizar los mecanismos de reactividad mineral y la influencia en la capacidad de almacenamiento para las inyecciones de CO₂ seco, CO₂ con agua destilada y CO₂ con agua de pozo de producción, bajo condiciones térmicas controladas a 65°C y 130°C.

Determinar la viabilidad del almacenamiento de CO₂ en estas formaciones evaluando los cambios mineralógicos, texturales y petrofísicos entre los minerales de la matriz porosa y los fluidos intraformación de las areniscas antes y después de la inyección de CO₂.

2. Marco teórico y estado del arte

2.1 Cambio climático y emisiones de CO₂

La emisión de gases de efecto invernadero (GEI) constituye una problemática ambiental de gran relevancia en la actualidad debido a su contribución al fenómeno del cambio climático. La emisión continua de GEI provocará un mayor calentamiento y cambios duraderos en todos los

componentes del sistema climático, aumentando la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles para las personas y los ecosistemas (IPCC, 2014).

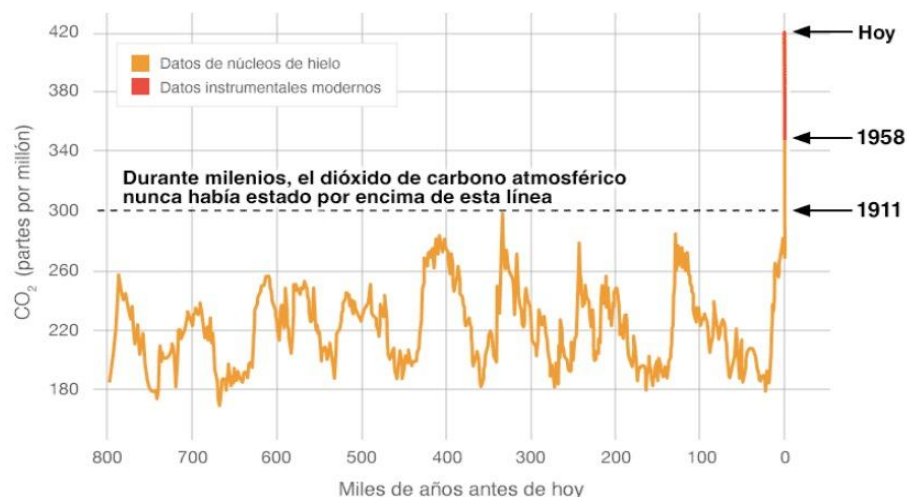
Los principales GEI antropogénicos son el CO₂, el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). Cada uno de estos gases tiene un potencial de calentamiento global (PCG) diferente basado en la capacidad de los gases para absorber energía solar y en su vida atmosférica. El PCG del CO₂, CH₄ y N₂O se calcula actualmente en 1,25 y 298 (Solomon et al., 2007), lo que indica respectivamente que 1 kg de CH₄ es 25 veces más potente y 1 kg de N₂O es 298 veces más potente que 1 kg de CO₂. Ponderados por su PCG, el CO₂, el CH₄ y el N₂O contribuyen actualmente con aproximadamente el 75%, el 15% y el 10% de las emisiones globales de GEI (IPCC, 2007). La principal fuente de emisiones de CO₂ es el uso de combustibles fósiles.

Figura 1.

Mediciones de CO₂ atmosférico desde hace 800.000 años hasta hoy (NASA, 2024).

MEDICIONES PROXY (INDIRECTAS)

Fuente de datos: Reconstrucción a partir de núcleos de hielo. Crédito: NOAA



La figura 1 ilustra la evolución histórica de los niveles de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera durante los últimos tres ciclos glaciales de la Tierra, -unos 800 mil años-, capturados

por las burbujas de aire atrapadas en las capas de hielo y los glaciares (NASA, 2024). A lo largo de este extenso periodo, los niveles de CO₂ se mantuvieron relativamente estables, fluctuando entre 180 y 300 ppm (partes por millón), lo que coincide con los ciclos naturales de glaciaciones e interglaciaciones. Sin embargo, lo más notable es que, hasta la era moderna, nunca se había registrado una concentración de CO₂ superior a las 300 ppm.

Según la United States Environmental Protection Agency, desde el inicio de la Revolución Industrial, los niveles de CO₂ han experimentado un aumento drástico y sostenido, reflejando el impacto de la actividad humana, especialmente por la quema de combustibles fósiles y la deforestación (EPA, 2025). Este incremento acelerado ha llevado las concentraciones a más de 425.55 ppm en la actualidad (última medición el 17 de julio de 2024) (NASA, 2024), un nivel sin precedentes en la historia reciente del planeta. Las actividades humanas han elevado el contenido de CO₂ de la atmósfera en un 50 % en menos de 200 años. Este cambio abrupto en tan corto tiempo subraya la influencia humana sobre los ciclos naturales de carbono y su relación directa con el cambio climático.

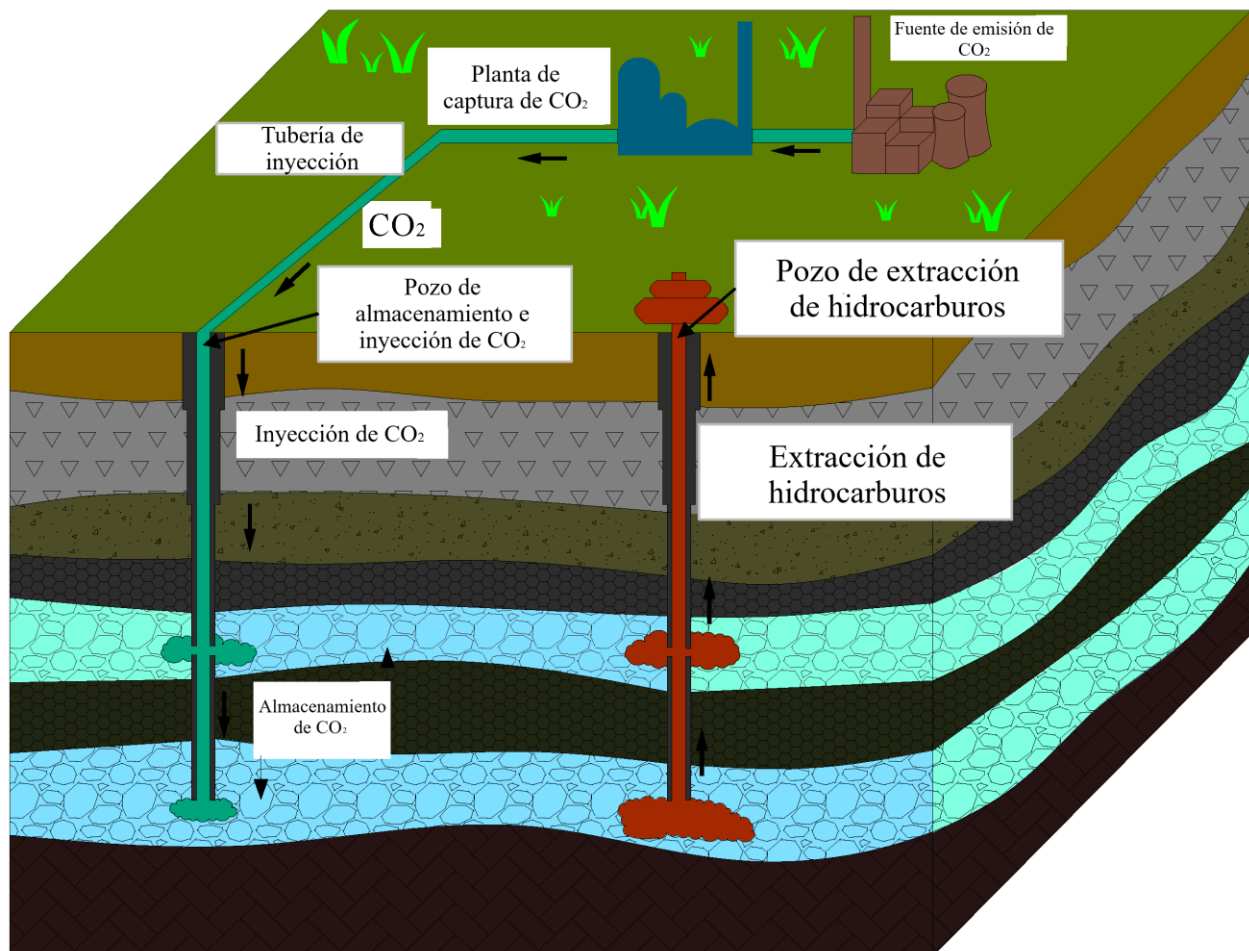
2.2. Almacenamiento geológico de CO₂

El almacenamiento geológico se ha validado como un método efectivo para la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por actividades humanas (Ali et al., 2022). Este proceso permite almacenar millones de toneladas de CO₂ a nivel global en diferentes formaciones geológicas, tales como areniscas porosas, acuíferos salinos profundos, rocas basálticas, formaciones de metano en lechos de carbón, formaciones de shale compacto y reservorios de hidrocarburos agotados (Al-Rubaye et al., 2021; Ali et al., 2020a; Dahraj et al., 2016; Memon et al., 2021b; Page et al., 2020). La CAC ofrece la oportunidad de capturar y

almacenar grandes cantidades de CO₂ generado por actividades industriales, reduciendo así las emisiones netas de GEI a la atmósfera (Figura 2).

Figura 2.

Esquema general del concepto de captura y almacenamiento de carbono. Tomado y modificado de (J. Li et al., 2019)



A profundidades superiores a los 800 metros, el CO₂ experimenta un cambio en sus propiedades físicas, pasando a un estado supercrítico en el que exhibe características intermedias entre las de un líquido y un gas. Esta transición de fase es fundamental, ya que el CO₂ supercrítico puede ocupar espacios porosos en la roca de manera eficiente, maximizando así la capacidad de

almacenamiento y reduciendo el riesgo de fugas hacia la superficie (Iglauer, 2017). Bajo estas circunstancias, se espera que la densidad del CO₂ varíe entre el 50% y el 80% de la del agua, lo que es comparable a la densidad de algunos tipos de petróleo crudo. Esta similitud en densidad puede generar fuerzas de flotación que desplazan el CO₂ hacia la superficie. Por ello es necesario contar con una capa de roca impermeable encima del reservorio seleccionado para el almacenamiento, para garantizar que el CO₂ quede confinado bajo tierra (Mariño-Martínez & Moreno-Reyes, 2018).

El proceso de CAC se basa en la captura de CO₂ de fuentes antropogénicas, como las plantas termoeléctricas a base de carbón, y su posterior transporte a lugares específicos para ser inyectado en medios de almacenamiento geológico, tales como acuíferos salinos profundos y reservorios de hidrocarburos agotados (Ali, 2018; Holloway, 2007; Rackley, 2017). Estas formaciones geológicas son abundantes a nivel mundial, lo que permite un almacenamiento seguro y a largo plazo para la inmovilización permanente del CO₂ (Ali et al., 2020a; Ali et al., 2019a; Ali et al., 2019b; Ali et al., 2020c; Metz et al., 2005).

2.3 Estudios previos relevantes

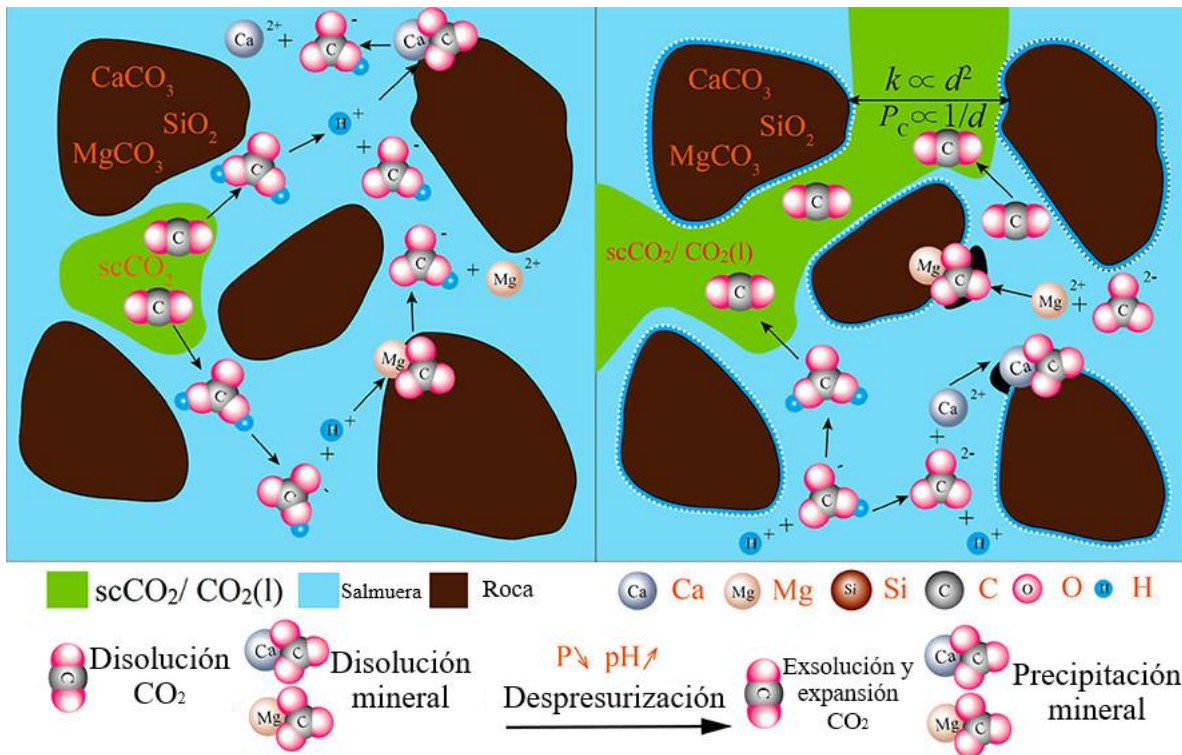
Dentro del contexto del almacenamiento de CO₂ en rocas almacén, la reactividad geoquímica desempeña un papel fundamental en la evolución de las propiedades de la formación geológica. En el estudio de Xu et al., 2017, se muestra cómo el CO₂ inyectado en un acuífero salino se disuelve en la salmuera, lo que provoca la acidificación del agua (figura 3). Este proceso, conocido como atrapamiento por solubilidad, conduce a la disolución de minerales en la roca, como carbonatos y silicatos, lo que altera la porosidad y la permeabilidad del medio poroso. La parte derecha de la figura 3 aborda lo que sucede durante un evento de despresurización del reservorio. Cuando la presión disminuye, el CO₂ que estaba disuelto en la salmuera puede exsolver,

es decir, salir de la fase acuosa y formar burbujas de gas. Este proceso, acompañado de un aumento en el pH, puede desencadenar la precipitación de minerales carbonatados, como calcita, si la solubilidad reducida de estos minerales es menor que la concentración de CO_{2(aq)} y minerales carbonatados preexistentes.

Esta precipitación mineral induce un cambio en la estructura del medio poroso, provocando un aumento en la resistencia al flujo del agua de formación y una reducción en la movilidad del CO₂ exsoluto. Este fenómeno, conocido como auto-sellado, reduce la posibilidad de migración no deseada de CO₂, incluso en caso de una despresurización abrupta del reservorio. Aunque los efectos de la despresurización en el atrapamiento por solubilidad y mineral no han sido ampliamente estudiados, los resultados experimentales obtenidos muestran que la disolución mineral afecta la presión capilar y la permeabilidad relativa, parámetros críticos para la modelización del flujo en reservorios (Xu et al., 2017). El flujo bifásico de CO₂ y agua, así como la interacción química entre el agua de formación y los minerales, están fuertemente acoplados. La estructura de los poros y la mojabilidad, que dominan el flujo multifásico en medios porosos, cambian significativamente cuando los minerales se disuelven y precipitan.

Figura 3.

Interacciones geoquímicas durante la inyección de CO₂ en un acuífero salino. Tomado y modificado de (Xu et al., 2017).

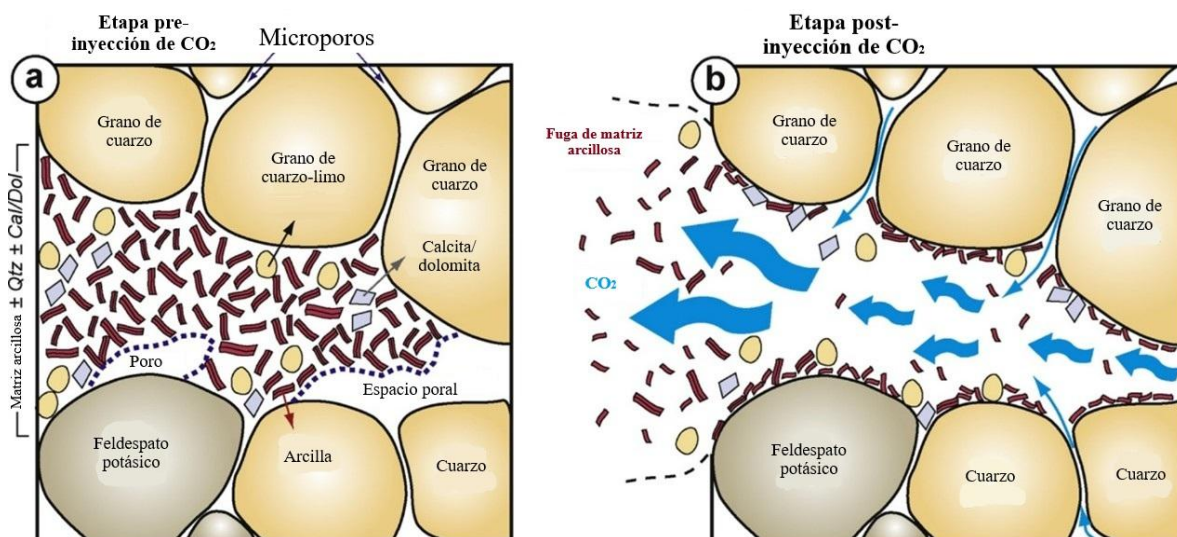


La interacción entre el CO₂ y los componentes de la formación geológica puede tener efectos significativos en la porosidad y permeabilidad de la roca. A medida que aumenta el tiempo después de la inyección, aumenta la seguridad del almacenamiento, ya que el CO₂ se transforma de una fase separada a CO_{2(aq)} y HCO₃⁻ por disolución y luego a carbonatos por disolución mineral. En un escenario, el contacto de fluidos ácidos, como el agua de formación enriquecida en CO₂, con minerales carbonatados que conforman el cemento de la roca, da lugar a la formación de bicarbonato (HCO₃⁻), esta disolución provoca apertura de poros y grietas en la matriz, lo que conlleva a un aumento de la permeabilidad. La presencia de HCO₃⁻ genera un ambiente ácido que favorece la liberación de iones H⁺ en solución. Estos iones H⁺ pueden luego reaccionar con los iones de minerales arcillosos presentes en la formación, desencadenando la precipitación de minerales secundarios que actúan como cemento, en un proceso conocido como precipitación (Xu et al., 2017).

Según Carroll et al. (2017), los incrementos en la porosidad suelen ir acompañados de aumentos en la permeabilidad, a diferencia de lo observado en experimentos de transporte reactivo en sistemas cementosos con CO₂. Las razones para la reducción de la permeabilidad incluyen cambios en el volumen molecular de los minerales de carbonato, la precipitación de carbonato cálcico en las rutas de flujo, el aumento de la compresibilidad de las capas alteradas y la baja densidad del silicato amorfo. Se destaca la importancia de la reactividad del cemento en la mitigación de la fuga de CO₂. La reactividad del cemento permite la formación de carbonatos que sellan las fracturas y reducen la permeabilidad, especialmente bajo presión confinante. Además, la liberación de calcio en exceso puede precipitar como sólidos de carbonato en la red de fracturas, mientras que la presencia de agua facilita la alteración química del cemento y la precipitación de carbonato de calcio. Estos procesos son fundamentales para comprender y mitigar el riesgo de fuga de fluidos en proyectos de almacenamiento de CO₂ (Carroll et al., 2017).

Figura 4.

Desprendimiento de la matriz arcillosa intergranular y eliminación parcial de la muestra de areniscas debido al aporte de CO₂ supercrítico (Berrezueta et al., 2013).



En el estudio llevado a cabo por Berrezueta et al. (2013), se exploró el efecto de la inyección de CO₂ supercrítico en muestras de areniscas feldespáticas con redes de poros interconectados. Durante este experimento, se observó un fenómeno notable de desprendimiento intergranular de la matriz arcillosa y una remoción parcial de la roca como respuesta a la inyección de CO₂, véase la figura 4, los resultados obtenidos en las muestras tratadas con CO₂ (b) indican un aumento de porosidad (n=3,75%) en comparación a la roca fresca (a). Estos procesos condujeron a un incremento en la porosidad de la formación, lo que puede atribuirse a la liberación de partículas finas y la creación de espacios vacíos dentro de la matriz de la roca. Es importante destacar que, en algunas instancias experimentales, se evidenció un decremento en la porosidad debido a la disolución de carbonatos seguida de precipitación o mineralización secundaria.

Los minerales silicatos, como el cuarzo, feldespatos y las micas, representan una fracción significativa de las rocas sedimentarias. Al inyectar CO₂ supercrítico, se pueden producir reacciones de disolución y transformación que afectan la estructura y propiedades de la roca. Por ejemplo, la transformación de feldespato en caolinita no solo altera la porosidad sino también la capacidad de la roca para almacenar y transportar CO₂ (Berrezueta et al., 2013). Asimismo, los minerales arcillosos como la illita, montmorillonita y caolinita pueden experimentar cambios en su capacidad de intercambio catiónico y estabilidad estructural al interactuar con CO₂ ácido, afectando la integridad y reactividad del sistema roca-fluido.

En el estudio llevado a cabo por Pearce et al. (2022), se emplearon *plugs* (muestras cilíndricas) de areniscas extraídos de la formación Evergreen en Australia como muestras representativas para investigar las complejas reacciones químicas desencadenadas durante la inyección de CO₂. Inicialmente, las muestras fueron sometidas a la inyección exclusiva de salmuera, lo que resultó en un fenómeno notable de precipitación de calcita en los poros y canales

de la formación geológica. Esta precipitación condujo a una disminución significativa en la porosidad y permeabilidad de la roca, reduciendo así su capacidad de almacenamiento de CO₂. Posteriormente, se procedió con la inyección de CO₂ en las muestras, lo que provocó una disminución del pH del sistema a 4.5. Durante esta fase, se observaron reacciones químicas complejas, principalmente con minerales como la calcita y la plagioclasa presentes en la matriz de la roca. Se predijo la precipitación de minerales secundarios como dolomita e illita como resultado de estas reacciones, lo que sugiere una alteración significativa en la composición mineralógica de la formación geológica (Pearce et al., 2022).

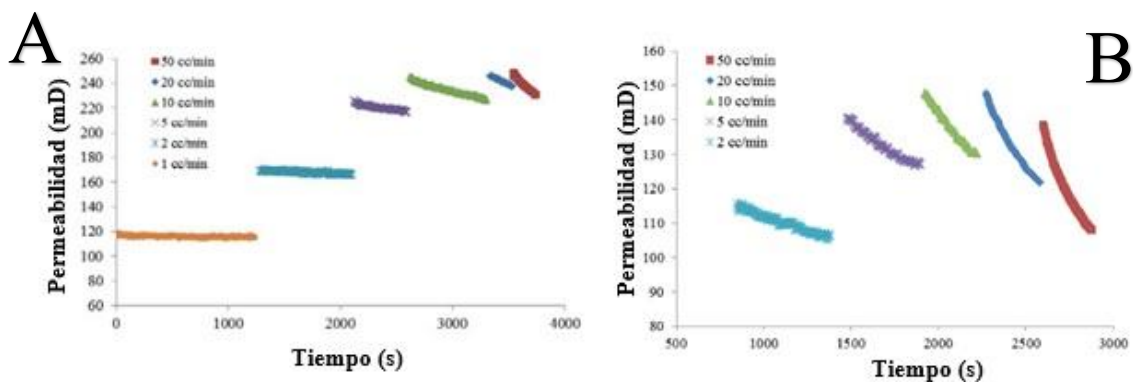
La composición química de la salmuera influye en la reactividad del CO₂ con la roca almacén. Variaciones en la concentración de iones como Na⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ pueden modificar las tasas de disolución y precipitación mineral, alterando las propiedades petrofísicas de la formación. Además, el pH y la conductividad de la salmuera son factores determinantes en la geoquímica del sistema. Por ejemplo, una inyección de salmuera con alto contenido de Ca²⁺ puede favorecer la precipitación de carbonatos, mientras que un pH ácido tiende a disolver minerales como la calcita, afectando la porosidad y la permeabilidad. Es importante destacar que estas reacciones químicas también tuvieron un efecto en las propiedades porosas de la roca almacén. Se observó un aumento en el tamaño de las gargantas de los poros, así como la precipitación de minerales como la caolinita, lo que contribuyó a un incremento en la permeabilidad de la formación (Bourg & Ajo-Franklin, 2017).

En el estudio realizado por Iglauer et al. (2014), se investigaron los cambios en la permeabilidad de una arenisca limpia durante la inyección de CO₂, tanto en presencia de agua de salmuera (live brine) como en ausencia de agua de ella (dead brine). Durante este proceso, se observó una intensa formación y disociación de ácido carbónico, lo que generó una amplia

cantidad de cationes libres en el sistema que, al interactuar con otros compuestos, provoca la precipitación de minerales, principalmente carbonatos ferrosos en el caso de la dead brine. También se observó la variable de velocidad de flujo en la inyección y se encontró que en caudales altos hay reducciones de permeabilidad por la liberación de finos, la migración y el taponamiento de la garganta de los poros (figura 5).

Figura 5.

(A) Cambio en la permeabilidad de la arenisca en función del tiempo de inyección de dead brine y la velocidad de inyección. (B) Cambio en la permeabilidad de la arenisca en función del tiempo de inyección de live brine y la velocidad de inyección (Iglauer et al., 2014).



Los resultados obtenidos mostraron que, mientras que la permeabilidad en una arenisca limpia no experimentó cambios significativos tras la inyección de CO₂ con o sin salmuera, se observó una reducción significativa en la permeabilidad (~23%) cuando se inyectó CO₂ supercrítico (figura 5). Durante el estudio, se midió la evolución de la permeabilidad en el tiempo para comprender mejor los mecanismos responsables de los cambios observados. Se demostró que la reducción significativa en la permeabilidad fue principalmente atribuible a la migración de partículas finas, las cuales pueden cerrar las gargantas de los poros y dificultar el flujo de fluidos a través de la formación, y no a la precipitación de minerales (Iglauer et al., 2014).

2.4 Análisis en recobro mejorado

Los yacimientos de petróleo agotados son formaciones geológicas subterráneas que previamente sirvieron como reservorios de hidrocarburos, de los cuales se ha extraído la mayor parte. Están extensamente documentados, con datos que abarcan desde información sísmica hasta muestras de núcleos, proporcionando una caracterización geológica detallada en términos de atributos del medio poroso, como el tipo de roca, la porosidad y la permeabilidad, así como su extensión, la integridad de la roca de tapa y las líneas de falla (Le Gallo et al., 2002). Por consiguiente, el CO₂ producido puede ser almacenado en reservorios de hidrocarburos una vez que están agotados o durante operaciones de recuperación mejorada de petróleo (EOR), mientras aún se están produciendo hidrocarburos. Los yacimientos de petróleo y gas agotados son opciones de almacenamiento geológico particularmente prometedoras debido a su geología conocida y sus propiedades de contención comprobadas (Agartan et al., 2018; Le Gallo et al., 2002). Esto se debe a que los reservorios agotados han sido previamente explorados para la extracción de hidrocarburos, por lo que sus características geológicas, capacidades y comportamientos son bien entendidos.

Además, inyectar CO₂ puede ayudar a movilizar y extraer petróleo residual de un yacimiento, lo que genera beneficios económicos adicionales, mientras que los campos de petróleo y gas agotados han establecido infraestructura, como pozos, oleoductos e instalaciones, que potencialmente reducen el costo y el tiempo necesarios para convertir el sitio al almacenamiento de CO₂ (Hannis et al., 2017).

Se han probado yacimientos agotados de petróleo y gas para el almacenamiento geológico de CO₂ en proyectos como el proyecto CO₂ CRC en Australia (Sharma et al., 2009), el campo SACROC en Texas (Hosseininoosheri et al., 2018) y el proyecto Cranfield en Natchez, Estados

Unidos (Weaver y Anderson, 1966). Se ha observado que la extracción de hidrocarburos de yacimientos agotados de petróleo y gas conlleva cambios significativos en las propiedades porosas de las areniscas reservorio. Después de la explotación de estos yacimientos, se observa una disminución en la porosidad original de la arenisca debido a la extracción de fluidos y la subsiguiente compactación adicional de los granos. Este proceso de compactación adicional puede resultar en una disminución adicional de la porosidad de la formación geológica (Bashir et al., 2024).

Además, durante la explotación de yacimientos agotados, se generan fracturas en la formación como resultado de la liberación de presión. Estas fracturas, si bien pueden proporcionar vías preferenciales para el flujo de fluidos, también pueden actuar como barreras que atrapan los hidrocarburos restantes en la formación (Bashir et al., 2024). Este fenómeno ilustra la compleja interacción entre la extracción de hidrocarburos y la evolución de las propiedades porosas de la formación geológica.

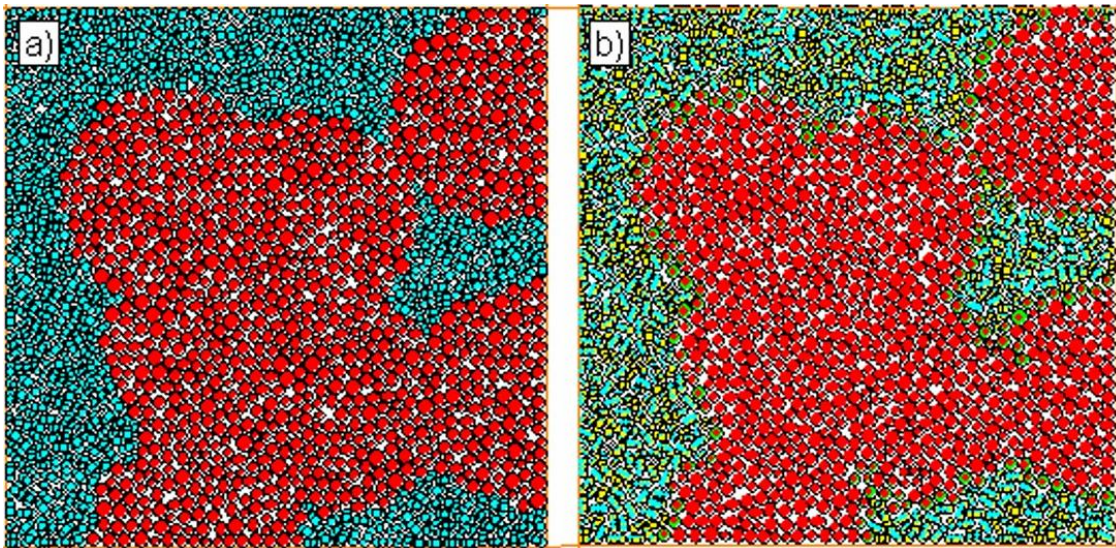
Los pozos de producción representan vías de alto riesgo para la fuga de fluidos desde los depósitos geológicos de almacenamiento de CO₂, debido a que las brechas en este sistema construido tienen el potencial de conectar el depósito con los recursos de aguas subterráneas y la atmósfera. La investigación de (Carroll et al., 2017) sugiere que los riesgos de fuga no son tan grandes como se percibieron inicialmente porque la alteración química y mecánica del cemento tiene la capacidad de sellar las zonas dañadas. Este estudio ha resumido procesos clave que limitan el riesgo de fuga de salmuera y CO₂ de los pozos en los depósitos de almacenamiento geológico. Esto se ha logrado mediante un modelo químico, mecánico y de transporte experimentalmente calibrado.

Queda la pregunta de si, tras el agotamiento de estos yacimientos, podrían utilizarse como oportunidades fiables de almacenamiento de CO₂. Debido a la falta de un incentivo económico para que las empresas almacenen CO₂ de manera confiable en las formaciones subterráneas, un primer paso puede ser imitar la ruta de utilización de CO₂ que ha tenido lugar con la recuperación mejorada de petróleo, o EOR (*Enhanced oil recovery*).

En un estudio de factibilidad del almacenamiento geológico de CO₂ en un campo de gas agotado y un acuífero salino con un *caprock* de anhidrita (figura 6) en los Países Bajos, Orlic et al. (2010) utilizaron modelos numéricos geomecánicos para proporcionar información detallada sobre la evolución del estrés y la deformación asociada en el sistema de almacén-sello y las fallas, así como los efectos a largo plazo del almacenamiento de CO₂ en la integridad del sello superior. Se indican los granos de anhidrita de la matriz (azul), rosetas de anhidrita (rojo), bordes de reacción de calcita en los granos de la matriz (amarillo) y rosetas (verde). Los análisis realizados permitieron establecer criterios geomecánicos e hidráulicos para el aumento máximo de presión admisible durante la inyección de CO₂. Estos criterios están relacionados con el riesgo de fracturación inducida de la roca almacén y la capa de sellado, el riesgo de cizallamiento de fracturas preexistentes y el riesgo de reactivación de fallas que podría llevar a sismicidad inducida por la inyección. La caracterización geológica/geomecánica detallada del sitio potencial de almacenamiento y el monitoreo de campo durante las operaciones de inyección son necesarios para restringir los modelos geomecánicos y disminuir la incertidumbre en sus predicciones (Orlic et al., 2010). Los resultados experimentales sugieren una disminución significativa en la presión parcial de CO₂ puede permitir el almacenamiento de mayores cantidades de CO₂ a largo plazo, hasta la máxima presión permitida.

Figura 6.

Modelo de elementos discretos de la capa de roca de anhidrita a) antes de la reacción con CO₂ y b) después de 50,000 años de exposición a fluidos ricos en CO₂ (Orlic et al., 2011).



La investigación de la interacción y la posterior adsorción de CO₂ dentro de estos complejos sistemas naturales proporcionará una mayor comprensión de la viabilidad de utilizar el CO₂ como fluido de recuperación mejorado, además de si los depósitos agotados pueden servir como sumidero permanente de CO₂ (Psarras et al., 2017).

2.5 Observaciones adicionales

El análisis económico del proceso de inyección de CO₂ es esencial para evaluar su viabilidad a largo plazo. Este análisis debe considerar los costos de caracterización de los yacimientos, inyección, monitoreo y posibles remediaciones, así como los beneficios económicos derivados de la mitigación del cambio climático. La reducción de las emisiones de CO₂ puede generar créditos de carbono que pueden ser comercializados en mercados de emisiones, proporcionando un incentivo económico adicional. Además, la implementación de tecnologías de

CAC puede fomentar la creación de empleos en sectores relacionados con la ingeniería, la geología y la gestión ambiental, impulsando así el desarrollo económico regional.

Es crucial también evaluar el impacto ambiental potencial de la inyección de CO₂, incluyendo el riesgo de contaminación de acuíferos y la posible liberación accidental de CO₂. Sin embargo, con un monitoreo adecuado y medidas de mitigación efectivas, estos riesgos pueden ser minimizados. El almacenamiento seguro de CO₂ en formaciones geológicas profundas puede actuar como una medida de contención temporal mientras se desarrollan y adoptan tecnologías más avanzadas de energías renovables, facilitando una transición más suave hacia una economía baja en carbono.

La adopción de esta tecnología puede mejorar la aceptación pública y la sostenibilidad de la industria energética al demostrar un compromiso con la reducción de emisiones y la protección del medio ambiente. Los beneficios ambientales incluyen la mitigación del cambio climático y la reducción de la huella de carbono de las actividades industriales, contribuyendo al cumplimiento de los objetivos del Acuerdo de París y otros compromisos internacionales en materia de cambio climático.

3. Geología regional

3.1 Valle Medio del Magdalena

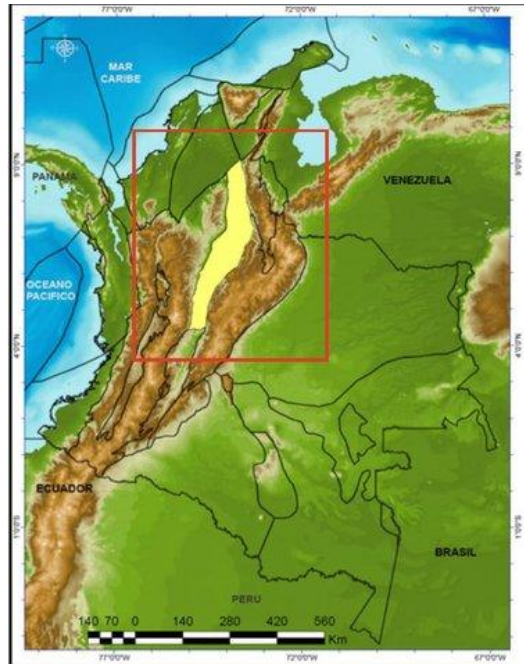
El Valle Medio del Magdalena (VMM) es una cuenca intramontañosa caracterizada como una depresión geomorfológica que separa las Cordilleras Central y Oriental de Colombia (figura 7). Geológicamente, su evolución se originó en el Mesozoico, caracterizado por una tectónica distensiva que generó la formación de rifts, donde se acumularon sedimentos continentales y marinos. Durante el Cenozoico, la tectónica compresiva asociada a la orogenia Andina generó

estructuras de cabalgamiento y plegamiento, afectando las secuencias sedimentarias y el basamento precretácico (Sarmiento -Pérez, 2015).

En términos estructurales, la tectónica compresiva del VMM está definida por un sistema de fallas regionales que han controlado su evolución tectono-sedimentaria a lo largo del tiempo geológico, caracteriza por una fase compresiva que se instauró desde el Paleoceno y persiste hasta la actualidad (Mojica, 1990). Al occidente, el límite geotectónico lo establece el sistema de Fallas de La Palestina, una zona de falla multitemporal que desde el Paleozoico inferior ha actuado como sutura y borde de cuenca, controlando la configuración del margen oriental de la Cordillera Central. Hacia el oriente, la Falla de La Salina constituye el límite tectónico con la Cordillera Oriental, representando una falla inversa clave que se reactivó durante la Orogenia Andina y cuyo desarrollo se relaciona con el levantamiento de esta cordillera. Convergente con La Salina, la Falla de Bucaramanga, un elemento geotectónico mayor de dirección N20°W, cruza el sector norte. Transversalmente, el Sistema de Fallas de Cimitarra, de dirección N60°E, subdivide el VMM en sectores norte y sur, controlando la sedimentación paleógena y neógena y marcando el límite sur de la Serranía de San Lucas (Sarmiento -Pérez, 2015). Esto ha resultado en una diversidad de trampas hidrocarburíferas, siendo las estructurales predominantes en el VSM y el costado oriental del VMM, y las combinadas estratigráfico-estructurales en el costado occidental del VMM (Sarmiento -Pérez, 2015).

Figura 7.

Localización de la cuenca Valle Medio del Magdalena (Barrero et al., 2007).



En términos litológicos, la cuenca está compuesta por una amplia gama de litologías sedimentarias, incluyendo areniscas, arcillas, lutitas y conglomerados, depositadas durante eventos anóxicos globales en diferentes ambientes deposicionales, como ambientes fluviales, lacustres y marinos (Alvárez-González, 2021). Durante el Cenozoico y Mesozoico, la cuenca fue escenario de acumulaciones en ambientes continentales, con presencia de abanicos aluviales y depósitos fluviales, a veces con influencia marina, como lo evidencian las areniscas, lutitas y carbones de la Formación Mugrosa (ANH, 2010).

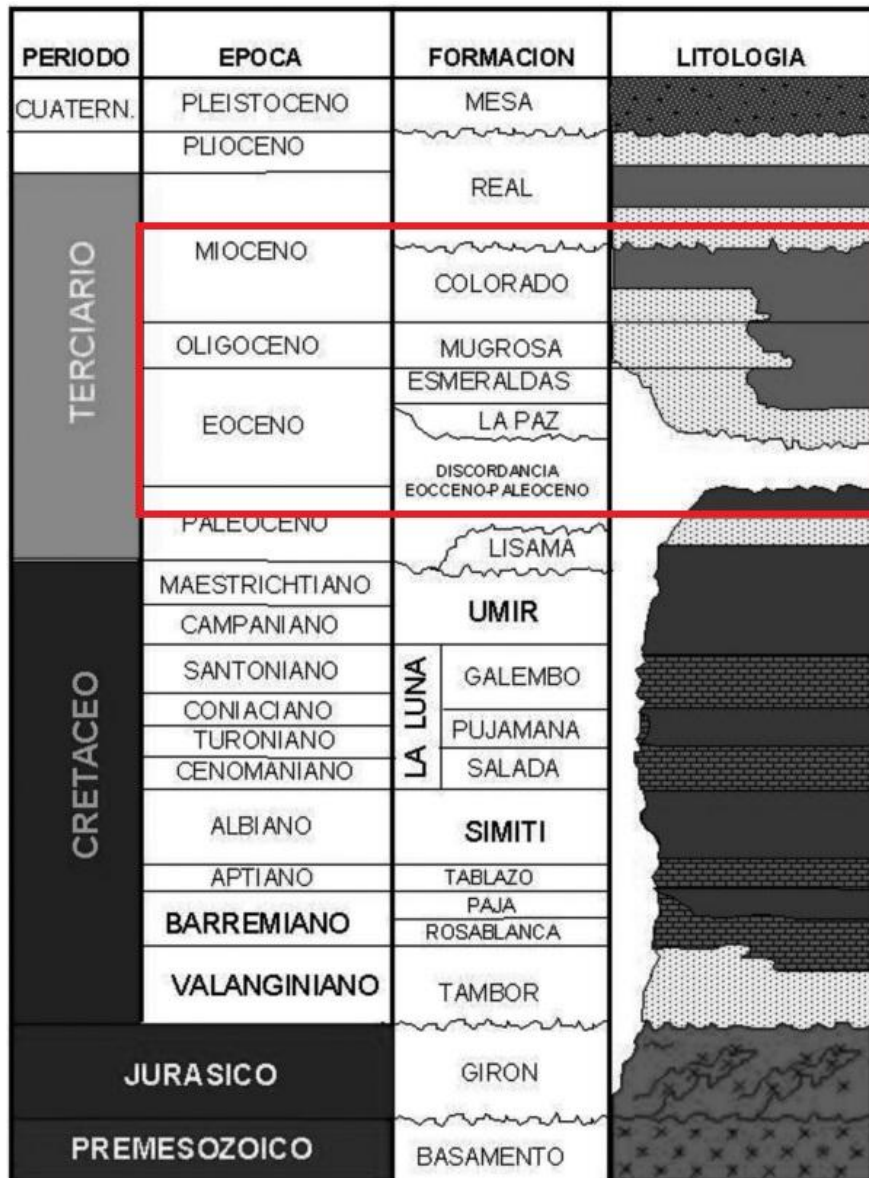
Los ambientes sedimentarios del VMM han experimentado una transición de marinos a continentales a lo largo del tiempo, iniciando en el Mesozoico con la formación de *rifts* y la acumulación de sedimentos marinos y continentales, la cuenca evolucionó drásticamente durante el Cenozoico (Mojica, 1990). La Orogenia Andina marcó un cambio fundamental, reemplazando

los ambientes marinos por sistemas continentales dominados por la sedimentación fluvial. Desde abanicos aluviales proximales y ríos trezados de alta energía, hasta sistemas meandriformes y llanuras de inundación distales, el Cenozoico del VMM se caracteriza por una diversidad de ambientes fluviales, lacustres y palustres, como se evidencia en formaciones como Esmeraldas y Mugrosa (Sarmiento -Pérez, 2015), que son en último término, nuestro objeto de estudio.

La figura 8 muestra la columna generalizada de la cuenca del VMM. Se señaló con un cuadro rojo, el área de interés geológico. Las secuencias estratigráficas depositadas a partir de la discordancia Eoceno-Paleoceno (formaciones La paz, Esmeralda, Mugrosa y Colorado), presentan características litológicas y estructurales que las hacen ideales para el almacenamiento geológico de hidrocarburos ya que presenta condiciones de almacenamiento y sello. La porosidad y permeabilidad de las areniscas permiten un almacenamiento eficiente y las lutitas y arcillas actúan como sellos efectivos, impidiendo la migración de los hidrocarburos y asegurando su confinamiento. Además, la continuidad lateral de las capas de arena cubiertas bajo el sello impermeable de las arcillas, asegura un almacenamiento uniforme y eficiente.

Figura 8.

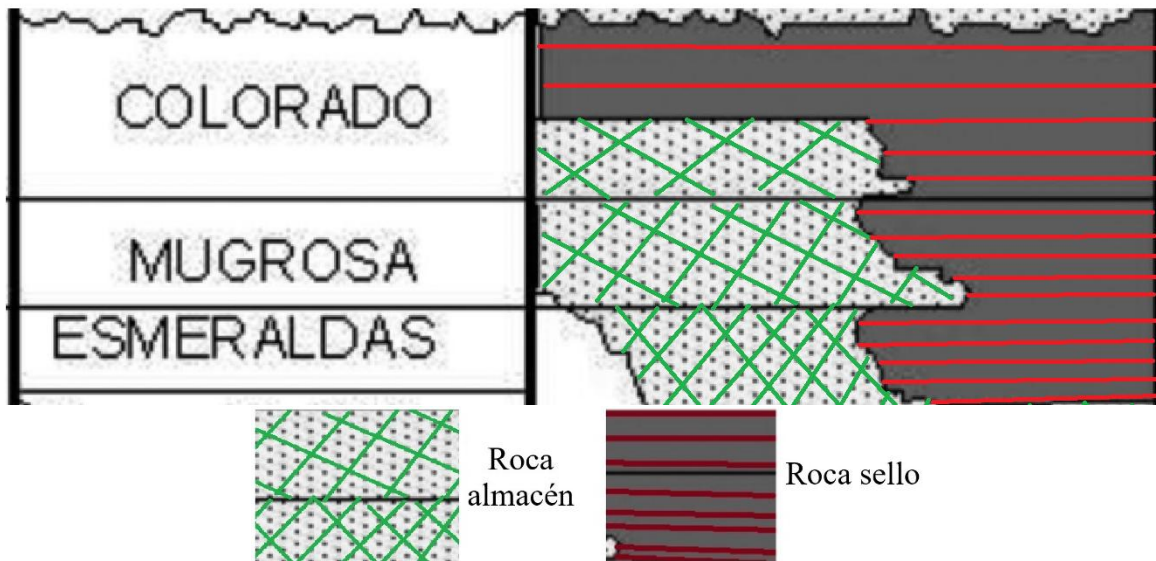
Columna estratigráfica generalizada del Valle Medio del Magdalena (Madero et al., 2010).



La figura 9 ilustra esquemáticamente las zonas de mayor conveniencia para el almacenamiento de CO₂, separando mediante una nomenclatura, las rocas almacén y sello de las diferentes formaciones. Se seleccionaron como objeto de estudio, areniscas de alta porosidad y permeabilidad de las Formaciones Esmeraldas y Mugrosa del Eoceno superior, y Oligoceno respectivamente. Como se ha mencionado, estas unidades exhiben litofacies que reflejan características mineralógicas, texturales y morfológicas adecuadas para el estudio.

Figura 9.

Área de interés para el almacenamiento de CO₂.

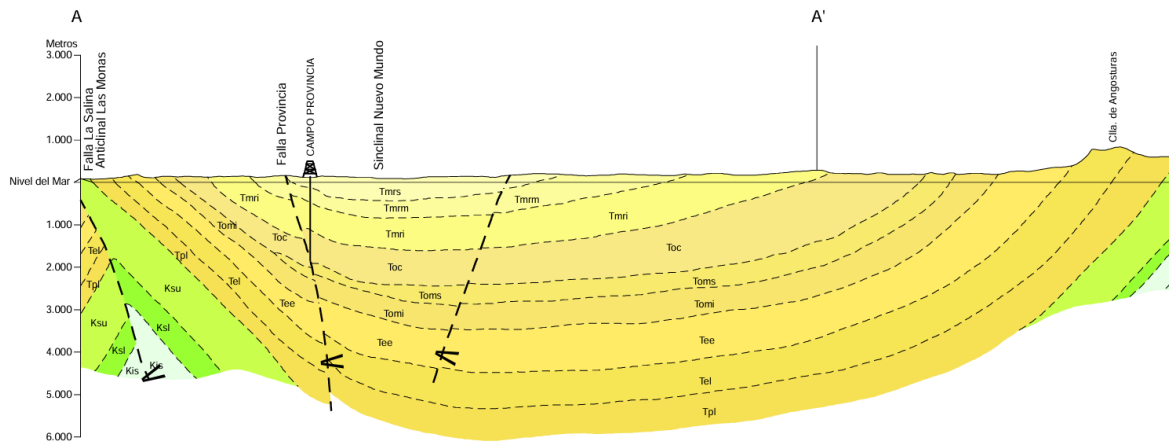


3.2 Sinclinal de Nuevo Mundo

El Sinclinal de Nuevo Mundo (SNM) (Figura 10) es una prominente estructura sinclinal del margen oriental del VMM, caracterizada por un pliegue sinformal que genera una trampa estructural para la acumulación de fluidos subsuperficiales como hidrocarburos y CO₂. Es una estructura amplia con inmersión hacia el Norte y hace parte del cinturón de cabalgamiento de la margen occidental de la cordillera oriental junto con el Anticlinal de Lisama y el Anticlinal de Provincia. Estos pliegues se encuentran asociados con el movimiento de cabalgamiento del sistema de Fallas La Salina, el cual presenta una rampa a través de rocas del Cretáceo y un Foot-Wall Flat en rocas del Cretáceo Superior, el cual se divide en dos rampas a través de rocas del Paleógeno (Caballero; 2010).

Figura 10.

Sinclinal de nuevo mundo (Ward et al., 1977).



El Anticlinal de Lisama corresponde al bloque colgante de un pliegue por propagación de falla asociado con la rampa de cabalgamiento más occidental de La Salina y el SNM corresponde al bloque colgante del movimiento de la rampa oriental del sistema de fallas La Salina que superpone un plano (“flat”), en el bloque colgante con una rampa en el bloque yacente y corresponde a la rampa más joven del sistema, ya que cruza estratos del Grupo Real y no es plegado por el subyacente Anticlinal de Lisama (Gómez et al., 2005b). Según Gómez et al. (2005), el flanco oriental del SNM hace parte del limbo frontal del Anticlinal de Los Cobardes, plegamiento que es contemporáneo con la depositación de la Formación Mugrosa superior y Colorado. Sobre el flanco oriental y occidental del SNM afloran rocas del Cenozoico identificadas como Fm Lisama (Paleoceno) la cual está en contacto discordante con el Grupo Chorro: Fm. La Paz y Fm Esmeraldas (Eoceno Medio a Eoceno tardío), sobreyaciendo las anteriores se encuentra también el Grupo Chuspas (Ward et al., 1977): formaciones Mugrosa y Colorado (Oligoceno – Mioceno temprano).

3.3 Formación Esmeraldas

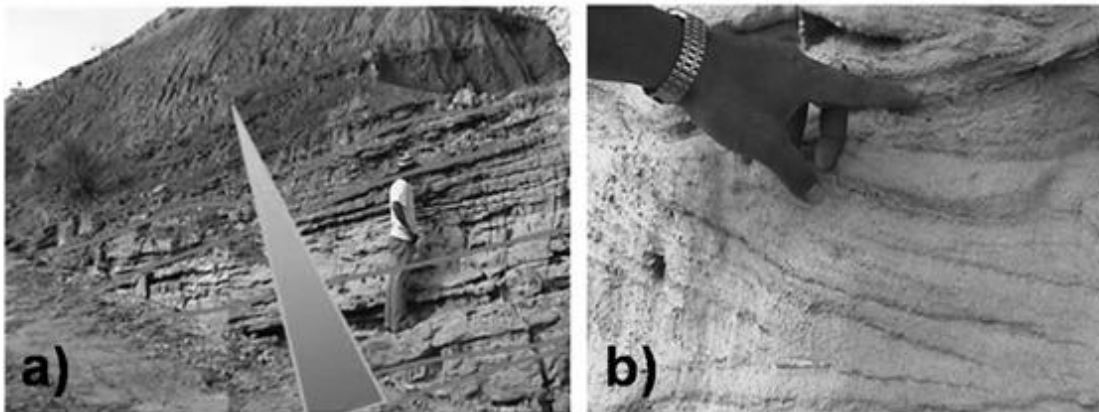
La Formación Esmeraldas es una unidad geológica significativa en el Valle Medio del Magdalena, Colombia, que data del Eoceno tardío. y está compuesta principalmente de arenisca de grano fino, gris clara a gris verdosa, de estratificación fina a laminada y limolita, con intercalaciones de shale gris oscuro, localmente moteado de marrón rojo y púrpura. Se pueden encontrar mantos de carbón, que indican la acumulación de material orgánico en ambientes húmedos, lo que es característico de regiones pantanosas o deltaicas. Su contacto es conforme con la infrayacente Formación La Paz, pero inconforme con la suprayacente Formación Mugrosa. Sus capas inferiores están formadas por intercalaciones de areniscas duras de grano fino ligeramente micáceas, conglomerados en matriz de arcilla y arcillolitas blandas. En la parte superior se encuentran intercalaciones de arcillolita gris blanda laminar, arenisca micácea, friable, de grano medio, arenisca de grano medio a grueso, arcillosa y areniscas de grano fino con estratificación cruzada (Ward et al., 1973). Estas características litológicas sugieren un ambiente sedimentario predominantemente fluvial y deltaico, con tendencias hacia ambientes de mayor energía y variabilidad en la dinámica sedimentaria.

La Formación Esmeraldas también es notable por su espesor total de 575m metros. Su extensión lateral es considerable, aunque puede ser más discontinua debido a su naturaleza litológica (Julivert, 1961). Esta formación se encuentra en el contexto de una cuenca sedimentaria que ha experimentado una evolución tectónica compleja, con subsidencia general y la creación de estructuras anticlinales que han influido en la deposición y preservación de los sedimentos. La presencia de minerales formados a bajas temperaturas indica que estas rocas han estado sujetas a condiciones estables, lo que es favorable para el almacenamiento a largo plazo.

3.4 Formación Mugrosa

Figura 11.

a) Afloramiento de la Formación Mugrosa, paquetes arenosos pierden espesor lateralmente. b) Afloramiento Formación Mugrosa, estratificación cruzada en artesa. Tomado y modificado de Madero, Rueda, Ortiz, y Colegial (2010).

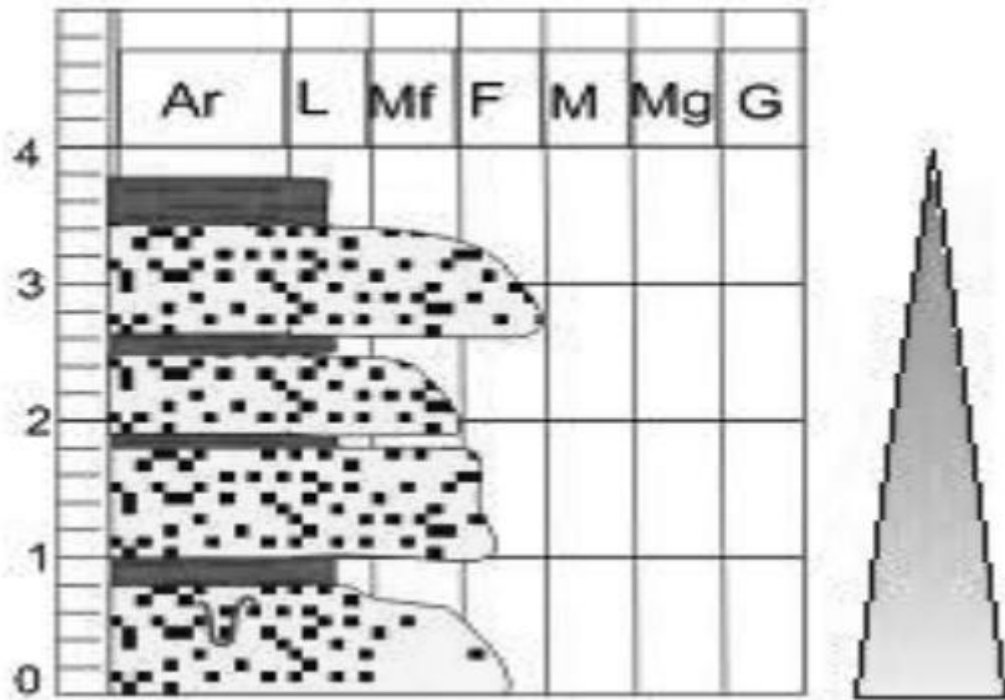


Específicamente, la Formación Mugrosa (figura 11), de edad Terciaria, es una secuencia estratigráfica originada por la sedimentación en ambientes fluviales que varían entre anastomosado y meandriforme (Quintero et al., 2010), tiene un espesor total de 843m. Estudios y análisis de afloramientos y núcleos de roca en esta formación identifican tres facies principales: llanuras de inundación, arenas de canal y arenas de llanura de inundación o de desborde (Madero, Rueda, Ortiz, y Colegial, 2010). La continuidad lateral y vertical de las areniscas continentales de la Formación Mugrosa ha sido caracterizada, revelando un ambiente de transición entre meandriforme anastomosado con una gran variación de facies (Quintero et al., 2010), donde los paquetes arenosos pierden espesor lateralmente y se van acuñando, obteniendo una forma lenticular, véase figura 4a, el triángulo indica disminución en la energía de depositación hacia el tope del afloramiento, en 4b se aprecia estratificación cruzada en artesa, una facie típica de ambientes de canal y arenas de llanura de inundación (Madero, Rueda, Ortiz, y Colegial, 2010).

Mugrosa es discordante con la Formación Esmeraldas y el contacto superior con la Formación Colorado es concordante (véase figura 8). La unidad está compuesta en su parte inferior por areniscas gris verdosas, de grano fino a medio, con intercalaciones de lodolitas grises a azulosas y algunas capas de areniscas conglomeráticas. La parte media consta de shales moteados con algunas intercalaciones de arenisca, hacia la parte superior hay lodolitas moteadas, fosilíferas (Clavijo y Royero, 2001).

Figura 12.

Columnas de los afloramientos de la base de la Formación Mugrosa (Quintero et al., 2010).



Entre estas litofacies mostradas en la figura 12 se encuentran conglomerados de guijarros soportados por clastos con matriz arenosa, indicativo de una deposición en un entorno fluvial o aluvial de alta energía. Secuencias de areniscas de grano medio a grueso, acompañadas de grava, sugiriendo condiciones de transporte energético en un entorno fluvial. Areniscas de grano fino a

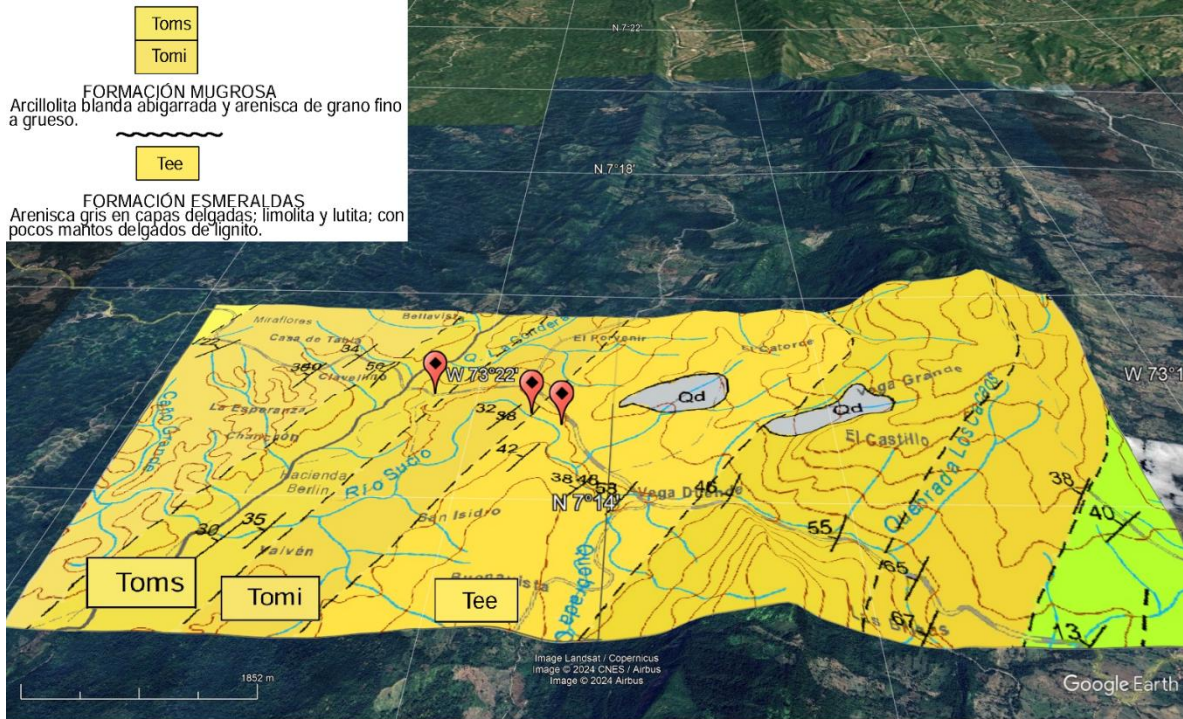
grueso, con estratificación horizontal, así como areniscas fangosas de estratificación plana o con grava, lo que sugiere deposición en ambientes fluviales fangosos con raíces de grano fino a grueso, indicativas de una deposición en un entorno fluvial con influencia de vegetación. Areniscas de grano muy fino a fino, bien clasificadas con laminaciones onduladas o de corriente, posiblemente depositadas en un ambiente fluvial de baja energía o marino somero. Areniscas bien clasificadas de grano fino a medio con estratificación transversal plana, sugiriendo deposición en ambientes fluviales o marinos someros con fluctuaciones en la energía del medio de transporte (SGC, 2019).

3.5 Localización de las muestras

La figura 13 muestra la ubicación precisa de las muestras recolectadas en el área de estudio, correspondiente a los cuadrángulos F4 y F5 de la plancha 109 del Mapa Geológico de Colombia, en el VMM. Los puntos de muestreo están georreferenciados y sobrepuestos en la cartografía geológica que delimita las formaciones sedimentarias de esta región, haciendo énfasis en las que son nuestro objeto de estudio: Esmeraldas y Mugrosa. Esta representación cartográfica permite relacionar la procedencia de las muestras con las unidades geológicas específicas, facilitando la correlación entre las propiedades litológicas de las areniscas y los resultados de los análisis experimentales.

Figura 13.

Imagen satelital y localización de puntos de muestreo en el área de estudio.



4. Metodología

Tabla 1.

Metodología de la investigación.

Objetivo Específico	Etapas	Actividades
1. Caracterizar las propiedades mineralógicas y texturales iniciales en muestras de areniscas de las Formaciones Esmeraldas y Mugrosa mediante métodos de porosimetría, permeabilidad al aire, análisis de secciones delgadas y difracción de rayos X (DRX).	ETAPA 1: Preparación de muestras y caracterización inicial de propiedades.	ACTIVIDAD 1.1: Recolectar y seleccionar muestras representativas de arenisca del Valle Medio del Magdalena y prepararlas para análisis de laboratorio, asegurando la integridad de las muestras. ACTIVIDAD 1.2: Determinar la porosidad y permeabilidad iniciales de las muestras mediante pruebas de porosimetría y permeabilidad al aire. ACTIVIDAD 1.3: Realizar análisis de DRX para identificar la mineralogía inicial de las muestras.

<p>2. Realizar las inyecciones de CO₂ seco, CO₂ con agua destilada y CO₂ con agua de pozo de producción, bajo condiciones térmicas controladas a 65°C y 130°C. Analizando mecanismos de reactividad mineral y su influencia en la capacidad de almacenamiento de CO₂.</p>	<p>ETAPA 2: Inyección de CO₂ bajo diferentes condiciones térmicas y químicas</p>	<p>ACTIVIDAD 2.1: Realizar la inyección de CO₂ seco, elevar la temperatura a 65° y 130°, mantener las condiciones durante 3 días. ACTIVIDAD 2.2: Realizar la inyección de CO₂ con agua destilada, elevar la temperatura a 65° y 130°, mantener las condiciones durante 3 días. ACTIVIDAD 2.3: Realizar la inyección de CO₂ con agua de pozo de producción, elevar la temperatura a 65° y 130°, mantener las condiciones durante 3 días.</p>
	<p>ETAPA 3: Análisis del agua de formación y condiciones iniciales.</p>	<p>ACTIVIDAD 3.1: Determinar las concentraciones de cationes (Na, Ca, K, Mg, Fe), aniones (Cl, SO₄, HCO₃, CO₃), pH, conductividad y sólidos disueltos utilizando técnicas como la cromatografía iónica y espectrometría de masas.</p>
<p>3. Evaluar los cambios mineralógicos, texturales y petrofísicos entre los minerales de la matriz porosa de las areniscas y los fluidos intraformación antes y después de la inyección de CO₂, considerando parámetros como la composición mineral, porosidad, y alteraciones en la microestructura, para determinar la viabilidad del almacenamiento de CO₂ en estas formaciones.</p>	<p>ETAPA 4: Análisis mineralógico y composicional post-inyección.</p>	<p>ACTIVIDAD 4.1: Cortar las muestras post-inyección en secciones delgadas para su observación y análisis microscópico. ACTIVIDAD 4.2: Realizar un análisis DRX para identificar y cuantificar cambios mineralógicos inducidos por las condiciones experimentales (CO₂ seco, con agua destilada y con agua de pozo).</p>
	<p>ETAPA 5: Análisis integral de resultados</p>	<p>ACTIVIDAD 5.1: Integrar y comparar los resultados obtenidos. Determinar cambios mineralógicos, texturales, petrofísicos y geoquímicos. ACTIVIDAD 5.2: Establecer conclusiones basadas en los resultados experimentales sobre los procesos que afectan la capacidad de almacenamiento de CO₂. ACTIVIDAD 5.3: Presentar recomendaciones para futuras investigaciones en el contexto del almacenamiento geológico de CO₂ y el recobro mejorado de petróleo.</p>

5. Caracterización inicial de las muestras

Mediante pruebas en laboratorio, se determinó para cada roca propiedades petrofísicas, entre los que se incluyen Porosidad Real [%], Densidad de Granos [g/cm³] y Permeabilidad [mD]; los valores obtenidos se muestran en la tabla 4.

Tabla 2.

Datos de petrofísica básica.

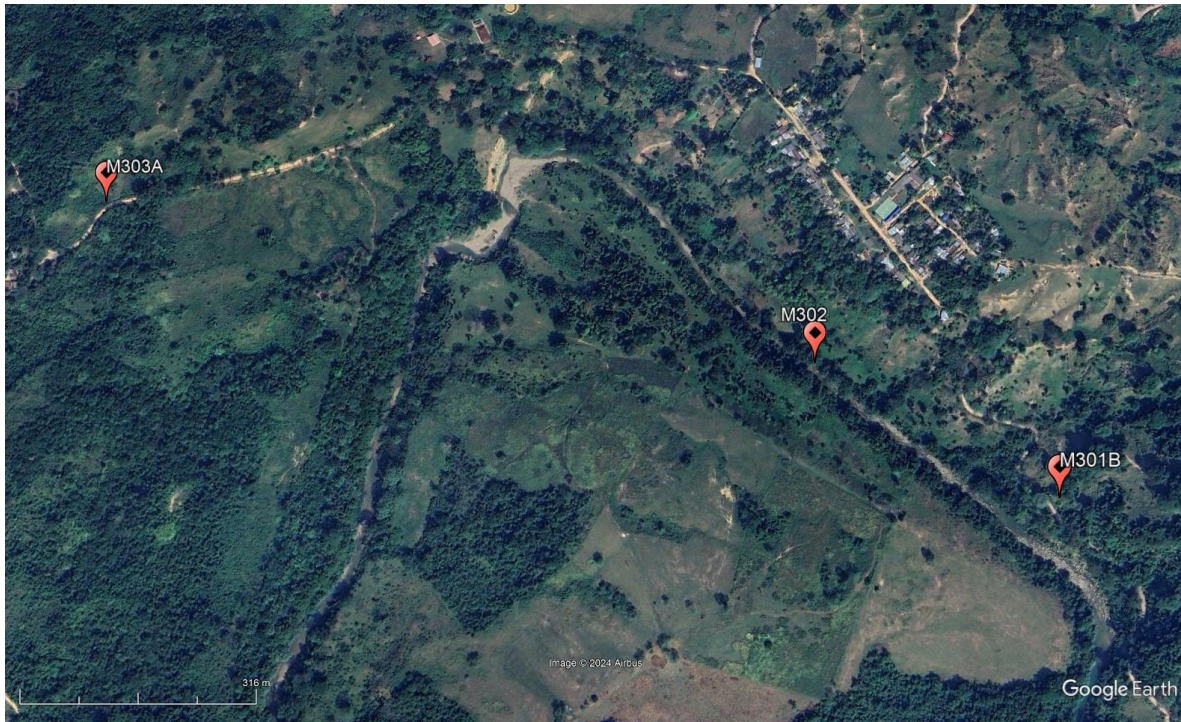
Muestra	Formación	Porosidad Real	Densidad de Granos medida	Permeabilidad(mD)			
M301B	Esmeraldas	13,70%	2,690	6,896	5,629	7,525	6,683
M302	Mugrosa	14,80%	2,499	6,014	5,685	8,576	6,758
M303A	Mugrosa	23,03%	2,587	85,376	86,268	85,755	85,800

A cada muestra se le fue asignada una nomenclatura (M301B, M302 y M303A) correspondiente a su lugar de recolección. A continuación, se presentará una breve descripción de las rocas que conforman las muestras de este estudio y se hablará con más detalle sobre las propiedades petrofísicas acompañado de su respectivo contexto geológico, presentando datos de localización, imágenes de afloramientos, muestras de mano, y los *plugs* en los que se realizaron los procesos de inyección.

La figura 14 muestra una imagen satelital con los puntos donde fue recolectada cada roca, que, si se compara con la figura 13, puede evidenciarse que estas fueron recolectadas en sitios estratégicos: M301B en el límite superior de la Formación Esmeraldas, M302 y M303A en los miembros inferior y superior de la Formación Mugrosa, respectivamente.

Figura 14.

Puntos de recolección de las muestras.



5.1. M301-B

Figura 15.

Plug de la muestra M301-B.



Localizada en 7°14'38.68"N y 73°21'28.75"O. Esta roca se encuentra en el límite superior de la Formación Esmeraldas, infrayaciendo a la Formación Mugrosa. La muestra cortada tiene un peso de 157,45 g, con un diámetro promedio de 3,738 mm y una longitud promedio de 6,178 mm. La porosidad real de la muestra se determinó en 13,70%, mientras que la densidad de granos medida es de 2,690 g/cm³. Las mediciones de permeabilidad se realizaron en tres puntos distintos de la muestra, obteniendo valores de 6,896 mD, 5,629 mD y 7,525 mD, con un valor promedio de 6,683 mD. Esta metodología de muestreo considera las heterogeneidades naturales de la roca, garantizando así que los datos obtenidos representen con precisión las propiedades de la Formación.

La muestra 301-B (figura 15) presenta una estructura moteada e irregular, sin una orientación evidente. Esta disposición estructural irregular podría contribuir a una distribución aleatoria de los poros, lo que puede afectar la interconexión de los mismos. Como resultado, la permeabilidad medida, aunque moderada, podría reflejar esta falta de orientación, sugiriendo que el flujo de fluidos no está favorecido en ninguna dirección particular. A simple vista, se observa una textura granular, con granos minerales apreciables que le confieren un aspecto ligeramente rugoso y poco pulido a la superficie. Su composición es predominantemente cuarzosa, con una matriz que arcillosa que influye en su color y textura superficial, con presencia de minerales micáceos, aportando un ligero brillo o reflejo escamoso en ciertas zonas.

5.2. M302

Figura 16.

Plug de la muestra M302



Localizada a 7°14'45.19"N y 73°21'39.73"O. Esta roca pertenece al miembro inferior de la Formación Mugrosa. La muestra cortada Tiene un peso de 125,6 g, presenta un diámetro promedio de 3,710 mm y una longitud promedio de 5,457 mm.

La porosidad real se determinó en 14,80%, mientras que la densidad de granos es de 2,499 g/cm³. Las mediciones de permeabilidad realizadas en tres puntos distintos arrojaron valores de 6,896 mD, 5,629 mD y 7,525 mD, con un promedio de 6,683 mD; La metodología de muestreo en tres puntos distintos permite considerar las heterogeneidades naturales de la roca, garantizando que los datos obtenidos proporcionen una representación más precisa y fiable de las propiedades de la roca almacén. Estos datos sugieren que la muestra presenta una porosidad adecuada para el almacenamiento de fluidos, aunque su permeabilidad, siendo moderada, podría limitar el flujo de estos.

La roca (figura 16) presenta una tonalidad clara, tendiendo al beige claro con matices grisáceos y amarillentos, sugiriendo una composición compleja no dominada únicamente por el

cuarzo. La textura visible es granular y heterogénea, con granos de tamaños variables que dan a la superficie un aspecto rugoso e irregular. Su matriz es de naturaleza arcillosa. La presencia de feldespatos potásicos y micas como, contribuyen a la variedad cromática y a la textura no completamente cuarzosa de la roca, alejándola del aspecto típico de una arenisca cuarzosa pura y sugiriendo una composición mineralógica mixta y más compleja.

Es relevante destacar que la orientación plano-paralela de las capas observada en su sección cilíndrica (figura 16), podría estar influenciando la estructura interna de la roca. Esta disposición en su estructura interna, hace que las redes de poros interconectadas, predominen en dirección paralela a las capas, es decir, de forma horizontal. Esto podría estar limitando el flujo de fluidos en la dirección transversal. Como resultado, la permeabilidad medida, aunque moderada, refleja esta disposición estructural, sugiriendo que la capacidad de la roca para permitir el paso de fluidos es mayor en direcciones paralelas a las capas que en direcciones perpendiculares a las mismas. También se observan fracturas prominentes que aumentan la porosidad inicial de la roca y crear redes de poros interconectadas, permitiendo también el paso de los fluidos de forma vertical.

5.3. M303-A

Figura 17.

Plug de la muestra M303-A



Localizada a 7°14'53.48"N y 73°22'15.00"O, más elevada estratigráficamente que la muestra anterior, pertenece al miembro superior de la Formación Mugrosa, en contacto con la base de la Formación Colorado, a la cual infrayace. El plug de esta roca fue enmangado para mejorar el tratamiento, como se ve en la figura 17. Cuenta con un peso de 125,63 g, un diámetro promedio de 3,818 mm y una longitud promedio de 5,512 mm. La porosidad real medida en esta muestra es notablemente alta, alcanzando un 23,03%. La densidad de granos se determinó en 2,587 g/cm³. Las mediciones de permeabilidad arrojaron valores extremadamente altos: 85,376 mD, 86,268 mD y 85,755 mD, con un promedio de 85,800 mD, esto debido a la presencia de fallas que alteran notablemente su estructura y con ello, el espacio para que atraviesen fluidos, como puede evidenciarse en la figura 18.

Se presenta como una roca de tonalidad clara a moderadamente clara, exhibiendo matices que varían entre blanquecinos, beige pálidos y grises suaves. Contiene una gran cantidad de cuarzo y hace mantener un aspecto granular a simple vista. La caolinita, junto con otras arcillas y feldespatos como la albita y microclina, influyen en la textura, confiriéndole un aspecto

ligeramente menos limpio y más terroso, en comparación con una arenisca dominada exclusivamente por cuarzo.

Figura 18.

Plug cortado de M303A después de ser saturado con inyección de salmuera.



La figura 19, muestra el afloramiento donde fue recolectada la roca, se aprecia una textura con disposición orientada en capas finas, formando planos paralelos homogéneos y uniformes que se extienden lateralmente, sugiriendo una deposición en condiciones relativamente estables, posiblemente en un ambiente de baja energía como un lago tranquilo o una llanura de inundación. También se observa estratificación cruzada y en artesa, lo cual indica la presencia de corrientes de agua o viento que transportaban sedimentos y los depositaban en forma de dunas o barras.

Figura 19.

Afloramiento de recolección de M303-A.



6. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos tras el proceso experimental, divididos en observaciones cualitativas y análisis cuantitativos.

Las observaciones cualitativas incluyen imágenes de las muestras tomadas en vista de lupa antes y después del tratamiento con CO₂, seguidas de microfotografías de secciones delgadas bajo luz transmitida (nicos paralelos y cruzados) correspondientes únicamente al estado posterior a la inyección de la microestructura y la mineralogía de las muestras.

Los porcentajes reportados corresponden a la relación entre las fases policristalinas identificadas sin considerar el porcentaje de material amorfo. De esta forma podemos evaluar los cambios mineralógicos y de elementos químicos en cada muestra, con el fin de comparar las fases presentes antes y después del tratamiento y de esta forma conocer las alteraciones químicas asociadas a la interacción roca-fluido. También se llevó a cabo un análisis fisicoquímico de la salmuera utilizada en una de las pruebas. Con base en los datos obtenidos, se estimaron las reacciones químicas que tuvieron lugar durante el tratamiento con CO₂. Estas estimaciones

incluyen explicaciones y teorías sobre los aumentos y pérdidas de minerales observados en las muestras.

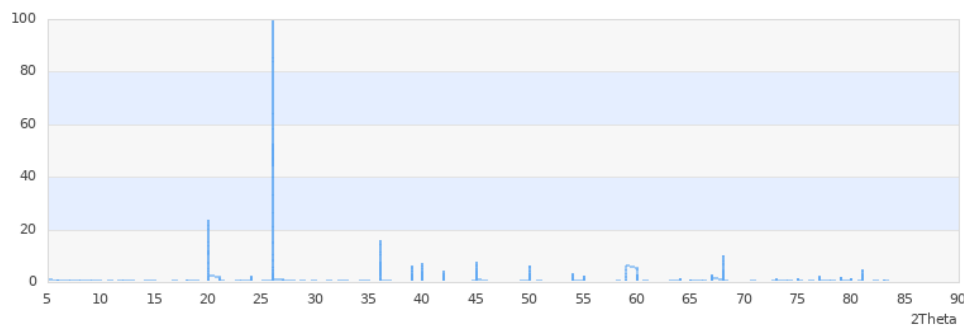
El análisis inicial y la visualización de los espectros se realizaron utilizando el software Profex. Para la identificación de fases, se utilizaron patrones de referencia accesibles a través de la base de datos gratuita Mindat.org (2025).

La figura 20 representa un difractograma de rayos X. En este gráfico, el eje X muestra los valores de 2-Theta° (2θ), que corresponden a los ángulos de difracción, mientras que el eje Y representa la intensidad relativa de los picos, lo que indica la abundancia relativa de cada fase cristalina en la muestra. Se interpretaron los resultados evaluando los efectos de los distintos métodos de inyección de CO₂ en las muestras, identificando patrones y tendencias en las alteraciones mineralógicas y estructurales.

Figura 20.

Ejemplo espectro DRX del cuarzo. Data set: Spruce Claim, King County, Washington USA 73

Mindat.org (2025).

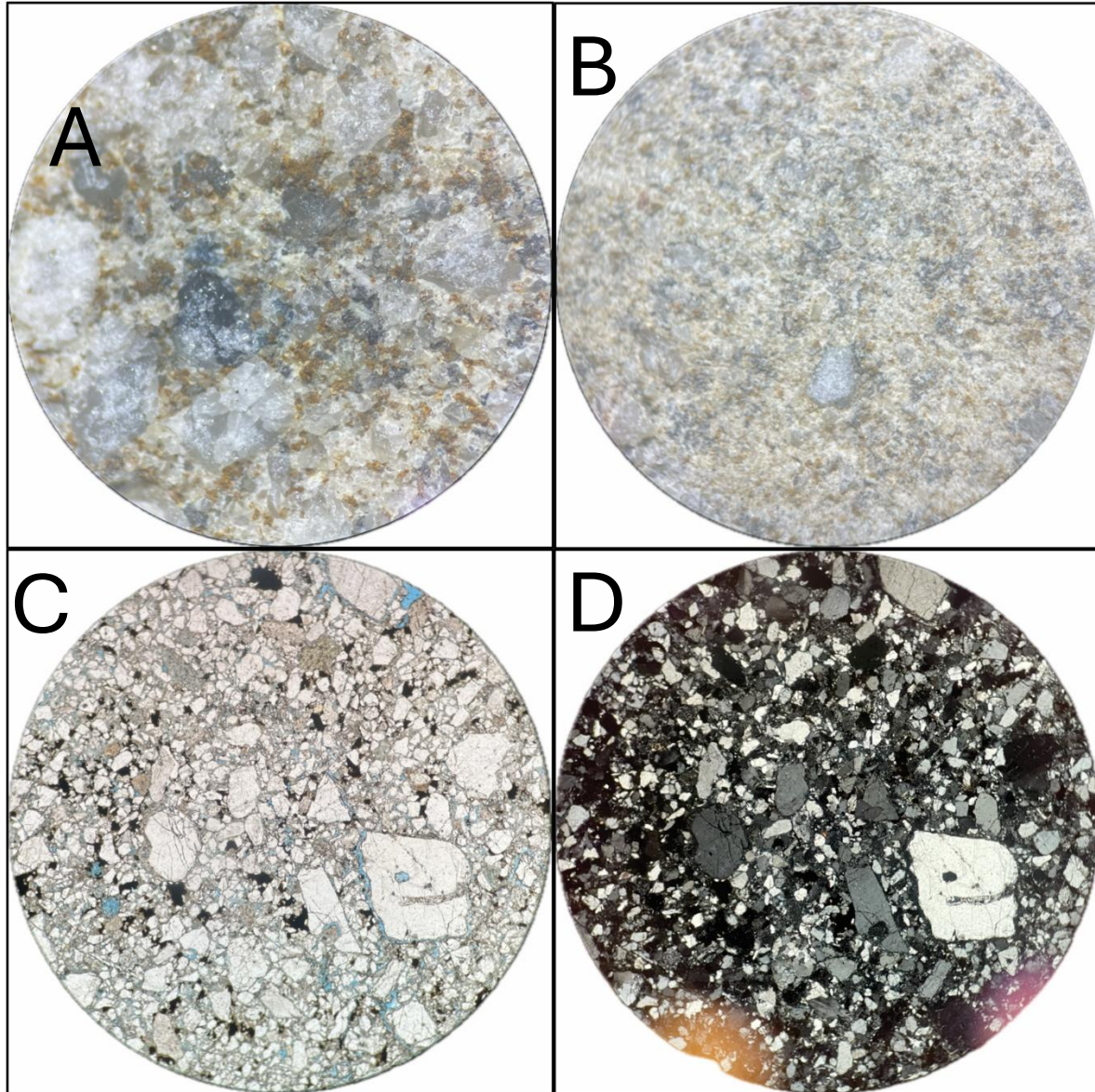


6.1 Análisis cualitativo

M301 65°C

Figura 21.

Arenisca de la formación Esmeraldas tratada con CO₂ y agua destilada a 65°C de temperatura.



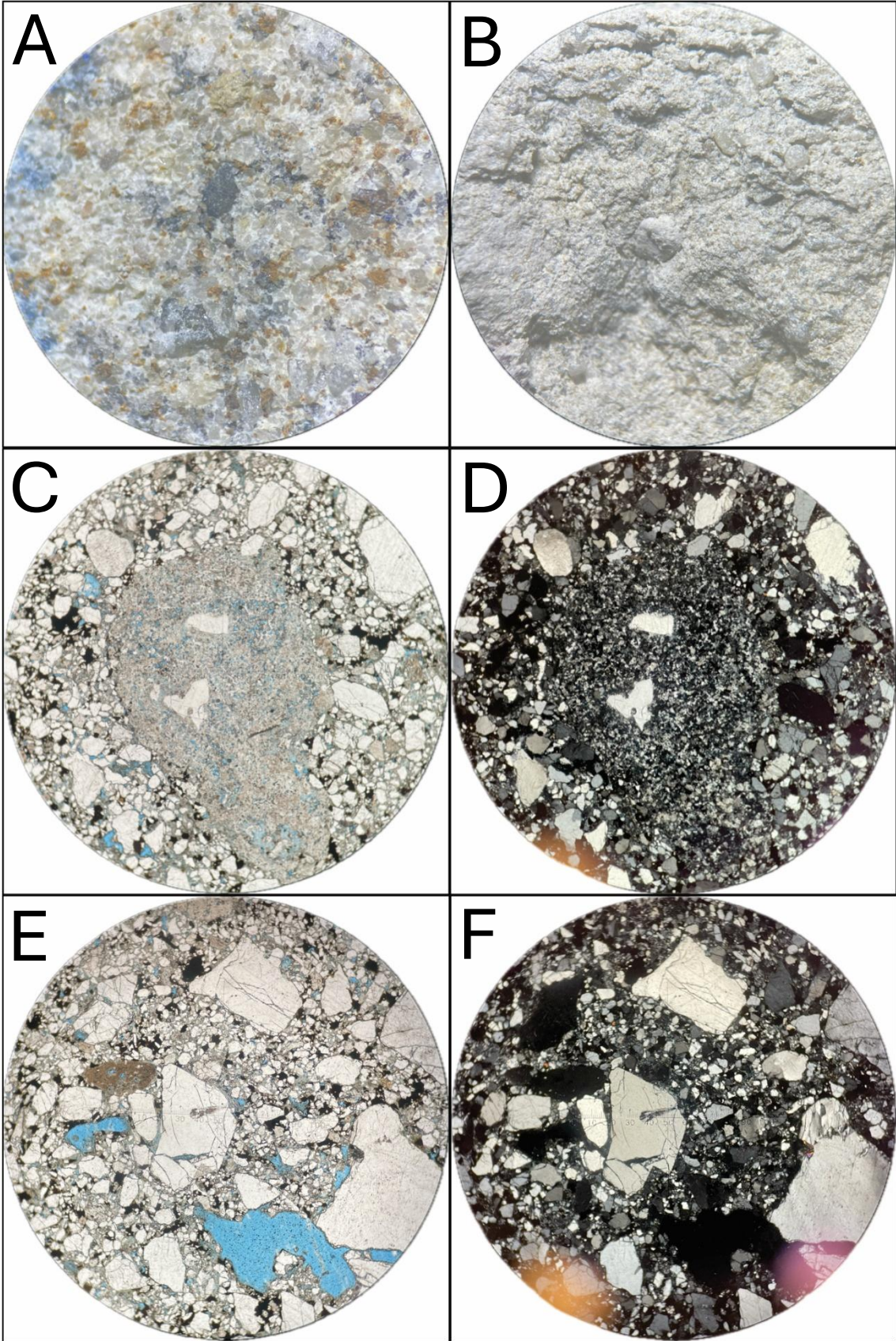
(A) Vista de lupa de la roca sin alterar. Presenta textura granular con predominancia de granos de cuarzo subangulosos de bordes definidos, algunos con fracturas internas. Se observan

minerales opacos, distribuidos de forma heterogénea. (B) Vista de lupa post-inyección. Se observa una superficie más homogénea, con una aparente reducción de la porosidad visible en comparación con A. Se evidencian zonas de precipitación secundaria, probablemente asociadas a la neoformación de minerales arcillosos o carbonatos finos. Los bordes de algunos granos parecen menos definidos, indicando disolución incipiente. (C) y (D) Sección delgada post-inyección en nicols paralelos y cruzados. Se observan microfracturas rellenas y una redistribución de minerales opacos. La porosidad intergranular se encuentra parcialmente ocupada por fases minerales secundarias. Se observan zonas de disolución selectiva y posibles precipitados de carbonatos micrométricos. Destacan granos de cuarzo con extinción ondulante, indicativa de deformación interna.

M301 130°C

Figura 22.

Arenisca de la Formación Esmeraldas tratada con CO₂ y agua destilada a 130°C.

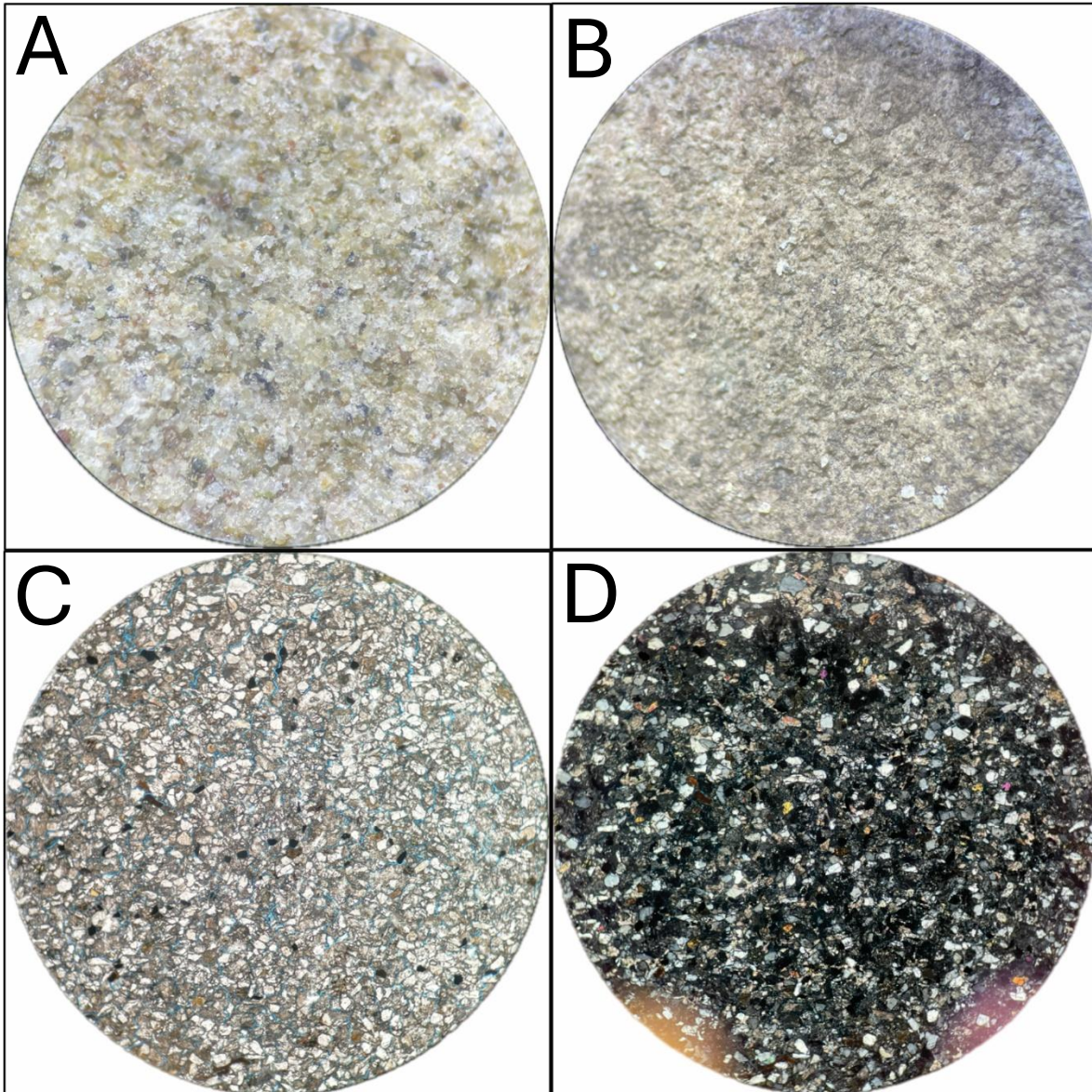


(A) Vista de lupa de la roca sin alterar. Se observa una textura compacta dominada por granos de cuarzo y poca fracturación y porosidad evidentes. (B) Vista de lupa post-inyección. Abundante disolución en la superficie de la roca, la textura se tornó arcillosa y la integridad de la muestra se mantiene por su estructura dominada por cuarzo. (C) y (D) Vista de sección delgada en nicoles paralelos y cruzados. Zona marcada por la disolución de un macrocristal de cuarzo donde se formó porosidad intragranular. Se observan los minerales opacos rellenando los poros de la roca, algunos cristales de cuarzo fueron movilizados y en ellos precipitaron otros opacos. (E) y (F) Sección delgada en nicoles paralelos y cruzados. Zona de evidente desplazamiento de los cristales que da lugar a un mayor espacio poral, también es evidente la precipitación de minerales de opacos rellenando los poros intergranulares, sin embargo, nada parece indicar que el aumento de temperatura diese lugar a una mayor captación de CO₂ por medio de precipitación, a simple vista, la cantidad de opacos en la muestra 301B a 65°C y a 130°C tienen la capacidad de almacenar similares cantidades de CO₂ dentro de sus poros o su estructura cristalina, sin embargo es evidente que hay una mayor disolución en la muestra tratada a mayor temperatura, lo que da lugar a un mayor espacio total en la porosidad.

M302 65°C

Figura 23.

Arenisca de la Formación Mugrosa tratada con CO₂ seco a 65°C.



(A) Vista de lupa de la roca sin alterar. Textura granular compacta dominada por una facie cuarzofeldespática de cristales subredondeados, con cemento silíceo y poca presencia de calcita y micas. No hay fracturas prominentes que marquen una apertura intergranular (B) Vista de lupa post-inyección a 65°C. Notorio oscurecimiento de la textura, se pierden los bordes de los cristales y la textura se torna a un aspecto más arcilloso. Es posible encontrar cristales individuales de cuarzo y calcita, también hay presencia de micas. (C) y (D) Sección delgada en nicols paralelos y cruzados. Resalta la presencia de minerales opacos distribuidos de forma casi lineal en varias

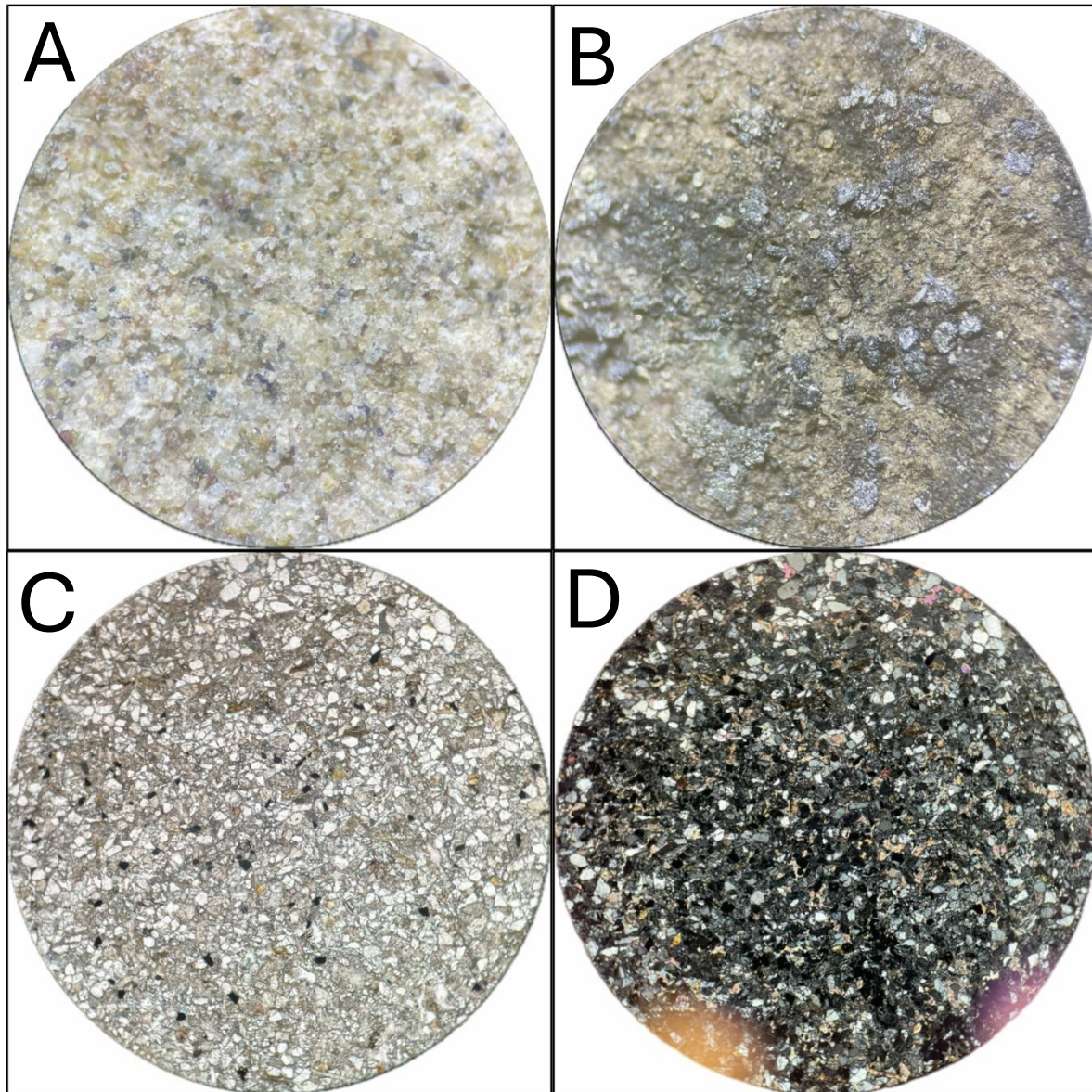
franjas, sin embargo, puede verse la estructura de la roca casi inalterada, no se observan eventos de disolución parcial ni de apertura de espacios porales prominentes, el CO₂ capturado parece encontrarse superficialmente sobre la roca que, sumado a la baja permeabilidad de esta, hace que sea difícil que el compuesto percole por entre la estructura sin una alteración considerable.

M302 130°C

(A) Vista de lupa de la roca sin alterar. Textura granular compacta cuarzofeldespática con cristales subangulares a subredondeados, cemento silíceo y poca presencia de calcita y micas. Los cristales están muy unidos reduciendo la porosidad y no se observan fracturas o alguna organización en los granos. (B) Vista de lupa post inyección a 130°C. Cambios considerables en la textura superficial denotados por el oscurecimiento parcial y la formación de “costras” formadas por los minerales opacos de aspecto ferromagnesianos, se observa mayor grado de disolución al encontrar cristales de cuarzo sueltos, posiblemente por la reducción de las arcillas que conforman la matriz. (C) y (D) Sección delgada en nicoles paralelos y cruzados que muestra un comportamiento similar a la muestra calentada a 65°C, aquí también hay poca alteración química ni apertura de espacios porosos significativos tanto intergranular como intragranular. Se puede destacar la anisotropía de los opacos con respecto a la muestra a 65°C.

Figura 24.

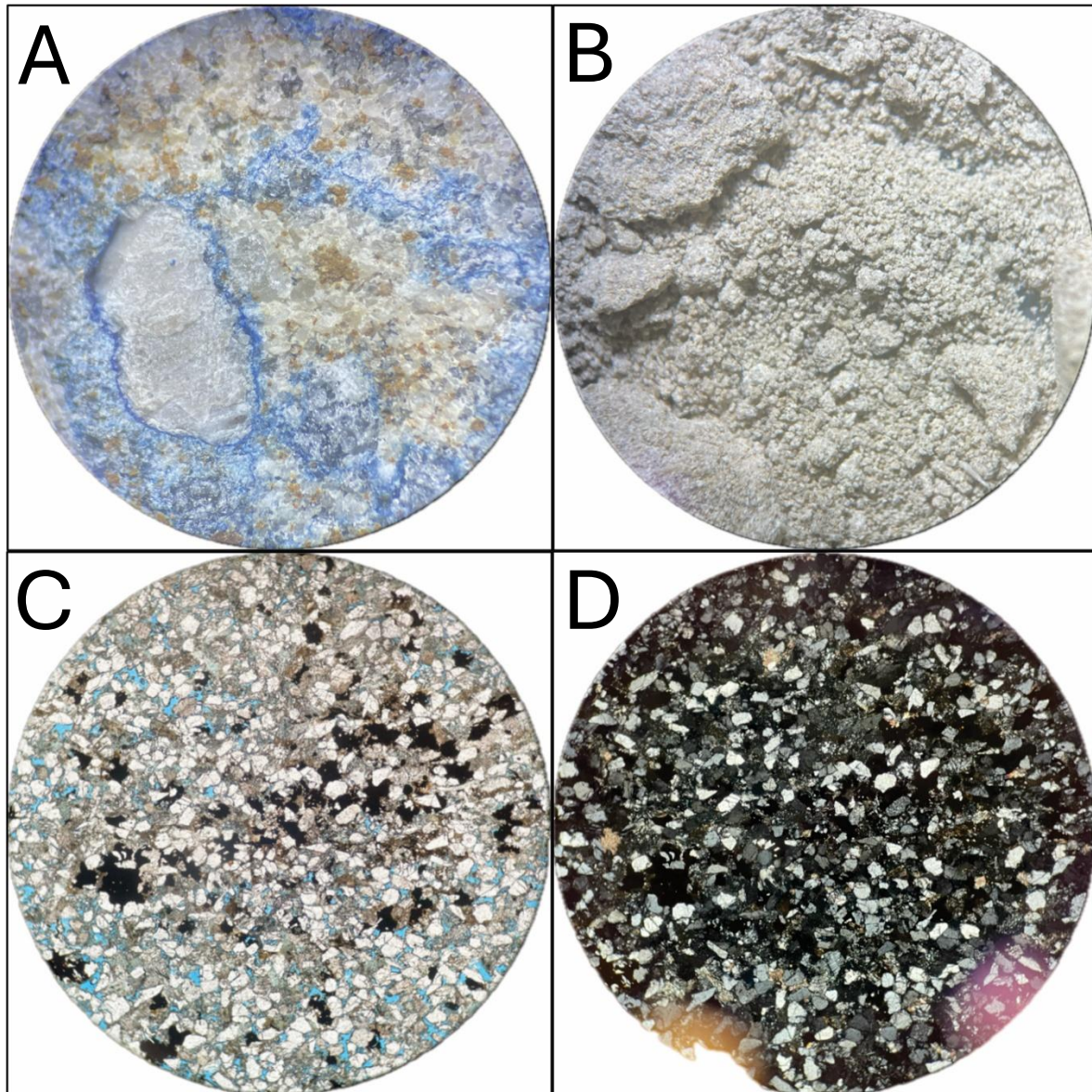
Arenisca de la Formación Mugrosa tratada con CO₂ seco a 130°C.



M303 65°C

Figura 25.

Arenisca de la Formación Mugrosa tratada con CO₂ salmuera a 65°C.



(A) Vista de lupa de la roca sin alterar, el tinte azul no corresponde al color original de la roca. Estructura cuarzofeldespática con una textura granular compacta con cristales subangulares a subredondeados, cemento silíceo y casi inexistente presencia de calcita y micas. (B) Vista de lupa post inyección a 65°C. La roca, que ya presentaba una estructura friable después de ser imbuida en el agua, no pudo mantener su integridad después de someterse a las pruebas de temperatura y presión. Hay una disolución considerable en la parte siliciclástica y se aprecia la formación de arcilla y agregados minerales de colores cobrizos, probablemente asociados a óxidos

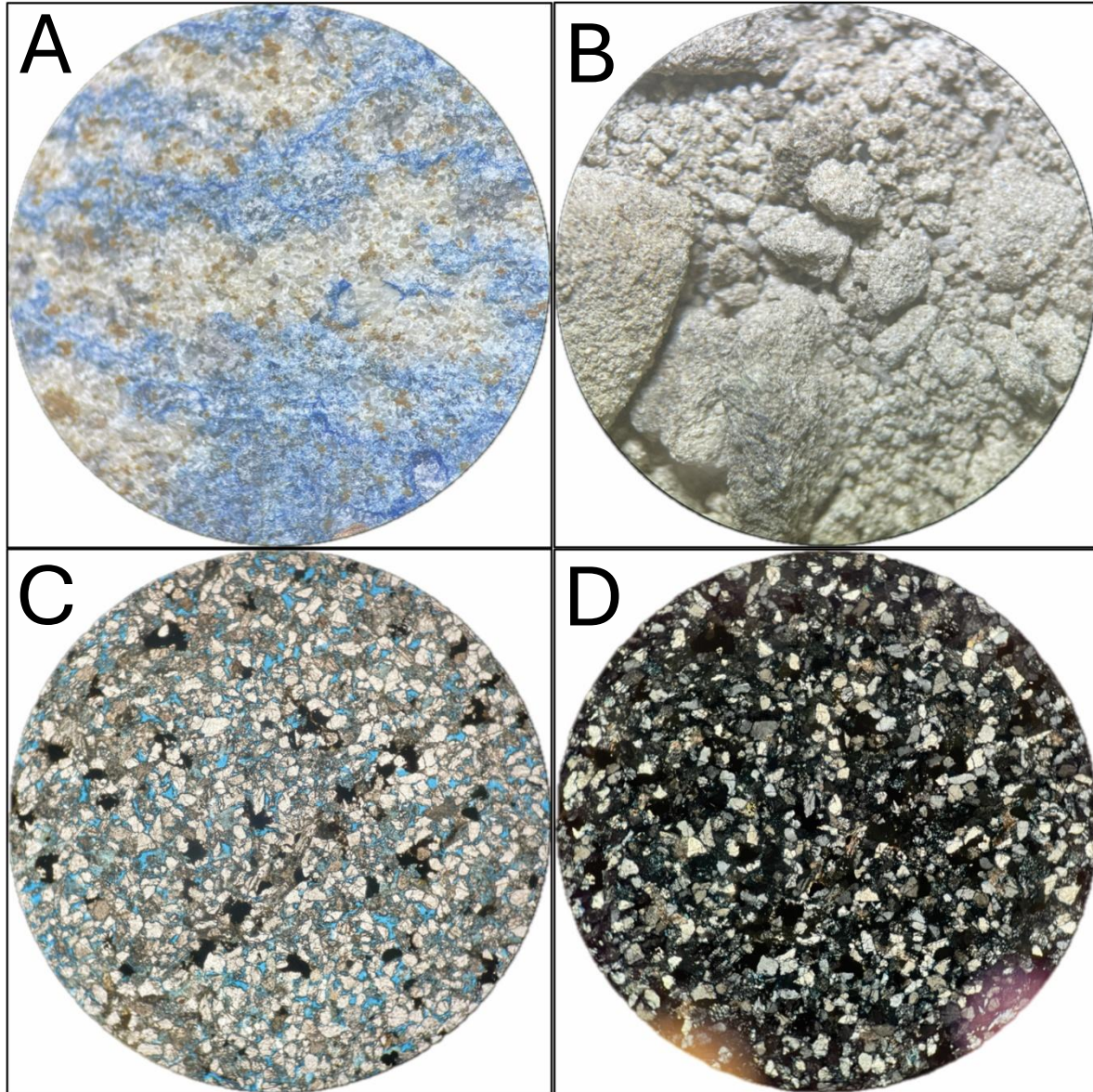
e hidróxidos ferromagnesianos, se pueden encontrar cristales de cuarzo sueltos. (C) y (D) Sección delgada en nicoles paralelos y cruzados. En este caso es significativa la cantidad de opacos que pudieron entramparse dentro de la porosidad intergranular, también parece haber desplazamiento de granos que da lugar a espacios porosos. No hay un orden específico en el entrampamiento del CO₂, su distribución en la muestra parece ser homogénea.

M303A 130°C

(A) Vista de lupa de la roca sin alterar, el tinte azul no corresponde al color original de la roca. Estructura cuarzofeldespática con una textura granular compacta con cristales subangulares a subredondeados, cemento silíceo y casi inexistente presencia de calcita y micas. (B) Vista de lupa post inyección a 130°C. Esta muestra tampoco pudo mantener su integridad después de someterse a las pruebas de temperatura y presión. Hay una disolución considerable en la parte siliciclástica y se aprecia la formación de arcilla y agregados minerales de colores cobrizos, probablemente asociados a óxidos e hidróxidos ferromagnesianos, se mantienen sin alterar los granos más gruesos y compactos de sílice. (C) y (D) Sección delgada en nicoles paralelos y cruzados. El CO₂ es capturado entre la porosidad intergranular, en paquetes repartidos aleatoriamente en los espacios que iban dejando los granos movilizados. Hay una notable alteración geoquímica y los minerales opacos están en contacto con los demás cristales. La alta temperatura favoreció a una distribución desordenada de los minerales formados por el CO₂.

Figura 26.

Arenisca de la Formación Mugrosa tratada con CO₂ con salmuera a 130°C.



6.2 Análisis cuantitativo (DRX)

M301 original

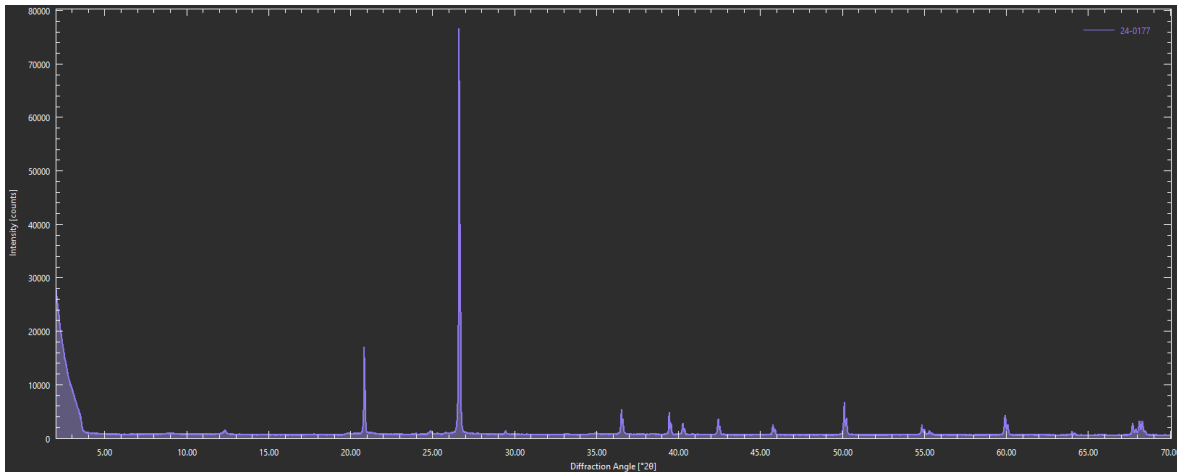
Tabla 3.

Resultados de análisis DRX de la muestra M301 sin alterar.

Mineral	Fórmula química	Cuantitativo
Cuarzo	SiO ₂	91,22%
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	5,50%
Moscovita	K(Al ₄ Si ₂ O ₉ (OH) ₃)	5,64%
Calcita	Ca(CO ₃)	<1%
Rutilo	TiO ₂	<1%

Figura 27.

Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 301 sin alterar



La composición mineralógica inicial de la muestra M301 en la tabla 5 se caracteriza por un alto contenido de cuarzo (91,22%), acompañado de caolinita (5,50%) y moscovita (5,64%). La presencia de calcita y rutilo es menor al 1%. Esta distribución sugiere que la arenisca es predominantemente silíceo, con pequeñas cantidades de minerales arcillosos y accesorios.

La Figura 27 presenta el espectro de difracción de rayos X correspondiente a la muestra antes de la inyección de CO₂. Este espectro revela una composición mineralógica dominada significativamente por cuarzo (SiO₂), el cual representa el 91,22% en peso de la muestra, localizado aproximadamente en $2\theta = 26-27^\circ$. La intensidad y forma de este pico dominante son características de la fase cristalina de cuarzo y reflejan su abundancia en la muestra.

Adicionalmente, el espectro presenta otro pico de difracción de intensidad considerablemente menor en $2\theta = 21^\circ$, probablemente asociado a la presencia de fases minerales minoritarias, como la moscovita $K(Al_4Si_2O_9(OH)_3)$ y caolinita $(Al_2(Si_2O_5(OH)_4))$ que tienen su pico de difracción aproximadamente en 12° y 27° respectivamente; con proporciones muy similares de 5,64% y 5,50% en peso, la intensidad y ángulos de difracción pueden variar. La detección de estos picos secundarios, aunque de menor intensidad en comparación con el pico principal del cuarzo, confirma la presencia de estas distintas fases cristalinas como micas y arcillas, aunque en proporciones sustancialmente inferiores al cuarzo.

En contraste, la presencia de calcita (CaCO₃) y rutilo (TiO₂), reportados en proporciones traza (<1% en peso), no se manifiesta en el espectro DRX mediante picos distintivos. Dada su baja concentración, es probable que las señales de difracción correspondientes a estas fases sean de intensidad demasiado débil para ser discernibles del ruido de fondo o estén solapadas por picos más intensos de las fases mayoritarias.

El espectro DRX de M301 pre-inyección exhibe un fondo general relativamente bajo y picos de difracción, en su mayoría, de forma aguda. Esta característica sugiere una buena cristalinidad de las fases minerales constituyentes y/o relativamente grandes. En conjunto, el patrón de difracción obtenido y el análisis cuantitativo mineralógico presentan una alta coherencia, confirmando una muestra arenisca caracterizada por una matriz cuarzosa dominante, enriquecida

con fases minoritarias de moscovita y caolinita, y trazas de calcita y rutilo que, en este análisis cualitativo del espectro, no se distinguen con claridad.

M301 post-inyección 65°C

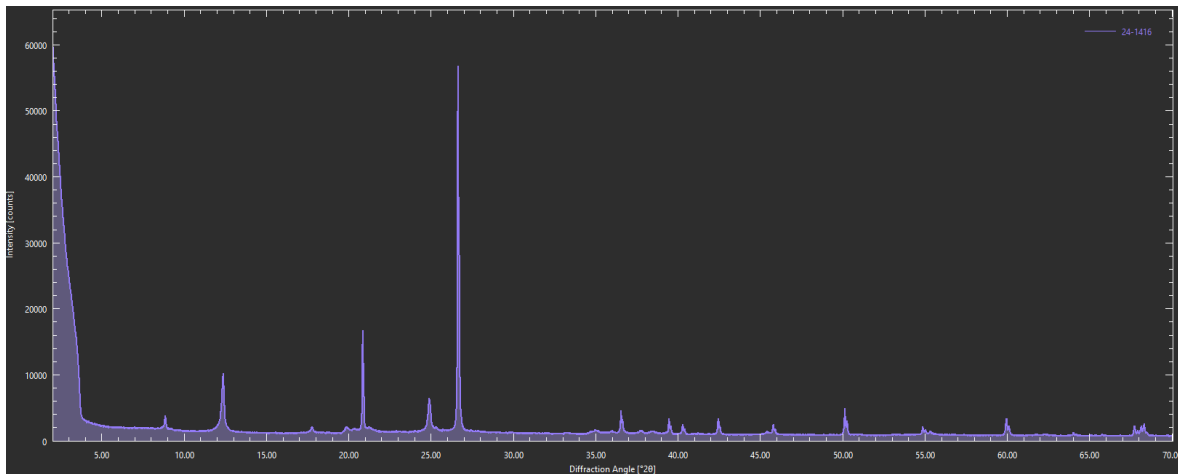
Tabla 4.

Resultados del análisis DRX de la muestra M301 post-inyección a 65°C

Mineral	Fórmula química	Cuantitativo
Cuarzo	SiO ₂	68,16%
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	22,11%
Goethita	FeO(OH)	4,88%
Moscovita	KAl ₂ ((AlSi ₃)O ₁₀)(OH) ₂	3,24%
Clintonita	Ca ₃ Al(Al ₃ SiO ₁₀)(OH) ₂	<1%
Anatasa	TiO ₂	<1%

Figura 28.

Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 301 a 65°C.



En la cuantificación de las fases cristalinas de la tabla 6 tras la inyección de CO₂ a 65°C, se observa una notable disminución en el contenido de cuarzo, reduciéndose al 68,16%. En contraste, la caolinita aumenta significativamente a un 22,11%, indicando una transformación

mineralógica influenciada por la interacción con el CO₂. La aparición de goethita (4,88%) sugiere procesos de oxidación de hierro, mientras que la moscovita disminuye a un 3,24%. La presencia de clintonita y anatasa, aunque en cantidades menores al 1%, destaca la formación de nuevos minerales secundarios.

Analizando el espectro de DRX (Figura 28), observamos una modificación significativa en la composición mineralógica en comparación con la muestra pre-inyección. El cuarzo (SiO₂), aunque sigue siendo la fase dominante, ha disminuido notablemente en proporción, representando ahora el 68,16% en peso. Este descenso se refleja en el espectro con un pico principal que, aunque aún intenso y agudo, muestra una reducción en su intensidad máxima en relación al espectro pre-inyección. La posición de este pico dominante se mantiene en el rango aproximado de $2\theta = 26-27^\circ$, consistente con la fase de cuarzo.

En contraste con la disminución del cuarzo, se observa un incremento sustancial en la proporción de caolinita (Al₂(Si₂O₅(OH)₄)) en el pico de $2\theta = 12-13^\circ$, que asciende al 22,11% en peso, probablemente aprovechando el aluminio de la moscovita (KAl₂((AlSi₃)O₁₀)(OH)₂) disuelta, que muestra una ligera disminución en su proporción al 3,24% en peso.

También podemos descubrir la aparición de picos correspondientes a goethita (FeO(OH)), una fase mineral no detectada en la muestra pre-inyección. La goethita se cuantifica ahora en un 4,88% en peso, indicando su precipitación o formación como resultado de la interacción con CO₂, el agua y probablemente iones de hierro residuales que no formaban parte de la estructura cristalina original

Las fases calcita (CaCO₃) y rutilo (TiO₂), que estaban presentes en trazas en la muestra original, ya no se detectan en el análisis cuantitativo post-inyección. Dada su presencia traza inicial, su contribución al espectro pre-inyección ya era probablemente mínima.

Adicionalmente, se reporta la presencia de clintonita (Ca₃Al(Al₃SiO₁₀)(OH)₂) y anatasa (TiO₂) en proporciones traza (<1% en peso), fases no identificadas en la muestra pre-inyección y que pudo haber surgido de la disolución y recristalización de otros minerales como calcita, rutilo y moscovita.

M301 post-inyección 130°C

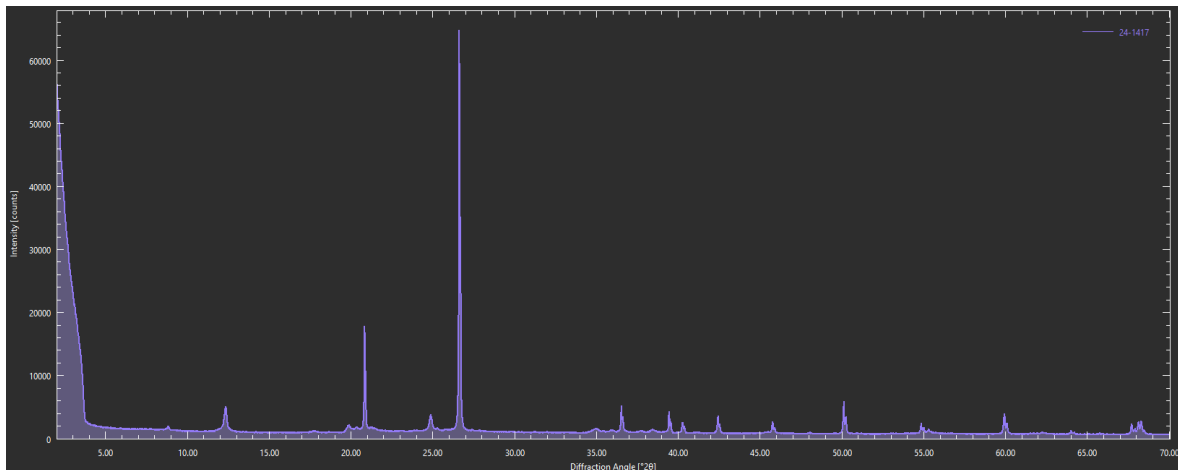
Tabla 5.

Resultados del análisis DRX de la muestra M301 post-inyección a 130°C.

Mineral	Fórmula química	Cuantitativo
Cuarzo	SiO ₂	77,30%
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	16,59%
Moscovita	KAl ₂ ((AlSi ₃)O ₁₀)(OH) ₂	4,96%
Marialita	(Na _{3.78} Ca _{0.22})(Al _{3.22} Si _{8.78} O ₂₄)Cl	<1%
Anatasa	TiO ₂	<1%

Figura 29.

Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 301 a 130°C.



El espectro DRX de la muestra M301 tras la inyección de CO₂ a 130°C (Figura 29) indica una composición mineralógica alterada, aunque con diferencias notables respecto a las anteriores. El cuarzo (SiO₂), predominante, representa el 77,30%, mostrando una proporción intermedia entre la muestra original (91,22%) y la de 65°C (68,16%). El pico principal, aún intenso y agudo en $2\theta = 26-27^\circ$, refleja esta abundancia relativa.

La caolinita (Al₂(Si₂O₅(OH)₄)) se cuantifica en 16,59%, mostrando un incremento considerable respecto a la original (5,50%), aunque menor que a 65°C (22,11%), esto se puede visualizar en la reducción del pico $2\theta = 12-13^\circ$. En este caso, el efecto de la temperatura pudo haber acelerado la reactividad entre minerales y con ello el intercambio iónico, “devolviendo” aluminio y sílice a la moscovita y cuarzo que esta vez aumentaron.

La moscovita (KAl₂((AlSi₃)O₁₀)(OH)₂), con un 4,96%, presenta una ligera recuperación respecto a la muestra a 65°C (3,24%), acercándose más a su proporción original (5,64%). Esto podría indicar una menor alteración o recristalización de la moscovita a 130°C en comparación con 65°C. Su región espectral es incierta porque es muy parecida a la del cuarzo.

Al igual que en la muestra a 65°C, la calcita y el rutilo no se detectan en el análisis cuantitativo (Tabla 7). Sin embargo, en este caso, la goethita está ausente, en cambio, se identifican fases traza de marialita (Na_{3.78}Ca_{0.22})(Al_{3.22}Si_{8.78}O₂₄)Cl y anatasa (TiO₂).

M302 original

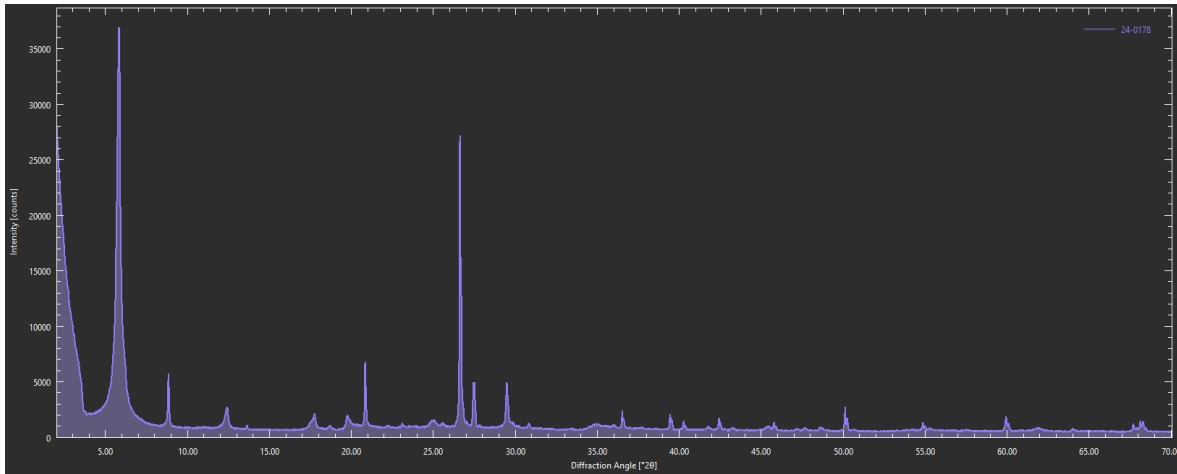
Tabla 6.

Resultados del análisis DRX de la muestra M302 sin alterar.

Mineral	Fórmula química	Cuantitativo
Cuarzo	SiO ₂	35,07%
Montmorillonita	Ca _{0.5} (Al ₂ Si ₄ O ₁₁ (OH))	25,88%
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	8,79%
Microclina	K(AlSi ₃ O ₈)	6,92%
Moscovita férrica	K _{0.92} Na _{0.08} Al _{1.86} Fe _{0.14} Mg _{0.02} (Al _{0.97} Si _{3.03} O ₁₀)(OH) _{1.91} F _{0.09}	5,62%
Clinocloro	Mg _{2.5} Fe _{1.65} Al _{1.5} Si _{2.2} Al _{1.8} O ₁₀ (OH) ₈	5,39%
Calcita	Ca(CO ₃)	5,11%
Illita	(K _{0.74} Ca _{0.03})(Al _{1.92} Mg _{0.09} Fe _{0.01})(Si _{3.22} Al _{0.78})O ₁₀ (OH) ₂	2,88%
Calcita magnesiana	Mg _{0.1} Ca _{0.9} CO ₃	<1%
Vermiculita	Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	<1%
Microclina	K(AlSi ₃ O ₈)	<1%
Rutilo	TiO ₂	<1%
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	<1%

Figura 30.

Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 302 sin alterar.



El espectro DRX de la muestra M302 pre-inyección (Figura 30) revela características distintivas en su patrón de difracción, directamente relacionadas con su composición mineralógica heterogénea (Tabla 8).

Se observa un pico de intensidad y forma pronunciada a muy bajos ángulos, aproximadamente en $2\theta \approx 6^\circ$. Este pico sobresaliente en la región de bajo 2θ puede estar relacionado a la presencia de montmorillonita (25,88%), que puede exhibir picos de difracción intensos a ángulos bajos debido a su estructura laminar y expansible. La intensidad y posición de este pico refuerzan la cuantificación de la montmorillonita como una fase principal en esta muestra, después del cuarzo.

Siguiendo en intensidad, el pico principal más prominente se localiza en $2\theta \approx 26-27^\circ$. Este pico, también de forma aguda, corresponde al cuarzo (35,07%). Aunque este pico es intenso, su intensidad relativa es notablemente menor que la del pico a 6° .

Además de estos dos picos dominantes, se aprecia otros de intensidad destacada en $2\theta \approx 21.0^\circ$ y $29,5^\circ$, que podrían corresponder a varias de las fases mineralógicas identificadas en la Tabla 8. Probablemente, microclina y caolinita. Más allá de los mencionados, el espectro presenta una multitud de picos adicionales de menor intensidad, distribuidos a lo largo del rango 2θ , que confirman la presencia de las restantes fases minoritarias (moscovita férrica, clinocloro, calcita, illita) y traza (calcita magnesiana, vermiculita, microclina (segunda entrada), rutilo y dolomita) detalladas en la Tabla 8.

M302 post-inyección 65°C

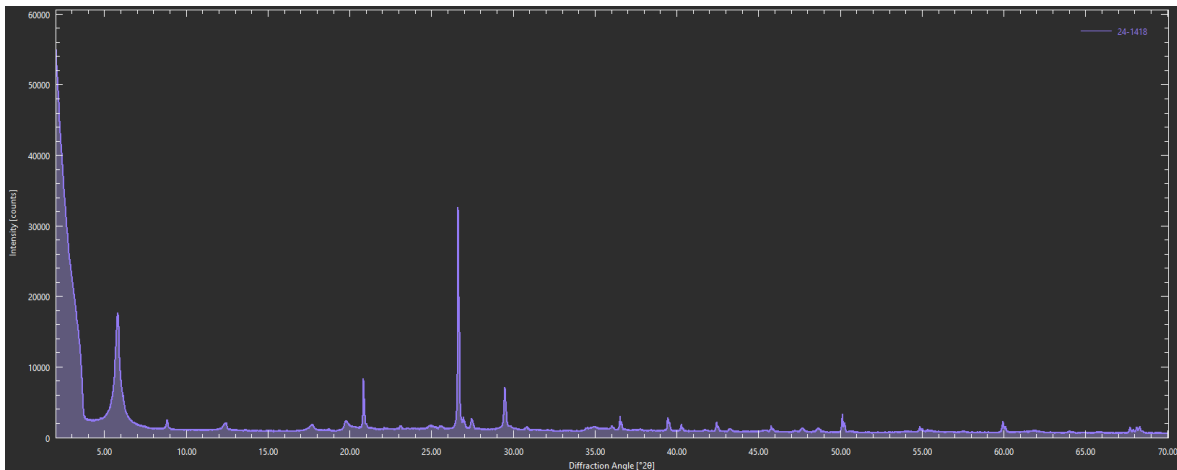
Tabla 7.

Resultados del análisis DRX de la muestra M302 post-inyección a 65°C.

Mineral	Fórmula química	Cuantitativo
Cuarzo	SiO ₂	37,01%
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	17,83%
Calcita	Ca(CO ₃)	14,64%
Moscovita	K(Al _{1.88} Fe _{0.12})(AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	9,84%
Montmorillonita	Ca _{0.5} (Al ₂ Si ₄ O ₁₁ (OH))	8,10%
Microclina	(K _{0.96} Na _{0.04})(AlSi ₃ O ₈)	5,37%
Clinocloro	(Mg _{0.966} Fe _{0.034})(Mg _{0.962} Fe _{0.038}) ₂ (Si _{2.96} Al _{1.04})O ₁₀ (OH) ₂ (Mg _{0.996} Fe _{0.004}) ₂ (Al _{0.841} Fe _{0.102} Cr _{0.004} Ti _{0.004})(OH) ₆	4,80%
Rutilo	TiO ₂	1,28%
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	<1%
Zircón	Zr(SiO ₄)	<1%

Figura 31.

Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 302 a 65°C.



Analizando el espectro DRX de la muestra M302 post-inyección a 65°C (Figura 31), se observa un cambio significativo en las intensidades relativas de los picos clave en comparación con el espectro pre-inyección (Figura 30), reflejando las transformaciones mineralógicas detalladas en la Tabla 9.

En este espectro, el pico de difracción más intenso ya no es el pico de bajos ángulos ($\approx 6^\circ$), sino el pico localizado en $2\theta \approx 26-27^\circ$, característico del cuarzo (37.01%), el cual aumentó ligeramente en proporción cuantitativa (de 35.07% a 37.01%), pero este pequeño aumento cuantitativo no explica por sí solo el cambio tan drástico en la intensidad relativa del pico. Más importante es considerar los cambios en las otras fases.

En contraste directo con el incremento relativo del pico de cuarzo, el pico de difracción a bajos ángulos, en $2\theta \approx 6^\circ$, y diagnóstico de la montmorillonita, ha experimentado una clara reducción, aunque sigue siendo visible y apreciable.

Paralelamente a esta reducción de montmorillonita, se observa un incremento en la intensidad relativa del pico en $2\theta \approx 29.5^\circ$. Este pico se atribuye a la calcita y se correlaciona directamente con el aumento sustancial en la proporción cuantitativa de calcita, que se triplicó, pasando de un 5.11% a un 14.64%. Otro mineral que aprovechó la disolución de la montmorillonita fue la caolinita que incrementó de un 8,79% a 17,83%.

El incremento de la calcita es de lo más notable, pasando 8,79% a 14,64%. Este cambio es apreciable en el espectro DRX, siendo su pico aproximadamente en 29° , se visualizan cambios en la intensidad en esta región, pasando de 600 a 800.

La moscovita tuvo un aumento cuantitativo de 5.62% a 9.84%, aprovechando principalmente los iones de aluminio dejados por la montmorillonita disuelta. El aumento en la proporción de moscovita debería, en teoría, resultar en un ligero aumento en la intensidad de sus picos, aunque estos cambios podrían ser más sutiles de observar visualmente debido a la complejidad del espectro y a la superposición de picos en la región del cuarzo.

M302 post-inyección 130°C

Tabla 8.

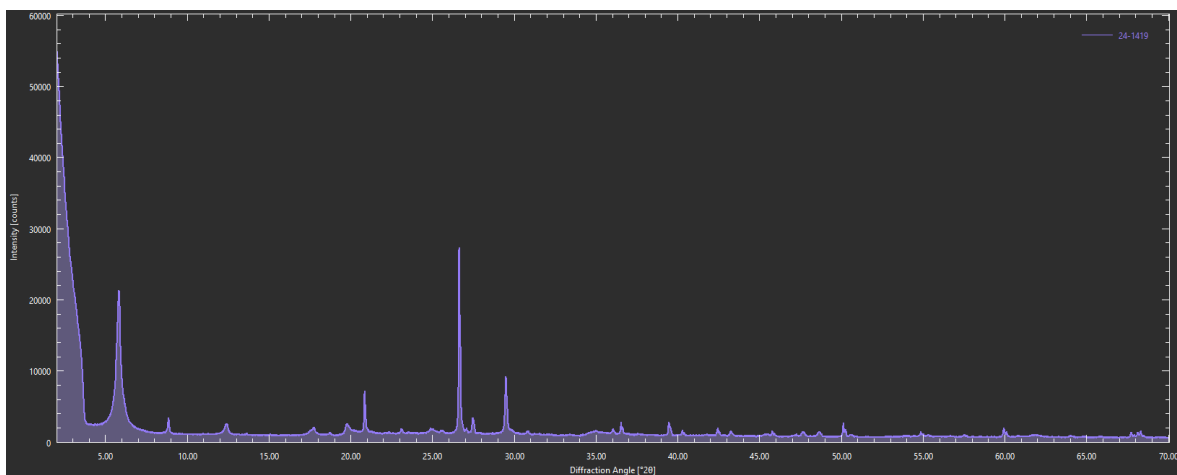
Resultados del análisis DRX de la muestra M302 post-inyección a 130°C.

Míneral	Fórmula química	Cuantitativo
Cuarzo	SiO ₂	27,13%
Montmorillonita	Ca _{0.5} (Al ₂ Si ₄ O ₁₁ (OH))	17,13%
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	16,30%
Calcita magnésiana	(Mg _{0.03} Ca _{0.97})(CO ₃)	14,78%
Moscovita férrica	K _{0.93} Na _{0.07} Al _{1.83} Fe _{0.17} Mg _{0.03} (Al _{0.82} Si _{3.18} O ₁₀)(OH) _{1.79} O _{0.21}	5,91%

Clinocloro	$(\text{Mg}_{0.966}\text{Fe}_{0.034})(\text{Mg}_{0.962}\text{Fe}_{0.038})_2$ $(\text{Si}_{2.96}\text{Al}_{1.04})\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{Mg}_{0.996}\text{Fe}_{0.004})_2$ $(\text{Al}_{0.841}\text{Fe}_{0.102}\text{Cr}_{0.004}\text{Ti}_{0.004})(\text{OH})_6$	5,70%
Microclina	$(\text{K}_{0.96}\text{Na}_{0.04})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	4,52%
Nefelina	$\text{KNa}_3(\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16})$	3,68%
Microclina	$(\text{K}_{0.92}\text{Na}_{0.08})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	2,61
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$	2,24

Figura 32.

Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 302 a 130°C.



A 130°, los resultados muestran una disminución en el contenido de cuarzo (27,13%), una recristalización de montmorillonita (17,13%), mientras que la caolinita (16,30%) y la calcita (14,78%) permanecen relativamente estables, en comparación con la muestra tratada a 65°C. La disminución en el contenido de cuarzo a esta temperatura sugiere reacciones más intensas que llevaron a la descomposición o transformación de la sílice. El aumento en la montmorillonita indica que parte de la moscovita podría haberse disuelto bajo condiciones térmicas, perdiendo agua y otros cationes siendo reemplazados por hierro. El notable incremento en calcita magnesiana en ambas temperaturas señala la precipitación de carbonatos en estas condiciones, posiblemente facilitada por la lixiviación de iones magnesio y calcio en la disolución de la illita, que sólo está presente en la muestra original. La presencia de microclina y nefelina también sugiere que los

feldespatos presentes podrían estar recristalizando o transformándose en nuevas fases debido al calor. Se podría esperar que la goethita y otros oxihidróxidos de hierro presenten una mayor estabilidad en estas condiciones, contribuyendo a la formación de estructuras minerales resistentes.

M303 original

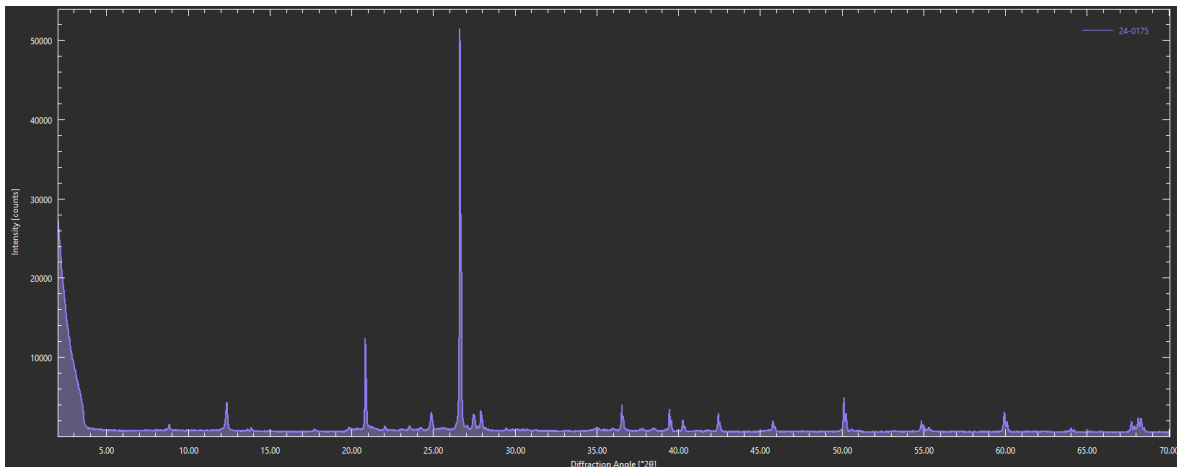
Tabla 9.

Resultados del análisis DRX de la muestra M303 sin alterar.

Mineral	Fórmula química	Cuantitativo
Cuarzo	SiO ₂	64,78%
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	12,58%
Albita	(Na _{0.98} Ca _{0.02})(Al _{1.02} Si _{2.98} O ₈)	10,88%
Microclina	(K _{0.95} Na _{0.05})(AlSi ₃ O ₈)	6,67%
Moscovita férrica	K _{0.93} Na _{0.07} Al _{1.66} Fe _{0.18} Mg _{0.16} (Al _{0.82} Si _{3.18} O ₁₀)(OH) ₂	4,13%
Calcita	Ca(CO ₃)	<1%
Rutilo	TiO ₂	<1%

Figura 33.

Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 303 sin alterar.



Descripción concisa del espectro DRX de la muestra M303 pre-inyección (Figura 33) revela una composición mineralógica dominada por cuarzo (Tabla 11). El cuarzo, con un 64,78%, se manifiesta en el espectro a través de un pico principal de alta intensidad y forma aguda, localizado aproximadamente en $2\theta \approx 26.6^\circ$. Este pico dominante define la característica principal del patrón de difracción.

Además del pico de cuarzo, se observan especies minerales secundarias de menor intensidad, distribuidas a lo largo del espectro. Fases minoritarias como caolinita (12,58%), albita (10,88%) y microclina (6,67%) probablemente contribuyen a estos picos secundarios, aunque la superposición dificulta la identificación visual individual de cada fase.

En conjunto, el espectro DRX de M303 presenta un patrón relativamente simple, dominado por un pico principal de cuarzo y picos secundarios de menor intensidad, consistente con una composición donde el cuarzo es la fase mayoritaria, acompañada de otras fases minoritarias de plagioclasa, mica y arcilla.

Inyección de salmuera

Tabla 10.

Análisis fisicoquímico del agua de inyección.

Parámetro	Método	Resultados	Unidades
pH	Potenciométrico, SM 4500-H+ B	6,041	Und. pH
Cloruros	Argentométrico, SM 4500-Cl- B	11078,25	mg Cl ⁻ /L
Sulfatos	Turbidimétrico, SM 4500-SO4 ²⁻ - E	1,21	mg SO ₄ ²⁻ /L
Bicarbonatos	Titrimétrico SM 2320 B	0	mg CO ₃ ²⁻ /L
Carbonatos	Titrimétrico SM 2320 B	93,33	mg HCO ₃ ⁻ /L
Sodio	Absorción Atómica, SM 3111 B	44,05	mg Na/L

Calcio	Absorción Atómica, SM 3111 B	2198	mg Ca/L
Potasio	Absorción Atómica, SM 3111 B	31,73	mg K/L
Magnesio	Absorción Atómica, SM 3111 B	316	mg Mg/L
Hierro	Absorción Atómica, SM 3111 B	<0,200	mg Fe/L
Conductividad eléctrica	Conductivimétrico, SM 2510 B	35	mS/cm
Sólidos disueltos totales	Gravimétrico, SM 2540 C	65564	mg/L

El agua de pozo muestra una alta concentración de cloruros (11078,25 mg/L) y calcio (2198 mg/L). La conductividad eléctrica es muy alta (35 mS/cm), lo que indica una gran cantidad de iones presentes en el agua. Los sólidos disueltos totales (TDS) son 65564 mg/L, lo que refuerza la alta salinidad del agua. La inyección de agua de pozo, rica en iones, facilitará un mayor intercambio iónico debido a la presencia de cationes (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) y aniones (Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻). Estos iones pueden competir e intercambiarse con los cationes y aniones presentes en los minerales, promoviendo la disolución y precipitación de nuevos compuestos. La interacción de CO₂ disuelto con iones de calcio y magnesio puede llevar a la formación de minerales de carbonato estables, que secuestran el CO₂ de manera efectiva. La alta salinidad del agua de pozo puede ayudar a disolver minerales reactivos y promover la precipitación de nuevos compuestos, aumentando la capacidad de almacenamiento de CO₂.

M303 post-inyección 65°C

Tabla 11.

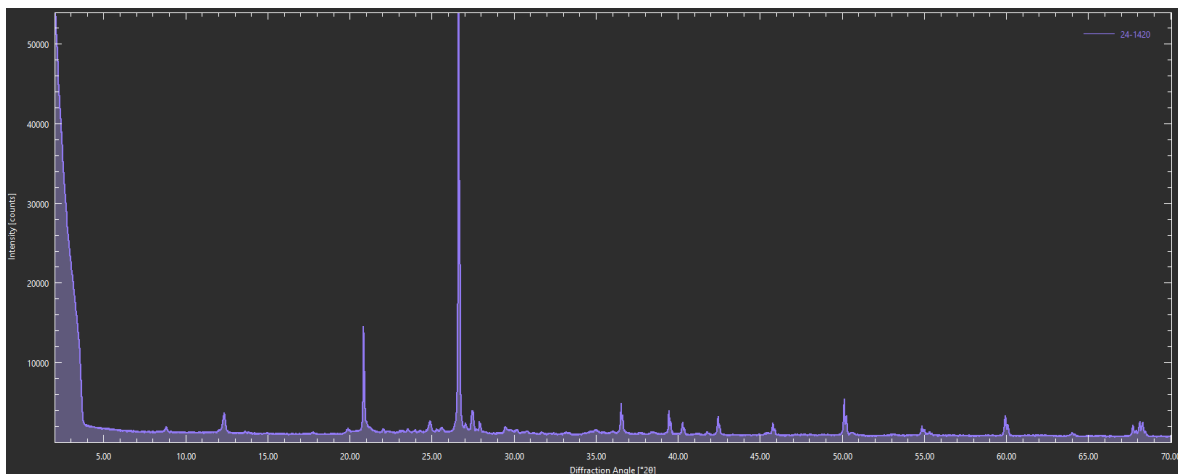
Resultados del análisis DRX de la muestra M303 post-inyección a 65°C.

Mineral	Fórmula química	Cuantitativo
Cuarzo	SiO ₂	53,18%
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	10,00%

Microclina	(K _{0.95} Na _{0.05})(AlSi ₃ O ₈)	7,14%
Goethita	FeO(OH)	5,72%
Microclina	K(AlSi ₃ O ₈)	5,57%
Albita	(Na _{0.98} Ca _{0.02})(Al _{1.02} Si _{2.98} O ₈)	5,46
Ortoclasa	K ₄ Al ₄ Si ₁₂ O ₃₂	4,37
Moscovita	(K _{0.94} Na _{0.04})(Al _{1.88} Fe _{0.12} Mg _{0.07} Ti _{0.03}) ((Si ₃ Al)O _{10.11})(OH) _{1.85} F _{0.04}	3,41
Calcita	Ca(CO ₃)	2,3
Nacrita	Al ₂ (Si ₂ O ₇)(H ₂ O) ₂	1,65
Lizardita	Mg ₃ (Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	<1%
Halita	NaCl	<1%
Anatasa	TiO ₂	<1%

Figura 34.

Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 303 a 65°C.



El espectro DRX de la muestra M303 tras la inyección de CO₂ con salmuera a 65°C (Figura 34) y el análisis cuantitativo (Tabla 13) revelan transformaciones mineralógicas inducidas por la interacción con una solución salina compleja (Tabla 12). El patrón de difracción persiste dominado por el pico de cuarzo en $2\theta \approx 26.6^\circ$, aunque su intensidad relativa, en línea con la reducción cuantitativa al 53,18%, podría mostrar una ligera disminución respecto al espectro pre-inyección.

Las disminuciones de albita y moscovita, junto a la del cuarzo, sugieren procesos de disolución que liberan componentes a la solución. En contraste, la precipitación de goethita (5,72%), indica reacciones de neoformación. Aunque la concentración de hierro en la salmuera es baja (<0,200 mg Fe/L), el ambiente ligeramente ácido (pH 6,041) y la presencia de CO₂ podrían favorecer la oxidación y movilización del hierro desde minerales preexistentes en la arenisca, precipitando como goethita, tal como se sugirió en descripciones previas.

El incremento de calcita (2,3%), aunque modesto, podría reflejar una precipitación incipiente, favorecida por la alta concentración de calcio en la salmuera (2198 mg Ca/L, Tabla 12) y la presencia de CO₂, tal como se anticipaba. No obstante, el pico de calcita en $2\theta \approx 29.4^\circ$ no muestra un incremento drástico en el espectro (Figura 34), sugiriendo que, si bien la precipitación de calcita ocurre, su impacto en el patrón de difracción general es limitado, o bien, podría estar contribuyendo a un ensanchamiento del pico de cuarzo superpuesto en esa región.

Finalmente, la presencia de magnesio en la salmuera (316 mg Mg/L, Tabla 12) podría potencialmente favorecer la formación de minerales arcillosos magnésicos como la lizardita, presente en trazas (<1%) en el análisis cuantitativo, aunque su detección inequívoca y cuantificación precisa a partir del espectro DRX es limitada dada su baja proporción.

M303 post-inyección 130°C

Tabla 12.

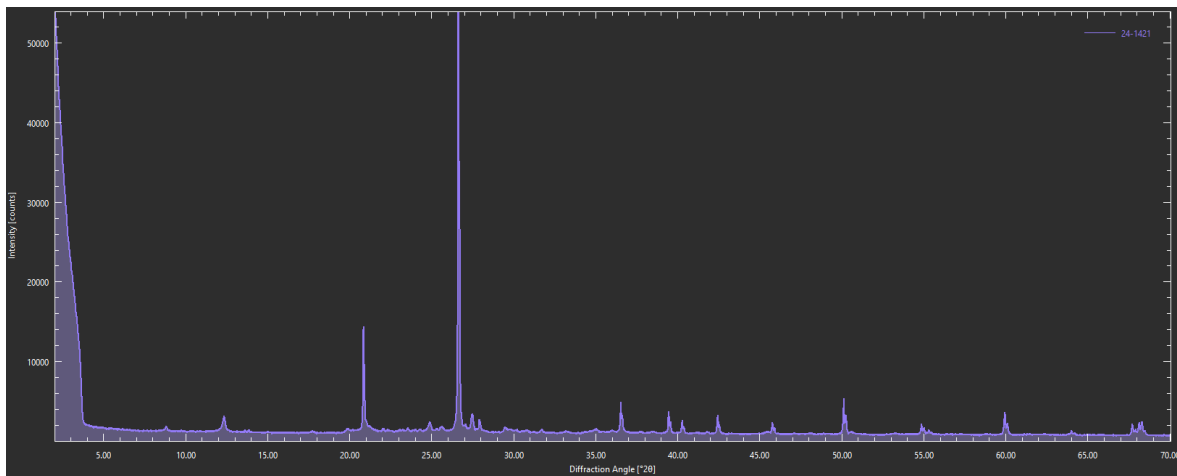
Resultados del análisis DRX de la muestra M303 post-inyección a 130°C.

Mineral	Fórmula química	Cuantitativo
Cuarzo	SiO ₂	53,42%

Caolinita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	10,65%
Microclina	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	9,34%
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$	6,80%
Albita	$(\text{Na}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	5,43%
Moscovita férrica	$\text{K}_{0.92}\text{Na}_{0.08}\text{Al}_{1.78}\text{Fe}_{0.22}(\text{Al}_{0.82}\text{Si}_{3.18}\text{O}_{10})(\text{OH})_{1.85}\text{O}_{0.08}\text{F}_{0.07}$	4,70%
Microclina	$(\text{K}_{0.95}\text{Na}_{0.05})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	3,90%
Nacrita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{H}_2\text{O})_2$	1,56%
Moscovita	$\text{KAl}_2((\text{AlSi}_3)\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	1,50%
Calcita	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	1,42%
Halita	NaCl	<1%
Anatasa	TiO_2	<1%

Figura 35.

Espectro de Difracción de Rayos X de la Muestra 303 a 130°C.



El espectro DRX de la muestra M303 tras la inyección de CO₂ con salmuera a 130°C (Figura 35), junto a los datos cuantitativos (Tabla 14), indica una evolución mineralógica con ciertas continuidades y nuevas tendencias respecto a la muestra a 65°C. A priori, no hay una gran diferencia en los espectros de la muestra a 65°C y esta a 130°C. El cuarzo (53,42%) mantiene una proporción cuantitativa y una intensidad del pico principal en $2\theta \approx 26.6^\circ$, sugiriendo que la

disolución de cuarzo, inducida por la inyección de CO₂ con salmuera, podría haber alcanzado un cierto equilibrio en estas condiciones, con una respuesta similar a ambas temperaturas.

La caolinita (10,65%) también presenta una proporción cuantitativa muy similar a la muestra a 65°C, sugiriendo que su formación, en detrimento de otras fases aluminosilicatadas, también se mantiene relativamente constante bajo estas condiciones. En contraste, la microclina experimenta un incremento cuantitativo notable, aumentando su proporción combinada (considerando ambas entradas en Tabla 14) hasta un 13,24% (9,34% + 3,90%). Este aumento de microclina a 130°C, en detrimento quizás de albita que se mantiene baja, podría sugerir reacciones de intercambio iónico promovidas por la movilidad de iones Na⁺, Al³⁺ y la adición de K⁺ proveniente de la salmuera rica en potasio, que se incorpora a la estructura de la microclina a expensas de sodio en la albita, o bien, puede ser que este sistema indique condiciones más favorables para la estabilidad/precipitación de microclina.

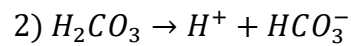
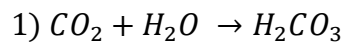
La goethita (6,80%) continúa incrementándose cuantitativamente a 130°C, superando el 5,72% de la muestra a 65°C. Esto indica que la precipitación de goethita, favorecida por la presencia de CO₂ y el ambiente ligeramente ácido, se ve promovida aún más por el aumento de temperatura a 130°C, posiblemente debido a una mayor cinética de las reacciones de oxidación y precipitación del hierro movilizado.

La halita (NaCl) puede formarse como resultado de la lixiviación y precipitación de iones Na⁺ y Cl⁻ en un ambiente acuoso. La inyección de agua de pozos de producción podría introducir nuevos iones, como Mg²⁺, Fe²⁺ y Ca²⁺, que interactúan con los minerales presentes, formando nuevos compuestos y precipitados. Los intercambios catiónicos entre albita y microclina resaltan la dinámica de movilidad iónica bajo estas condiciones térmicas y químicas. La descomposición

de la caolinita y la formación de nacrita y otros silicatos de aluminio subrayan la transformación de minerales arcillosos en fases más estables.

6.3. Interpretación de los datos

La inyección de CO₂ en diferentes medios (agua destilada, salmuera y en seco) tiene un impacto significativo en la interacción con los minerales presentes en las muestras, debido a la formación de ácido carbónico (H₂CO₃) y su posterior disociación en iones H⁺ y HCO₃⁻



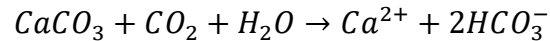
Esta disociación crea soluciones altamente reactivas capaces de liberar cationes de los minerales presentes y promover el intercambio iónico. Esta reactividad es clave para permitir el acomodamiento del CO₂ en la estructura de otros minerales, asegurando su almacenamiento. Además, estas reacciones inducen procesos de disolución y precipitación, generando espacios intersticiales y formando nuevos minerales estables.

M301

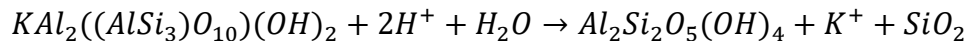
La presencia de agua destilada aumenta la movilidad de los iones en la solución y favorece reacciones de disolución de minerales. Los iones H⁺ y HCO₃⁻ formados a partir del ácido carbónico pueden reaccionar con los minerales silicatados y carbonatados presentes, promoviendo procesos de disolución y precipitación de nuevos minerales. Incluso el cuarzo, que es un mineral bastante estable, disminuye un poco a 65°C, pero aumenta a 130°C, lo que puede deberse a redistribución de sílice.

Disolución de calcita y formación de ácido carbónico:

Dado que la calcita (<1%) desaparece tras la inyección, es probable que haya reaccionado con el CO₂ y el agua para formar bicarbonato en solución:

**Disolución de moscovita y formación de caolinita:**

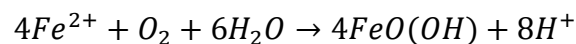
La reducción en la cantidad de moscovita sugiere que este mineral se alteró, probablemente:



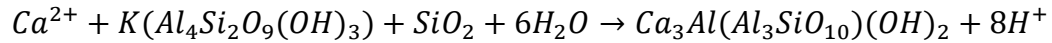
Esto explica el aumento en la cantidad de caolinita a 65°C y su posterior disminución a 130°C, posiblemente por recristalización secundaria, siguiendo este mismo proceso en sentido contrario.

Formación de goethita (FeO(OH)):

La aparición de goethita en la muestra post-inyección a 65°C sugiere que hubo oxidación de hierro. Aunque no hay un mineral de hierro identificado en la muestra original, es posible que trazas de minerales con Fe (como impurezas en la moscovita o la caolinita) hayan liberado Fe²⁺, que luego se oxidó en presencia de agua y oxígeno:

**Formación de clintonita (Ca₃Al(Al₃SiO₁₀)(OH)₂):**

La clintonita, un mineral del grupo de las micas ricas en calcio, puede haberse formado por la interacción entre Ca²⁺ liberado de la calcita y productos de alteración de la moscovita:



La clintonita aparece en muy baja cantidad, lo que sugiere que esta reacción no fue dominante

Formación de Marialita (Na_{3.78}Ca_{0.22}(Al_{3.22}Si_{8.78}O₂₄)Cl) a 130°C:

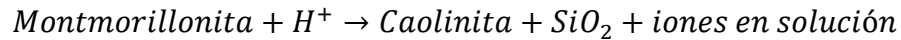
La aparición de marialita a 130°C sugiere la movilización de sodio y cloro en la solución. Podría haberse formado a partir de iones disueltos en el fluido debido a la alteración de feldespatos sódicos, aunque no fueron detectados en la muestra inicial, podrían haber estado en cantidades traza.

M302

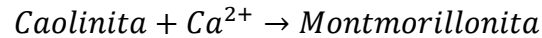
Para el caso de inyección de CO₂ seco, la ausencia de agua cambia el mecanismo de interacción. Sin embargo, si hay minerales con moléculas de agua en su estructura (como filosilicatos: caolinita, montmorillonita, moscovita, clinocloro), pueden liberar agua y permitir la formación de ácido carbónico en fase transitoria. En ausencia de agua libre, las reacciones estarán limitadas a la interacción entre el CO₂ y los minerales hidratados. Estos minerales pueden liberar agua estructural, que puede reaccionar con el CO₂ para formar ácido carbónico, facilitando reacciones de disolución y alteración mineral.

Disolución de montmorillonita y formación de caolinita:

La montmorillonita es un mineral inestable en comparación con la caolinita. En condiciones ácidas, la montmorillonita se puede disolver y convertir en caolinita. A 65° ocurre una caída de montmorillonita (25.88% → 8.10%) y el aumento de caolinita (8.79% → 17.83%) sugieren un proceso de conversión:



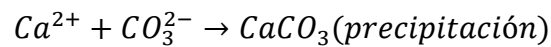
A 130° la montmorillonita aumenta (8.10% → 17.13%) y la caolinita se mantiene estable (17.83% → 16.30%). Esto sugiere una reacción inversa parcial de neoformación de montmorillonita por disponibilidad de cationes en solución:



La temperatura parece ser un factor importante que controla la conversión de montmorillonita en caolinita. A 65°C, la temperatura es lo suficientemente baja como para que la reacción de caolinización sea favorecida. A 130°C, la temperatura es lo suficientemente alta como para que la reacción inversa sea favorecida parcialmente.

Aumento de calcita (precipitación de carbonatos):

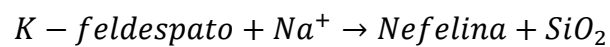
A 65° la calcita aumenta significativamente (5.11% → 14.64%), ganando iones de calcio, probablemente de la disolución de montmorillonita e illita y la conversión de ácido carbónico por efecto del CO₂ con el agua, lo que sugiere la siguiente reacción:



A 130° este valor se mantiene (14.78%) y obtiene átomos de magnesio provenientes de los iones libres en solución.

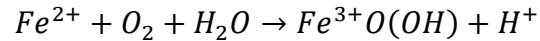
Disolución de feldespatos y formación de nefelina:

La microclina sigue disminuyendo (6.92% → 5.37% → 4.52%) y aparece nefelina (3.68%) a 130°, lo que sugiere:



Formación de goethita (FeO(OH)):

La aparición de goethita (2.24%) a 130° indica oxidación del hierro contenido en moscovita y clinocloro.

**Transformación en la moscovita y clinocloro:**

Moscovita aumenta a 65° (5.62% → 9.84%), lo cual sugiere un enriquecimiento en potasio debido a la disolución parcial de feldespatos alcalinos. Esta cantidad disminuye a 130° (5.91%).

Clinocloro se mantiene estable (5.39% → 4.80% → 5.70%), lo que sugiere poca alteración de silicatos de Mg-Fe.

Formación de rutilo y zircón:

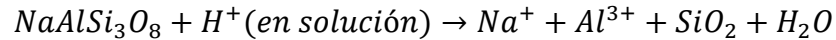
La aparición de rutilo (TiO₂) y zircón (ZrSiO₄), aunque en cantidades traza, sugiere una cristalización de fases resistentes en un ambiente de temperatura moderada.

M303

Para el caso de inyección de CO₂ enriquecida con salmuera, la alta salinidad del agua influye significativamente en las reacciones químicas. La salmuera, rica en iones de cloruros, sodio, calcio y magnesio, facilita un intercambio iónico más activo, promoviendo reacciones de disolución y precipitación de nuevos minerales.

Disolución de feldespatos y formación de minerales secundarios:

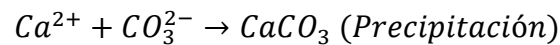
La albita y disminuye porque el agua ácida con alto Cl⁻ promueve la hidrólisis de plagioclasa. El potasio disuelto en la salmuera pudo haber promovido la precipitación de microclina:



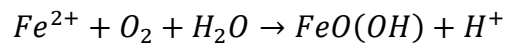
Esta reacción libera iones de Na⁺ y Al³⁺, que pueden formar halita (NaCl) y favorecer la formación de arcillas como nacrita (Al₂(Si₂O₇)(H₂O)₂).

Precipitación de carbonatos y minerales de Fe y Mg:

La calcita (CaCO₃) aumenta ligeramente tras la inyección debido a la alta concentración de Ca²⁺ en el agua de pozo y la presencia de CO₂, que favorece:



La oxidación del hierro en solución genera la fase secundaria de la goethita (FeO(OH)).



La aparición de lizardita (Mg₃Si₂O₅(OH)₄) es explicable por la reacción del Mg²⁺ en solución con sílice liberada por la disolución de feldespatos.

Movilidad de elementos y formación de halita (NaCl):

El Na⁺ liberado de la albita y feldespatos alcalinos, sumado al ya presente en el agua de pozo (~44.05 mg/L), favorece la precipitación de halita (NaCl).

La aparición de anatasa (TiO₂) sugiere recristalización o neoformación de fases de Ti en condiciones ácidas.

7. Discusión y recomendaciones

En el contexto del almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas, la reactividad geoquímica juega un papel crucial en la modificación de las propiedades de la roca almacén. En nuestras pruebas de laboratorio, se observó que la inyección de CO₂ en diferentes condiciones experimentales resultó en cambios significativos en la mineralogía, lo que influye directamente en la porosidad y permeabilidad.

La porosidad es un parámetro clave en los sistemas subterráneos porque está directamente relacionada con el almacenamiento de fluidos. Según Goodman et al. (2020), el CO₂ tiene la capacidad de alterar la porosidad desde la microescala hasta la nanoescala. Este conjunto de técnicas complementarias demuestra que los poros pueden abrirse a escala microscópica y cerrarse a escala nanoscópica, dependiendo de su tipo y clasificación de tamaño y el método de inyección empleado. La variabilidad en la alteración de la escala de los poros puede afectar las propiedades de transporte y flujo de los sistemas rocosos y puede variar según sus propiedades petrológicas.

Es bien sabido que las reacciones de alteración geoquímica en medios porosos son procesos complejos que son difíciles de medir experimentalmente y simular con precisión. En general, se cree que las reacciones de precipitación reducen el volumen total del espacio poroso, mientras que las reacciones de disolución aumentan el volumen total del espacio poroso. (Goodman et al., 2020)

En la condición de CO₂ inyectado en presencia de agua destilada (M301) se observó una notable disolución de minerales preexistentes debido a que el agua facilitó la formación de ácido carbónico, cuyo papel en la disociación en iones hidrógeno (H⁺) y bicarbonato (HCO₃⁻) creó un

ambiente altamente reactivo, acompañado de la formación de nuevos minerales estables. La porosidad y la permeabilidad de las muestras aumentaron significativamente, mejorando el potencial de almacenamiento de CO₂. Utilizar agua destilada en inyecciones iniciales puede facilitar la disolución de los minerales menos reactivos como el cuarzo, y promover la formación de nuevos espacios intersticiales. Se sugiere monitorear continuamente la química del agua para asegurar que los parámetros se mantengan dentro de los límites óptimos.

Esta solución reactiva promovió la disolución de minerales presentes en la muestra y la precipitación de nuevos minerales estables, como caolinita o goethita creando espacios intersticiales adicionales y favoreciendo el intercambio iónico. Estos resultados concuerdan con los hallazgos de Xu et al. (2017), quienes demostraron que la disolución de CO₂ en agua provoca la acidificación y la posterior reactividad química que altera la estructura de la roca. Sin embargo, la caolinización es un proceso que puede afectar la porosidad y la permeabilidad de la roca. La caolinita es un mineral de grano fino que puede obstruir los poros y reducir la permeabilidad. Esto puede dificultar el flujo de agua a través del medio.

Para la inyección del CO₂ seco (M302), es decir, en ausencia de agua libre, los minerales hidratados liberaron agua estructural por el aumento de la temperatura, permitiendo la formación de soluciones de disolución/precipitación, donde principalmente se diluye montmorillonita y precipita calcita. Los silicatos permanecen poco alterados y esto limita la capacidad de abrir nuevas redes de poros. Se sugiere que esta sea la última etapa en caso de realizar la inyección en varias fases.

Considerar la inyección de CO₂ seco en formaciones con altos contenidos de minerales hidratados para aprovechar la liberación de agua estructural, siempre con clara certeza de la reactividad de toda la geología circundante.

En el caso de la inyección de CO₂ con salmuera (M303), se observó una mayor reactividad debido a la alta concentración de iones presentes en la solución. La salmuera, rica en cloruros, sodio, calcio y magnesio, facilitó un intercambio iónico más activo y promovió la formación de ácido carbónico. Estos hallazgos son consistentes con los estudios de Pearce et al. (2022), quienes documentaron la precipitación de calcita y la alteración mineralógica significativa en formaciones geológicas durante la inyección de CO₂.

En el análisis de las secciones delgadas, se observó una significativa movilización de granos, resultando en la creación de espacios porosos amplios. Estos hallazgos están alineados con la literatura existente, donde (Gholami & Raza, 2022) sugieren que la velocidad del flujo puede alterar la respuesta de la migración de finos y cambiar la morfología de las arcillas para adaptarse al flujo; recomiendan una inyección de dos fases para optimizar el espacio de almacenamiento.

La interacción entre el CO₂, la salmuera y las rocas puede mejorar significativamente las propiedades físicas de las rocas ricas en carbonatos. Se ha observado que el aumento en las amplitudes de porosidad y permeabilidad muestra una correlación positiva con el contenido de carbonato y el tiempo de reacción (S. Li et al., 2022).

Los resultados experimentales de (Orlic et al., 2010) sugieren que una disminución significativa en la presión parcial de CO₂ puede permitir el almacenamiento de mayores cantidades de CO₂ a largo plazo, hasta la máxima presión permitida. Sin embargo, es importante considerar la compresibilidad de los poros y la compactación debido a la disolución y precipitación de minerales, lo que podría influir en los cambios de presión de los poros en la roca almacén.

Es fundamental llevar a cabo una caracterización geoquímica y mineralógica exhaustiva de la formación antes de la inyección para identificar minerales y fluidos reactivos y prever

posibles cambios estructurales. Investigar la efectividad de la roca sello para garantizar la contención del CO₂ y evaluar su rendimiento a largo plazo bajo condiciones de almacenamiento.

8. Conclusiones

- Las areniscas de las formaciones Esmeraldas y Mugrosa presentan condiciones petrofísicas adecuadas para almacenar CO₂ de forma segura.
- La porosidad efectiva de la roca almacén puede ser aumentada cuando el CO₂ inyectado se combina con H₂O para formar ácido carbónico (H₂CO₃), aumentando la disolución de sílice e interconectando redes de poros.
- La seguridad del almacenamiento es mayor cuando se agrega una sustancia ionizada como la salmuera, aumentando la tasa de reactividad y precipitación de minerales secundarios, formados a partir de aniones y cationes disponibles en la solución.
- La temperatura no es un parámetro fundamental para aumentar o mejorar el almacenamiento de CO₂. Puede ser usado como catalizador para acelerar la reactividad geoquímica, principalmente en minerales hidratados y carbonatados, pero no mejora sustancialmente la porosidad efectiva ni la permeabilidad.
- El agua es un factor clave para transportar el CO₂ inyectado. La movilidad hidráulica del agua permite que el CO₂ se disuelva y se distribuya más eficientemente a través de la matriz rocosa, optimizando el almacenamiento.

Referencias bibliográficas

Agartan, E., Gaddipati, M., Yip, Y., Savage, B., Ozgen, C. (2018). CO₂ storage in depleted oil and gas fields in the Gulf of Mexico. *Int. J. Greenhouse Gas Control* 72, 38–48.

Ali, M., Aftab, A., Arain, Z. U. A., Al-Yaseri, A., Roshan, H., Saeedi, A., ... & Sarmadivaleh, M. (2020). Influence of organic acid concentration on wettability alteration of cap-rock: implications for CO₂ trapping/storage. *ACS applied materials & interfaces*, 12(35), 39850-39858.

Ali, M., Al-Anssari, S., Arif, M., Barifcani, A., Sarmadivaleh, M., Stalker, L., ... & Iglauer, S. (2019). Organic acid concentration thresholds for ageing of carbonate minerals: Implications for CO₂ trapping/storage. *Journal of colloid and interface science*, 534, 88-94.

Ali, M., Arif, M., Sahito, M. F., Al-Anssari, S., Keshavarz, A., Barifcani, A., ... & Iglauer, S. (2019). CO₂-wettability of sandstones exposed to traces of organic acids: Implications for CO₂ geo-storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 83, 61-68.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.02.002>

Ali, M., Jha, N. K., Pal, N., Keshavarz, A., Hoteit, H., & Sarmadivaleh, M. (2022). Recent advances in carbon dioxide geological storage, experimental procedures, influencing parameters, and future outlook. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 225). Elsevier B.V.

Ali, M., Sahito, M. F., Jha, N. K., Memon, S., Keshavarz, A., Iglauer, S. & Sarmadivaleh, M. (2020). Effect of nanofluid on CO₂-wettability reversal of sandstone formation; implications for CO₂ geo-storage. *Journal of colloid and interface science*, 559, 304-312.

Alvárez, E. & González, E. (2021). Contribución al modelo de evolución de ambientes sedimentarios y distribución espacio-temporal de las facies sedimentarias en la zona norte del Valle Medio del Magdalena a partir de la interpretación de registros de pozo y muestras de zanja.

Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. A., & Martínez, J. F. (2007). Colombian Sedimentary Basins, Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal.

Bashir, A., Ali, M., Patil, S., Aljawad, M. S., Mahmoud, M., Al-Shehri, D., Hoteit, H., & Kamal, M. S. (2024). Comprehensive review of CO₂ geological storage: Exploring principles, mechanisms, and prospects. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 249).

Berrezueta, E., González-Menéndez, L., Breitner, D., & Luquot, L. (2013). Pore system changes during experimental CO₂ injection into detritic rocks: Studies of potential storage rocks from some sedimentary basins of Spain. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 17, 411–422.

Berrezueta, E., González-Menéndez, L., Ordóñez-Casado, B., & Olaya, P. (2015). Pore network quantification of sandstones under experimental CO₂ injection using image analysis. *Computers and Geosciences*, 77, 97–110.

Bourg, I. C., & Ajo-Franklin, J. B. (2017). Clay, Water, and Salt: Controls on the Permeability of Fine-Grained Sedimentary Rocks. *Accounts of Chemical Research*, 50(9), 2067–2074.

Caballero, V., Parra, M., Roberto, A., & Bohorquez, M. (2010). Levantamiento de la cordillera oriental de Colombia durante el Eoceno tardío-Oligoceno temprano: Proveniencia sedimentaria en el sinclinal de nuevo mundo, Cuenca Valle Medio del Magdalena. *Boletín de Geología* (Vol. 32).

Caballero, W.J., Rubiano, J.L., Clavijo, J., y Sandoval, J.R. (2016). Procedencia en el extremo sur del Valle Medio del Magdalena durante el Cenozoico: determinaciones con base en el análisis cuantitativo de paleocorrientes. *Boletín de Geología*, 38(1): 73-86.

Carroll, S. A., Iyer, J., & Walsh, S. D. C. (2017). Influence of Chemical, Mechanical, and Transport Processes on Wellbore Leakage from Geologic CO₂ Storage Reservoirs. *Accounts of Chemical Research*, 50(8), 1829–1837.

Gholami, R., & Raza, A. (2022). CO₂ sequestration in sandstone reservoirs: How does reactive flow alter trapping mechanisms? *Fuel*, 324.

Hannis, S., Lu, J., Chadwick, A., Hovorka, S., Kirk, K., Romanak, K., Pearce, J. (2017). CO₂ storage in depleted or depleting oil and gas fields: what can we learn from existing projects? *Energy Procedia* 114, 5680–5690.

Holloway Sam. (2007). Carbon dioxide capture and geological storage *Phil. Trans. R. Soc. A*.3651095–1107

Hosseininoosheri, P., Hosseini, S.A., Núñez-López, V., Lake, L.W. (2018). Impact of field development strategies on CO₂ trapping mechanisms in a CO₂-EOR field: a case study in the permian basin (SACROC unit). *Int. J. Greenhouse Gas Control* 72, 92–104.

Iglauer, S. (2017). CO₂-Water-Rock Wettability: Variability, Influencing Factors, and Implications for CO₂ Geostorage. *Accounts of Chemical Research*, 50(5), 1134–1142.

Iglauer, S. (2018). Optimum storage depths for structural CO₂ trapping. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 77, 82–87.

Iglauer, S., Sarmadivaleh, M., Al-Yaseri, A., & Lebedev, M. (2014). Permeability evolution in sandstone due to injection of CO₂-saturated brine or supercritical CO₂ at reservoir conditions. *Energy Procedia*, 63, 3051–3059.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate change 2014: synthesis report : longer report*.

Julivert, M. (1961). Las estructuras del valle medio del Magdalena y su significación. *Boletín De Geología*, (6), 33–52.

Krevor, S., Blunt, M. J., Benson, S. M., Pentland, C. H., Reynolds, C., Al-Menhali, A., & Niu, B. (2015). Capillary trapping for geologic carbon dioxide storage - From pore scale physics to field scale implications. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 221–237.

Le Gallo, Y., Couillens, P., & Manai, T. (2002, March). CO₂ sequestration in depleted oil or gas reservoirs. In SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Environment, and Sustainability? (pp. SPE-74104). SPE.

Li, J., Hou, Y., Wang, P., & Yang, B. (2019). A Review of carbon capture and storage project investment and operational decision-making based on bibliometrics. *Energies*, 12(1).

Li, S., Zhang, S., Xing, H., & Zou, Y. (2022). CO₂-brine-rock interactions altering the mineralogical, physical, and mechanical properties of carbonate-rich shale oil reservoirs. *Energy*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124608>.

Madero, H., Rueda, J., Ortiz, A., & Colegial, J. (2010). Análisis estratigráfico para las arenas de la formación mugrosa en área piloto del campo llanito (Vol. 32).

Mariño-Martínez, J. E., & Moreno-Reyes, L. E. (2018). Posibilidades de captura y almacenamiento geológico de CO₂ (CCS) en Colombia - caso Tauramena (Casanare). *Boletín de Geología*, 40(1), 109–122.

Metz, B., Davidson, O., & De Coninck, H (2005). Carbon dioxide capture and storage: special report of the intergovernmental panel on climate change.

Mindat.org. (2025). Lista de especies minerales. Recuperado, de <https://www.mindat.org/minerals.php>

Mojica, J. y Franco, R. (1990). Estructura y Evolución Tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena, Colombia. *Geología Colombiana*, 17, 41–64.

NASA. (2024). Dióxido de carbono: Vital Signs - CO₂. Climate Change: Vital Signs of the Planet. Recuperado de <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/?intent=111>

Orlic, B., Heege, J. ter, & Wassing, B. (2011). Assessing the integrity of fault- and top seals at CO₂ storage sites. *Energy Procedia*, 4, 4798–4805. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.445>.

Otu, S., Rinehart, A. J., Luhmann, A. J., Simmons, J., & Mozley, P. (2023). Effects of CO₂ on creep deformation in sandstones at carbon sequestration reservoir conditions: An experimental study. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 129.

Pearce, J. K., Brink, F., Dawson, G. W., Poitras, J., Southam, G., Paterson, D. J., Wolhuter, A., & Underschultz, J. R. (2022). Core characterisation and predicted CO₂ reactivity of sandstones and mudstones from an Australian oil field. *International Journal of Coal Geology*, 250.

Psarras, P., Holmes, R., Vishal, V., & Wilcox, J. (2017). Methane and CO₂ Adsorption Capacities of Kerogen in the Eagle Ford Shale from Molecular Simulation. *Accounts of Chemical Research*, 50(8), 1818–1828.

Quintero, E. C., Ortiz, A., Meza, G., & Colegial, J. D. (2010). Caracterización de la continuidad lateral y vertical de las areniscas continentales: El caso de la Formación Mugrosa en el Campo Llanito y Casabe (Vol. 32).

Rackley, S. A. (2017). Carbon capture and storage. Butterworth-Heinemann.

República de Colombia Ministerio de Minas y Energía, Instituto Colombiano de Geología y minería Ingeominas (1973). Mapa Geológico de Colombia cuadrángulo H-12 Bucaramanga escala 1:100.000 Memoria explicativa.

Rojas, E. T. (2021). Evaluación de la salinidad del agua subterránea a partir de registros de pozo en un área piloto del Valle Medio del Magdalena, Colombia.

Sarmiento-Pérez, G. A. (2015). Evolución Geológica y Estratigrafía del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena.

SGC. (2020). From Facies Analysis, Stratigraphic Surfaces, and Depositional Sequences to Stratigraphic Traps in the Eocene – Oligocene Record of the Southern Llanos Basin and Northern Magdalena Basin. *Chapter 10*.

Sharma, S., Cook, P., Berly, T., Lees, M., 2009. The CO₂CRC Otway project: overcoming challenges from Planning to Execution of Australia's first CCS project

Simmons, J. D., Wang, S., Luhmann, A. J., Rinehart, A. J., Heath, J. E., & Majumdar, B. S. (2023). Paragenetic controls on CO₂-fluid-rock interaction and weakening in a macroporous-dominated sandstone. *Applied Geochemistry, 156*.

United States Environmental Protection Agency. (2025). *Causes of climate change*. EPA. <https://www.epa.gov/climatechange-science/causes-climate-change>

Ward, D. E., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H., & Gómez, E. (1973).

Weaver, L. K., & Anderson, K. F. (1966). Cranfield Field, Cranfield Unit, Basal Tuscaloosa Reservoir, Adams and Franklin Counties, Mississippi.

Xu, R., Li, R., Ma, J., He, D., & Jiang, P. (2017). Effect of Mineral Dissolution/Precipitation and CO₂ Exsolution on CO₂ transport in Geological Carbon Storage. *Accounts of Chemical Research, 50*(9), 2056–2066.

Zhang, S., & DePaolo, D. J. (2017). Rates of CO₂ Mineralization in Geological Carbon Storage. *Accounts of Chemical Research*, 50(9), 2075–2084.