

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Propuesta metodológica para la elaboración de un modelo estático de
yacimientos petroleros con secuestro de CO₂

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Petróleo

Presentado por:

Carlos Fabian Pazmiño Uruchima

GUAYAQUIL - ECUADOR

2022

DEDICATORIA

El siguiente proyecto lo dedico a mis padres, Carlos Pazmiño y María Uruchima y mis 2 hermanas, Diana Pazmiño y Mary Pazmiño; los cuales son y han sido el motor para avanzar siempre hacia adelante, mirando hacia atrás tan solo ara saber cuánto se ha avanzado, siendo las personas que han confiado en mí sin importar las circunstancias o adversidades, han luchado junto a mí por hacer posible este sueño.

También se lo dedico a mis abuelos, los cuales, aunque no se encuentran en este mundo, se en el corazón que desde el cielo deben estar orgullosos de mí por cumplir lo que un día fue una promesa.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a ESPOL por la oportunidad de haber estudiado en una de las mejores universidades del país y haberme demostrado el nivel de excelencia educativa que manejan, así como a los docentes que durante estos años de carrera han compartido sus conocimientos para irme formando en la vida académica. Y de manera especial a todos los que conforman el proyecto CCUS-ESPOL y mis tutores MSc. Jorge Lliguizaca y PhD. Jorge Mendoza que han sido mi apoyo en el desarrollo de este trabajo.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Carlos Fabian Pazmiño Uruchima y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Autor

Carlos Fabian Pazmiño Uruchima

Evaluadores



Ing. Fernando Sagnay Sares

Ing. Jorge Lliguizaca Dávila



Ing. Jorge Mendoza Sanz

RESUMEN

El problema de la contaminación por gases de efecto invernadero obliga a cambiar el mundo hacia una transición energética, y la tecnología de captura y almacenamiento de carbono es una propuesta muy prometedora para reducir el impacto de las emisiones de gases. Sin embargo, esta tecnología necesita información técnica para evaluar la viabilidad del proyecto en el yacimiento en estudio, lo que se consigue con una caracterización estática de la que se obtiene información para el caso de estudio. El objetivo de este estudio fue desarrollar una propuesta de flujo de trabajo para la caracterización geológica, petrofísica y de fluidos del reservorio, a través de una revisión bibliográfica para la elaboración de un modelo estático en reservorios de petróleo con secuestro de CO₂. La metodología de investigación bibliográfica fue utilizada para establecer cada uno de los métodos que serán anexados en el flujo de trabajo final. La metodología inició con la recopilación de una base de datos la cual fue tomada de Scopus y Web of Science, los datos fueron procesados bajo los principios de la metodología PRISMA; así, los datos fueron reducidos a sólo aquellos relevantes para el estudio. Con los archivos finalmente seleccionados, se realizó una lectura crítica para determinar los métodos y tecnologías utilizados en los yacimientos con secuestro de CO₂ y en los que no disponían de esta técnica. De la base de datos se obtuvo que 25 artículos eran relevantes para el análisis de reservorios sin secuestro de CO₂, mientras que 15 artículos cumplían con los parámetros de selección de ser reservorios de petróleo localizados costa afuera y que contenían proyectos de almacenamiento de CO₂. Se concluyó que se pudo determinar un flujo de trabajo que detalla las características más importantes e idóneas para desarrollar un modelamiento estático de yacimientos con secuestro de CO₂, mediante la comparación de métodos y tecnologías para yacimientos de petróleo convencionales y con secuestro de CO₂ estudiados en los 35 artículos tomados como base de datos, siendo el eje principal para la caracterización estática, los modelos petrofísicos como el de porosidad, permeabilidad, saturaciones y conjunto a ellos el de capacidad de almacenamiento.

Palabras Claves: Modelamiento estático, CO₂, CCUS, Transición Energética, PRISMA

ABSTRACT

The problem of greenhouse gas pollution is forcing the world to change towards an energy transition, and carbon capture and storage technology is a very promising proposal to reduce the impact of gas emissions. However, this technology needs technical information to assess the feasibility of the project in the reservoir under study, which is achieved with a static characterisation from which information is obtained for the case study. The objective of this study was to develop a workflow proposal for the geological, petrophysical and fluid characterisation of the reservoir, through a literature review for the elaboration of a static model in oil reservoirs with CO₂ sequestration. The literature research methodology was used to establish each of the methods that will be annexed in the final workflow. The methodology started with the compilation of a database which was taken from Scopus and Web of Science, the data were processed under the principles of the PRISMA methodology; thus, the data were reduced to only those relevant to the study. With the finally selected archives, a critical reading was carried out to determine the methods and technologies used in CO₂ sequestration and non-CO₂ sequestration reservoirs. From the database, 25 articles were found to be relevant for the analysis of reservoirs without CO₂ sequestration, while 15 articles met the selection parameters of being oil reservoirs located offshore and containing CO₂ storage projects. It was concluded that it was possible to determine a workflow that details the most important and suitable characteristics to develop a static modelling of reservoirs with CO₂ sequestration, by comparing methods and technologies for conventional and CO₂ sequestration oil reservoirs studied in the 35 articles taken as a database, being the main axis for the static characterisation, the petrophysical models such as porosity, permeability, saturations and together with them the storage capacity.

Keywords: Static modelling, CO₂, CCUS, Energy Transition, PRISMA

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTOS	3
DECLARACIÓN EXPRESA.....	4
Evaluadores	5
RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ABREVIATURAS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
CAPITULO I	1
1 Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema.....	3
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Transición energética	4
1.4.2 Carbon Capture Utilization and Storage.....	5
1.4.3 Caracterización de reservorios	6
1.4.4 Inversión sísmica	8
1.4.5 Interpretación sísmica.....	8
1.4.6 Modelos de caracterización estática para yacimientos petroleros.	9
1.4.7 Metodologías para caracterización estática de reservorios con secuestro de CO ₂	12

CAPÍTULO II.....	15
2.0 METODOLOGÍA.....	15
2.1 Recopilación de la información -----	16
2.1.1 Revisión sistemática -----	17
2.2 Selección de técnica para el análisis de las fuentes bibliográficas-----	17
2.2.1 Metodología PRISMA -----	17
2.3 Determinación de los métodos geológicos, petrofísicos y comportamiento de fluidos para caracterización estática en yacimientos de petróleo con secuestro de CO ₂ -----	21
2.3.1 Análisis con Power BI -----	21
2.4 Selección de los métodos empleados en el flujo de trabajo final -----	22
CAPITULO III.....	22
3.0 RESULTADOS	22
3.1 Datos obtenidos de la metodología PRISMA -----	22
3.2 Datos de SCOPUS: Yacimientos de Petróleo sin secuestro de CO ₂ -----	23
3.3 Datos de SCOPUS: Yacimientos de Petróleo con secuestro de CO ₂ -----	25
3.4 Datos de WOS: Yacimientos con secuestro de CO ₂ -----	27
3.5 Fuentes bibliográficas seleccionadas -----	28
3.6 Análisis de métodos y tecnologías de la caracterización estática en yacimientos de petróleo-----	29
3.7 Análisis de métodos y tecnologías de la caracterización estática en yacimientos de petróleo con secuestro de CO ₂ -----	31
3.8 Métodos para utilizar en el flujo de trabajo-----	33
3.9 Flujo de trabajo -----	34
CAPÍTULO IV	36
4.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
4.1 Conclusiones-----	36

4.2 Recomendaciones.....	36
Bibliografía	37
Anexos	43

ABREVIATURAS

CO₂ Dióxido de carbono

CH₄ Metano

N₂O Óxido Nitroso

H₂O Vapor de Agua

O₃ Ozono

CCUS Carbon Capture Utilization and Sequestration

GEI Gases de Efecto Invernadero

EOR Enhanced Oil Recovery

SIS Simulador de indicadores secuenciales

DST Drill Stem Test

WOS Web of Science

PRISMA Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses

V_{SH} Volumen de Arcilla

SCAL Special Core Analysis

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Flujo de trabajo para modelar la porosidad	11
Figura 1.2 Flujo de trabajo para elaborar un modelo de reservorio en 3D	12
Figura 2.1 Flujo de trabajo a usar en Metodología	16
Figura 3.1 Número de publicaciones por grupo de estudio en yacimientos de petróleo sin secuestro de CO ₂	24
Figura 3.2 Número de citas por categorías en yacimientos de petróleo	24
Figura 3.3 Número de publicaciones por Grupo de estudio en yacimientos con secuestro de CO ₂	25
Figura 3.4 Número de citas por grupo de estudio en yacimientos con secuestro de CO ₂	26
Figura 3.5 Número de citas por publicación de base de datos SCOPUS	27
Figura 3.6 conteo de artículos por grupo de estudio para yacimientos con secuestro de CO ₂ de base de datos WOS	27
Figura 3.7 Número de citas por artículo para Yacimientos con secuestro de CO ₂ para base de datos WOS	28
Figura 3.8 Número de artículos en el cual se usó el registro en cuestión para yacimientos sin secuestro de CO ₂	29
Figura 3.9 Número de veces en la que se usó tecnologías de sísmica, análisis de núcleos y simulación en yacimientos sin secuestro de CO ₂	30
Figura 3.10 Número de artículos que emplean tecnologías para caracterización de yacimientos con secuestro de CO ₂	32
Figura 3.11 Número de artículos sobre SEM con CCUS en el que se empleó cada registro	32
Figura 3.12 Flujo de trabajo para Caracterización estática de yacimientos con secuestro de CO ₂	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Palabras claves usadas para búsqueda avanzada; **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2. Ejemplo de búsqueda avanzada tanto para Scopus como para WOS---- **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 3 Nombres de artículos que presentan caracterización estática con secuestro de CO₂----- **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4. Artículos usados para caracterización de yacimientos de petróleo sin secuestro de CO₂----- **¡Error! Marcador no definido.**

CAPITULO I

1 Introducción

El calentamiento global es un problema latente en la sociedad, pues se ve reflejado en las variaciones del clima y los eventos catastróficos que este trae consigo como son las inundaciones, las sequías extremas, el aumento del nivel del mar, entre otros. La causa, de lo anteriormente mencionado, es el fenómeno conocido como efecto invernadero, este hace referencia al aumento de temperatura producido por la retención del calor debido a gases como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), vapor de agua (H_2O), ozono (O_3) entre otros (León & Benavides, 2007). Dichos gases actúan como una barrera que deja pasar la luz, pero no permite la salida del calor (National Geographic, 2017).

Para evitar que el planeta llegue a puntos de no retorno y se pueda remediar la situación actual, los gobiernos y entidades privadas trabajan en proyectos que ayudan a reducir las emisiones de los GEI, principalmente las emisiones de CO_2 , ya que este es el gas que se emite en mayor proporción a nivel global tanto de fuentes estacionarias, es decir de un sitio fijo y estático, como de fuentes no estacionarias como vehículos, aviones, transporte marino, entre otros (UNICEF, 2020).

Una propuesta que promueve la reducción de emisiones es la captura y almacenamiento de CO_2 en reservorios petroleros. Este consiste en tomar los GEI emitido por fuentes estacionarias, separar el CO_2 y posteriormente transportarlo, para que sea almacenado en un yacimiento o se utilice en procesos de recuperación de petróleo (UNICEF, 2020). Sin embargo, se debe elegir al yacimiento que mejor se adapte a las características del gas. Con dicho fin se realiza la caracterización estática del reservorio, que permitirá verificar si es factible o no el desarrollo del proyecto en dicha zona, el proceso es único para cada yacimiento, lo cual tiende a consumir mucho tiempo y esfuerzo, para llevarlo a cabo (International Energy Agency, 2020).

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es desarrollar una propuesta metodológica que sirva como soporte en la caracterización estática de reservorios petrolíferos aplicados a la tecnología Carbon Capture Utilización and Storage. Se detallará un proceso que permitirá determinar todas las condiciones y características del

yacimiento que posibilite evaluar la factibilidad del proyecto dentro de la estructura analizada.

1.1 Descripción del problema

El desarrollo de nuevas tecnologías eco-amigables y sustentables en la producción, distribución y consumo de energía es fundamental, para combatir los efectos que ha causado la retención de la radiación térmica del planeta por el efecto invernadero (Repsol, 2020).

Actualmente se han desarrollado varias tecnologías limpias provenientes de fuentes renovables, sin embargo, el mundo aún depende en gran medida de los combustibles fósiles por lo cual se ha tomado como iniciativa reducir las emisiones usando captura y almacenamiento de CO₂. Según un reporte de la agencia internacional de energía, se espera que en el año 2030 el proyecto CCUS ayude a reducir un 47% de emisiones de CO₂ en la industria del cemento, 89% en transformación de combustibles, 10% en plantas Químicas y un impacto menor en otras industrias (International Energy Agency, 2020).

La tecnología CCUS se está desarrollando por todo el mundo, pero una parte muy importante del mismo es contar con formaciones que se adapten a los criterios de almacenamiento necesarias para retener el dióxido de carbono en el subsuelo, esto se lo logra conociendo las propiedades y estructura que tiene el reservorio en el cual se procura implementar el proyecto (García, 2020).

La caracterización estática del yacimiento es una fusión de varios modelos petrofísicos (como los modelos de permeabilidad y porosidad) y geológicos (como los modelos estructurales y sedimentológicos) que muestran el estado del yacimiento antes de iniciar la producción de los fluidos, de este se obtendrá información para sustentar la factibilidad de un proyecto de almacenamiento de CO₂. Se han realizado estudios sobre el proceso para caracterizar yacimientos con secuestro de CO₂ que son útiles para formaciones específicas; sin embargo, se debe aún generalizar los procesos para elaborar un flujo de trabajo que sirva para facilitar el proceso de modelado estático del yacimiento, lo cual se quiere lograr con el desarrollo del presente trabajo (Vo Thanh et al., 2019).

1.2 Justificación del problema

Debido al calentamiento global y el número de problemas que este ha traído al planeta, se han desarrollado varias tecnologías que tienen el propósito de hacer llegar a las emisiones de CO₂ a cero antes que el planeta llegue a un punto de no retorno, es decir, a una concentración de CO₂ en la atmósfera tan intensa que los daños causados por la misma sean irreversibles. Muchas de ellas se centran únicamente en reducir las emisiones del gas de efecto invernadero, pero solo unas pocas pueden considerarse autosustentables; debido a que no solo mitigan y reducen las emisiones de CO₂, sino también producen una ganancia que aporta a seguir desarrollando nuevas tecnologías (Orr, 2018).

Este es el caso del CCUS (Carbon, Capture, Utilization and Storage) donde se captura dióxido de carbono para posteriormente utilizarlo para procesos de recuperación terciaria en campos petroleros depletados, alrededor del 88% del CO₂ inyectado en el subsuelo tiene como finalidad ser usado para recuperación mejorada de petróleo, dándole un alto nivel de importancia económica. Un hecho muy importante es que antes de inyectar el gas se necesita conocer la estructura y el comportamiento de los diferentes fluidos dentro del yacimiento por tal motivo se debe evaluar correctamente la caracterización estática de los yacimientos para obtener información que sustente el secuestro de CO₂ (Orr, 2018).

El proyecto puede ser capaz de retener gigatoneladas de CO₂ en el subsuelo y a su vez recuperar el petróleo de los yacimientos como se mencionó anteriormente con EOR (Enhanced Oil Recovery) (Alcorn et al., 2019) , por lo tanto, se deben tomar en consideración ciertas características como las reservas remanentes y recuperables, la distribución de la permeabilidad, presión, saturación, temperatura, buzamientos, entre otros. Por lo cual se necesita determinar en primera instancia caracterizar el yacimiento al cual se le quiere aplicar el proyecto CCUS para obtener información como la capacidad de almacenamiento geológico (Zhong & Carr, 2019) y observar si cumple las condiciones necesarias para retener CO₂.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Desarrollar una propuesta de flujo de trabajo de caracterización geológica, petrofísica y de fluidos del yacimiento, mediante revisión bibliográfica para la

elaboración de un modelo estático en yacimientos de petróleo con secuestro de CO₂.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar métodos y tecnologías de análisis geológico, petrofísico y de comportamiento de los fluidos, mediante revisión bibliográfica, para caracterización de yacimientos petroleros convencionales y con secuestro de CO₂.
- Definir los métodos a utilizar en el flujo de trabajo mediante su análisis comparativo para su implementación en el modelado estático.
- Desarrollar el flujo de trabajo/hoja de ruta mediante el análisis de casos de estudio para la elaboración del modelo estático.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Transición energética

El camino para llegar a cero emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global es cada vez más estrecho, debido a que el tiempo para lograrlo se está acabando. Según la Agencia Internacional de Energías Renovables tan solo para el año 2030 se necesita reducir el 45% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero en comparación a las emitidas en 2010 (International Energy Agency, 2020). Sin embargo, la cifra en la cual se ha reducido las emisiones no se encuentra tan siquiera cerca de la requerida. Es prioritario tomar decisiones de manera inmediata para guiarnos hacia la meta propuesta en el Acuerdo de París cuándo se adoptaron los acuerdos internacionales sobre el desarrollo sostenible y cambio climático (Naciones Unidas, 2020).

El cambio del mundo hacia una nueva transición energética es un hecho, aunque es muy difícil aseverar dicha situación se puede tomar como punto de partida la reducción de costos en la obtención de energía por medio de recursos renovables, el progreso del sector energético el cual se está mayormente centrando en el uso final de la energía (BID - Banco Interamericano de Desarrollo, 2020).

La reducción de precios y la accesibilidad a las energías renovables otorgan mayor amplitud de mercado en el cual se pueden aprovechar las energías renovables y la más importante es haber tomado al desarrollo de nuevas fuentes de energía como pieza clave para limitar el calentamiento global para el año 2050

aumento menor a 1.5 °C lo cual permitirá el desarrollo de la vida como la se la conoce en el planeta (International Renewable Energy Agency (IRENA), 2021)..

Con el pasar de los años el sector energético ha venido arraigándose en tecnologías fomentadas en combustible fósil y otras fuentes que han contaminado en gran medida el ambiente terrestre. Han pasado varios años y las fuentes de energía no renovables se muestran reinado como principales e irremplazables, según datos de la CEPAL, tres cuartas partes de la energía producida en Latinoamérica y el Caribe proviene de fuentes no renovables y la mitad de la cuarta parte restante requiere combustión (Mart, 2021) .

Sin embargo, a partir de la última década se ha experimentado una transición dinámica dentro de la industria energética dados los requerimientos por el cambio climático y la seguridad energética que permita un desarrollo sustentable tanto para industrias como urbanizaciones (BID - Banco Interamericano de Desarrollo, 2020).

El apoyo de las políticas ambientales de varios países, así como el trabajo en equipo de varias naciones ha favorecido al desarrollo tecnológico y aplicación de estas nuevas tecnologías energéticas, incluso antes de pandemia los sistemas impulsados por energías renovables mostraron ser una técnica fiable y segura, sobre todo las porciones de energía radicadas en fuentes solares y eólicas. Por otro lado, no se puede excluir totalmente a la fuente energética desarrollada a partir de combustibles fósiles, por lo que se ha visto una solución a este problema en la aplicación de proyectos tecnológicos que reducen las emisiones de CO₂ como es el caso del CCUS (International Renewable Energy Agency (IRENA), 2021).

1.4.2 Carbon Capture Utilization and Storage

La captura, uso y almacenamiento de carbono es una tecnología que se encarga de remover el dióxido de carbono proveniente de fuentes industriales con el objetivo de una vez capturado ser usado y almacenados evitando así que causa daños en el ambiente. Se puede encontrar varias propuestas para el uso y el almacenamiento del dióxido de carbono entre las cuales están la recuperación mejorada de petróleo, elaboración de combustibles a base de dióxido de carbono,

producción de productos químicos, productos a base de microalgas y plásticos a base de CO₂ (SENER, 2018).

La tecnología CCUS es la visión de rentabilizar el almacenamiento de dióxido de carbono. La mayor parte de las actividades del CCUS se desarrollan en zonas como América del Norte, Europa; países como China, India, Japón. Mayoritariamente estos proyectos se encuentran financiados por fundaciones filantrópicas ligadas a la industria petrolera como es el caso de British Airways, Chevron, Exxon Mobil, HuaNeng Grupo, Indo Guld, entre otras. El mayor inversionista público es el departamento de energía de Estados Unidos (SENER, 2018).

La mejor propuesta para la aplicación de CCUS es la recuperación mejorada de petróleo ya que está representa el único grupo de tecnologías que contribuye tanto a disminuir la cantidad de CO₂ emitida en sectores claves como la misma industria petrolera, cementeras, acerías, entre otras; y además equilibra las emisiones que no pueden evitarse como son las móviles producidas por quema de combustibles que alimentan el transporte vehicular, nuevamente se hace hincapié en que esta es una parte fundamental para alcanzar los objetivos de cero emisiones de CO₂ (Benjamin & Lin, 2020) (Report & Utilisation, 2020).

Según Tania Bru, quien fue ministra de petróleos y energías en Noruega para el año 2020, el CCUS es una herramienta de mitigación clave en el cambio climático pues proporciona reducciones muy significativas de gases de efecto invernadero para los sectores industriales que consumen gran cantidad de energía. Por tal motivo se hace hincapié en el estudio de nuevos prospectos para aplicar la tecnología de almacenamiento de CO₂ (Turan et al., 2021).

1.4.3 Caracterización de reservorios

La caracterización de reservorios, en general, tiene como objetivo primordial elaborar un modelo geológico que aproxime lo más exactamente posible las características del yacimiento, como son la distribución de su porosidad, permeabilidad, estructura, fluidos y el comportamiento de este. La correcta caracterización de un yacimiento es el punto de partida para desarrollar, monitorear y administrar un yacimiento de manera óptima (Selley & Sonnenberg, 2015).

Esta nos muestra información sumamente importante sobre la distribución estructural del reservorio, la heterogeneidad y comportamiento de las propiedades petrofísicas. Para asegurar una incorporación neta de toda la información disponible en un yacimiento, se promueve el desarrollo de un modelo dinámico; sin embargo, para lograr dicho objetivo se debe comenzar con un modelo más simple conocido como modelo estático, el cual es la base para el desarrollo de uno dinámico (Civan, 2007).

La caracterización estática de yacimientos tiene como objetivo conocer la geometría y geología del yacimiento tomando como base la información geológica (datos sísmicos), geofísica y petrofísica; en este proceso no se consideran los efectos de producción del yacimiento. La información más relevante para el estudio de una caracterización estática son datos geológicos, registros de pozos, inversión sísmica y datos de laboratorio (García, 2012).

También existe el concepto de Caracterización dinámica del yacimiento, este consiste en la integración entre el modelo geológico y la simulación numérica del reservorio donde celda a celda se van proyectando propiedades como presión y saturación en el tiempo. Generalmente se las utiliza para tomar acciones sobre la forma de producir el campo; la información que se necesita para validar el modelo son (Pérez-Martínez et al., 2016):

- Historial de producción y presión
- Pruebas de presión y producción
- Registros a hoyo abierto y entubado
- Ingeniería de yacimiento

La principal diferencia entre la caracterización estática y dinámica es que la primera considera las propiedades y estructura del yacimiento en un instante de tiempo fijo, por lo cual no hay movimiento de fluido ni cambio en las propiedades del reservorio. Sin embargo, la caracterización dinámica presenta el cambio de las propiedades del reservorio en función del tiempo ya que existe movimiento de los fluidos que alteran las condiciones iniciales (Pérez-Martínez et al., 2016).

1.4.4 Inversión sísmica

Antes de conocer los tipos de modelos usados en la caracterización estática se debe tener en claro el proceso conocido como inversión sísmica.

En simples palabras la inversión sísmica es lo contrario al modelamiento del reservorio, ya que no se parte de una base de datos que nos lleven a modelar las propiedades de este, sino que ya se conoce, en primera instancia, la forma y estructura del yacimiento haciendo uso de ondas sísmicas, sin embargo, se toma estos datos para simular sus propiedades en laboratorio y así extraer información adicional que ayuda a completar el toda la información del reservorio (Barclay et al., 2008)

Este proceso de inversión sísmica tiene varias aplicaciones dentro de la industria como (Barclay et al., 2008):

- Cálculo de perfiles de invasión de fluidos
- Identificación de litologías
- Interpretación de volúmenes de petróleo, gas y agua
- Cálculo de la geometría del yacimiento
- Estimación de propiedades petrofísicas
- Mapeo de fluidos

Las aplicaciones de la inversión sísmica que más se ajustan a la finalidad de este trabajo son los relacionados al establecimiento de geología, geometría, propiedades petrofísicas y de fluidos que están asociados al reservorio.

1.4.5 Interpretación sísmica

En la primera etapa de la interpretación sísmica se debe establecer la conexión entre las reflexiones sísmicas y la estratigrafía, mediante el uso de registros de densidad y sónicos de la formación, a partir de ellos se puede elaborar un sismograma sintético. El cual representa una muestra tangible de la respuesta sísmica, que permite comparar los datos sintéticos con los datos sísmicos reales. La relación que existe entre los datos sísmicos con respecto al tiempo y datos de los pozos con respecto a la profundidad, ayudan a encontrar reflexiones sísmicas que corresponden a formaciones geológicas (Bate et al., 2023).

Posteriormente se realiza un análisis de datos espaciales en torno a toda la malla creada con los datos sísmicos, este es un proceso de control de calidad y comprensión de datos, así como la preparación de las entradas para el modelo de facies y petrofísico. Este proceso caracteriza la continuidad espacial en la variación de propiedades discretas del yacimiento como las facies y las propiedades continuas como el volumen de lutita, porosidad y saturación de agua (Abdel-Fattah et al., 2018).

1.4.6 Modelos de caracterización estática para yacimientos petroleros.

Los modelos de caracterización estática se encuentran muy correlacionados pues por separados presentan información valiosa para el análisis del reservorio, pero una vez se integran, forman un paquete del reservorio donde se puede encontrar información geológica, estructural, estratigráfica, sedimentológica, propiedades de la roca y fluidos. Dichas propiedades se encuentran distribuidas en una malla que representa al reservorio, a su vez la malla contiene celdas que son las que almacenan la información de cada punto en el yacimiento (Adelu et al., 2019).

1.4.6.1 Modelo estructural

La construcción del modelo estructural es fundamental para construir un modelo estático 3D mediante la creación de la modelización de fallas, mallado y la elaboración del horizonte interpretando cada zona. Proceso llevado a cabo mediante la recopilación de todos los datos, como información sísmica y registros de pozos, que se encuentren disponibles luego de un estudio geofísico (Abdelmaksoud et al., 2019).

Las fallas definen las rupturas de las celdas y los cambios en las propiedades; el siguiente proceso es definir la malla, esta se la crea a partir de un modelo en 2D que funciona como esqueleto, es decir se toma la información del modelado de fallas y se establece el tipo de celda a utilizar con las medidas en las direcciones “x” y “y”, la medida de la profundidad “z” depende del espesor del yacimiento. Finalmente, la interpretación de los horizontes consiste en la construcción de la estratificación vertical en el modelo (Abdelmaksoud et al., 2019).

1.4.6.2 Modelo estratigráfico

El modelo estratigráfico es el que presenta las distribuciones de los sistemas que se han depositado de manera continua para un tiempo específico, teniendo en cuenta los eventos que dan origen a la deposición de sedimentos para formar una

facies y la organización y estructura de los sedimentos depositados. Este modelo sirve mayormente como una herramienta de predicción para ubicar mejores fases de rocas yacimiento y sellos que se encuentren a una escala adecuada. Es importante recalcar que la elaboración de un buen modelo de facies o sedimentológico ayudará en gran medida a laborar un modelo estático de calidad debido a que este depende de los cambios abruptos de las fases tanto litológicas como paleontológicas (Falcon, 2018).

1.4.6.3 Modelo de facies

El modelo de facies es un método de distribución de facies discretas a lo largo de la malla del modelo para adquirir una información y comprensión superiores del marco estratigráfico y de la distribución y arquitectura de facies del yacimiento. Para lograr describir una facie a escala macroscópica se necesitan datos específicos los cuales son obtenidos de núcleos, muestras de paredes y ripios además de la litología, espesores de capas, estructuras sedimentarias y contenido fosilífero. Con la información presente se puede obtener una sucesión vertical y horizontal la cual muestra los espesores y volúmenes de las fases permitiendo definir los elementos arquitectónicos de los cuerpos de la roca presentes en el reservorio (Falcon, 2018).

Se utiliza la simulación de indicadores secuenciales (SIS), un método estocástico basado en Krigging, el cual según Porras es un método inferencial espacial que nos permite interpolar los valores que no tenemos en la malla haciendo uso de los existentes (Porras Velázquez, 2017), utilizando curvas de proporción vertical generadas con la herramienta de análisis de datos, y condicionadas a los valores de facies escalados en las celdas de los pozos nodales para crear un modelo de facies en 3D. Esta técnica se utiliza a menudo en condiciones de escasez de datos (Abdel-Fattah et al., 2018).

1.4.6.4 Modelado de la porosidad

En paralelo al flujo de trabajo de modelado de facies, el modelado de porosidad se realiza a través de dos pasos: 1.) modelización de la tendencia de la porosidad y 2.) modelización de la porosidad geo celular. 3.) asignar a cada celda de la malla geo celular 3D su valor de porosidad (Hull, 2021) .

Porosity Model Workflow

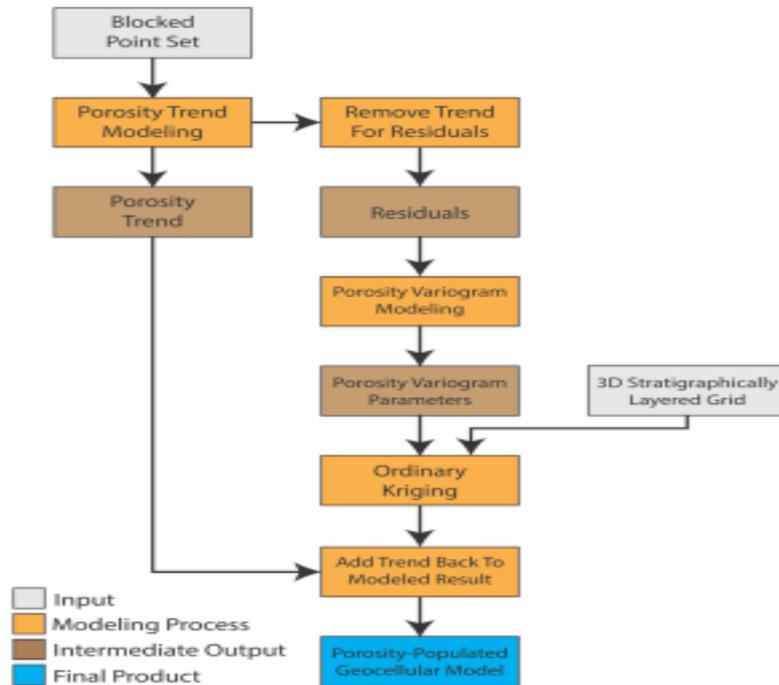


Figura 1.1 Flujo de trabajo para modelar la porosidad

La figura 1.1 muestra el flujograma empleado para desarrollar el modelo de porosidad. Inicia con el bloque de datos que se usa para dar paso al llenado de cada celda. El resultado final es la población de valores de porosidad en la malla geocelular en 3D que ha sido desarrollado con métodos de interpolación de valores como Krigging (Hull, 2021).

1.4.6.5 Modelo petrofísico

En base a los parámetros petrofísicos escalados como la porosidad, contenido de arcilla, saturación de hidrocarburo, se interpolan las celdas de cada cuadrícula en 3D mediante un método de simulación de función aleatoria gaussiana cuyo modelamiento depende del modelo de facies. La simulación de la función aleatoria gaussiana se distingue porque en cada celda se observa un valor para cada propiedad (Othman et al., 2021).

La simulación de función aleatoria gaussiana se refiere a distribuciones de entrada, datos de pozos, tendencias y Variogramas y se distingue por múltiples parámetros estadísticos, que reflejan la variabilidad de las propiedades, donde cada celda contiene un valor para cada propiedad (Othman et al., 2021).

1.4.6.6 Síntesis de los modelos de caracterización estática

La caracterización estática más común es el modelo 3D, en el cual se puede resumir su proceso usando los términos anteriormente descritos, como se observa en la figura 1.2. En primera instancia se debe identificar el tipo de información con la que se cuenta, es decir, sísmica, registros, núcleos, entre otros. Luego se elaborará el modelo estructural, el cual es el esqueleto donde se añadirán las demás propiedades del yacimiento, luego se establecen las facies y propiedades petrofísicas, y así obtener finalmente una estructura que sea útil para el estudio del yacimiento como pueden ser cálculos de volúmenes y capacidades de almacenamientos.

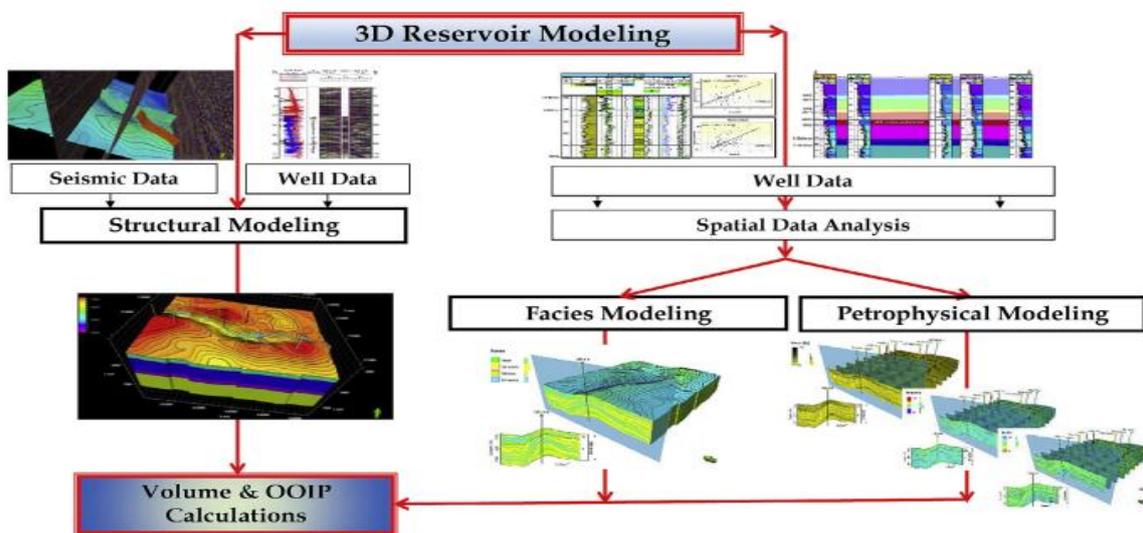


Figura 1.2 Flujo de trabajo para elaborar un modelo de reservorio en 3D

Las tecnologías para la caracterización estática de yacimientos son adaptables a los datos iniciales del sitio de estudio y de gran utilidad para predecir comportamientos dentro del reservorio, sin embargo, para términos de nuevas tecnologías como la CCUS se tienen adaptaciones a estos sistemas, los cuales serán tratados en los siguientes apartados.

1.4.7 Metodologías para caracterización estática de reservorios con secuestro de CO₂.

1.4.7.1 Modelo geoquímico

La modelización debe evaluar los cambios geoquímicos a corto y largo plazo que se producen en la formación de almacenamiento con respecto al atrapamiento de CO₂, las modificaciones que las reacciones podrían causar en la porosidad y la

permeabilidad, y el impacto de las hipótesis e incertidumbres en las predicciones (Holmslykke et al., 2020).

1.4.7.2 Modelo Geológico en 3D

El principal objetivo de la caracterización del geológica en 3D es proporcionar la información geológica necesaria para identificar las principales características de un emplazamiento, como la capacidad de almacenamiento, la inyección, la contención y los mecanismos de atrapamiento.

El proceso para lograr un modelo geológico en 3D para yacimientos con secuestro de CO₂ es (Vo Thanh et al., 2019):

1. Se debe construir un modelo estructural con el objetivo de encontrar las fallas, las facies y la estratificación de los reservorios.
2. Predecir los modelos de porosidad y permeabilidad.
3. Construcción de un modelo petrofísico en 3D.
4. DST (Drill Stem Test) para validar la precisión de los modelos de porosidad y permeabilidad.
5. Evaluar la capacidad de almacenamiento de CO₂ teórica.

El uso de DST pues se toman los valores simulados en los modelos de porosidad y permeabilidad y se los compara con los obtenidos en el DST, si los valores se ajustan se puede proceder con el paso 5, si no, se debe retornar al paso 2 (Vo Thanh et al., 2019).

El DST es un método de evaluación de reservorios. Esta prueba permite que el fluido fluya de la formación hacia la tubería de perforación hasta llegar a la superficie. El dispositivo de registro de presión en esta herramienta mide las presiones en cada instante cuando el pozo fluye y cuando no (Baker, 2004).

1.4.7.3 Modelo Geoestadístico en 3D

El modelo se enfoca en proponer una extrapolación de las propiedades del reservorio en estado estático, con el fin de obtener información verificada para el cálculo de la capacidad de almacenamiento de CO₂. Se lo desarrolla con el siguiente formato (Zhong & Carr, 2019) :

1. Construcción de modelos de porosidad y permeabilidad a partir de registros de pozos convencionales y pruebas de laboratorio.

2. Aplicar los modelos de porosidad y permeabilidad para predecir dichas propiedades a escala de pozo.
3. Desarrollar el modelo petrofísico para cada celda mediante el modelo de simulación de funciones gaussianas aleatorias con sus respectivas restricciones geológicas.
4. Calcular la capacidad de almacenamiento teórica haciendo uso del modelo geoestadístico.

La extrapolación de las propiedades petrofísicas usando las funciones gaussianas son fundamentales para construir el modelo de propiedades petrofísicas del yacimiento (Zhong & Carr, 2019) .

Modelamiento en 3D estructural y estratigráfico

Este modelo integra el modelo estructural con el modelamiento de facies y ambientes sedimentarios, con la finalidad de formar una malla estructural en 3D. Los pasos para elaborarlo son similares al del modelamiento en reservorios sin secuestro de CO₂.

1. Se identifican las fallas y establecen propiedades de las rocas incluido el volumen de arcilla.
2. Se escalan las propiedades petrofísicas el modelo geo celular tridimensional.
3. Utilizar modelos de Variogramas, como técnicas estándar de extrapolación geoespacial de las propiedades petrofísicas.
4. Utilizar las propiedades petrofísicas con simulación de Monte Carlo al estimar el volumen poroso para el cálculo de la capacidad de almacenamiento de CO₂.

1.4.7.4 Modelamiento de la capacidad de almacenamiento

Este modelo se lo coloca fuera de los anteriores presentados, debido a que se habla en específico de la distribución de la capacidad de almacenamiento geológico, los modelos anteriores son un medio y herramienta para obtener el resultado de la masa de CO₂ que se puede almacenar.

La reducción del riesgo de las perspectivas de secuestro de carbono y la predicción espacial de los depósitos de alta calidad requiere la estimación de la capacidad de almacenamiento y la creación de mapas de capacidad de almacenamiento

A partir de las mallas geo celulares de facies y porosidad generadas, se modela la capacidad de almacenamiento en espacio 3D tanto para las regiones de interés. El proceso para hacerlo requiere dos pasos principales: modelar el volumen total de poros disponible para el CO₂ y aplicar un factor de almacenamiento (Hull, 2021)

CAPÍTULO II

2.0 METODOLOGÍA

El hecho de que existan varias metodologías para caracterizar estáticamente un yacimiento de petróleo con y sin secuestro de CO₂, nos lleva a pensar en la evaluación individual de cada una y cual presenta mejores ajustes generales a un yacimiento. Por lo cual en esta metodología se busca definir las mejores tecnologías para el desarrollo de una caracterización estática enfocada en tres ramas: la geología, la petrofísica y los fluidos del yacimiento.

Se pretende sustentar los resultados finales en información confiable y delimitada, por lo cual se ha considerado como fuente primaria de información, a aquellos artículos científicos provenientes de motores de búsqueda validados por la academia como lo son Web of Science (WOS), la cual es una base de datos que contiene citas y fuentes de múltiples áreas, cubriendo ciencias médicas, científicas y humanística (Ramlal et al., 2021); así como a Scopus la cual al igual que WOS es una base de datos seleccionada por expertos enriquecidos en la literatura y la academia (Elsevier, 2020).

Como se observa en la figura 2.1, la metodología de este trabajo parte de una base de datos, la cual será estructurada de tal forma que se la pueda analizar en Power BI, para obtener como resultado final los métodos que se emplearán en el flujo de trabajo de la propuesta final de este estudio.

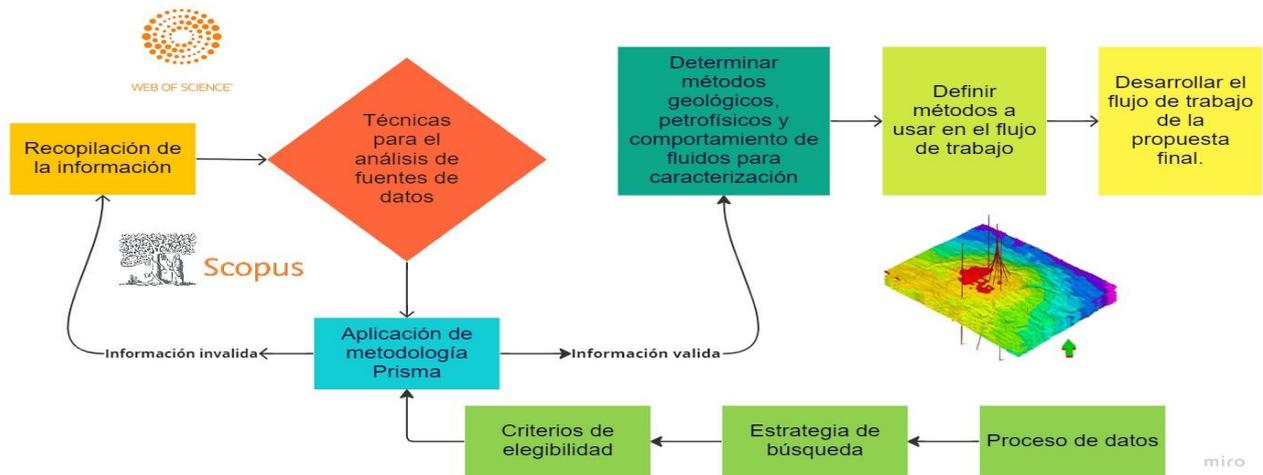


Figura 2.1 Flujo de trabajo a usar en Metodología

Además, el flujo de trabajo de la figura 3 donde se detalla la metodología de este trabajo tiene un segmento particular, es el caso de la información. Al ingresar a la metodología PRISMA en el diagrama solo se puede avanzar si se tiene información valida, pues se recuerda que el trabajo depende de las fuentes bibliográficas.

Si no se encontró información necesaria se debería reestructurar el tipo de búsqueda avanzada, especialmente cambiar las palabras claves con las que se busque información en el trabajo.

Posteriormente se obtienen las tecnologías y métodos usados en modelamientos estáticos de yacimientos convencionales y con secuestro de CO₂, mediante el análisis comparativo se seleccionan los métodos que se usarán en el flujo de trabajo de la propuesta y finalmente se desarrolla el flujo de trabajo tomando en cuenta las tecnologías más usadas y exitosas en base a la literatura estudiada.

2.1 Recopilación de la información

Con el fin de obtener información confiable y verificada se ha decidido tomar datos únicamente publicados en artículos científicos. Un artículo científico puede ser descrito como un informe de primera mano donde se detallan los resultados de una investigación, siendo estos una fuente primaria de conocimiento (Blanco, 2020).

Se usarán parámetros que delimiten la investigación con el objetivo de obtener las metodologías y técnicas de caracterización estática en yacimientos de CO₂, por lo tanto, se tomará la información de SCOPUS y WOS.

Al realizar un análisis de fuentes bibliográfica es importante conocer que se lo estructurará como una revisión sistemática, así se establecerá una metodología para el depurado de la información recopilada inicialmente.

2.1.1 Revisión sistemática

Las revisiones sistemáticas son escritos que se enfocan en responder una problemática o tema en específico, manteniendo una estructura que facilita el entendimiento de la información. Los respalda una base de datos compuesta por artículos y fuentes de información verificadas por la comunidad científica (Moreno et al., 2018).

Su principal característica es que analizan la efectividad de un estudio mediante técnicas de recolección de datos, selección crítica de documentos acorde al tema para finalmente evaluar y sintetizar la información recopilada (Luz et al., 2005).

2.2 Selección de técnica para el análisis de las fuentes bibliográficas

Debido a que se tomará la información como fuentes bibliográficas asociadas a una revisión sistemática se ha decidido manejar los datos haciendo uso de la metodología PRISMA, ya que esta nos permite organizar información de bases de datos estructuradas de igual forma a las que se tienen en WOS Y SCOPUS. Además, esta metodología nos permite reducir en gran medida el número de fuentes a estudiar lo cual nos lleva a tener de manera más organizada y coherente los métodos y tecnologías que se buscan para cada área (geológico, petrofísico y comportamiento de fluidos).

2.2.1 Metodología PRISMA

PRISMA es un conjunto de elementos basado en la evidencia para informar en revisiones sistemáticas y metaanálisis. PRISMA se centra en el informe de revisiones que evalúan los efectos de las intervenciones, pero también se puede utilizar como base para informar revisiones sistemáticas con objetivos distintos a la evaluación de intervenciones. Esta metodología tiene como objetivo ayudar a

los autores a mejorar la presentación de informes de revisiones sistemáticas y metaanálisis (Yepes-Nuñez et al., 2021).

El esquema general de la metodología es presentado en la figura 4, en el diagrama se ve de manera muy general la estructura a seguir dentro de la metodología, esta nos ayuda a comprender con mayor facilidad como se puede filtrar la información de una base de datos hasta quedarnos con la bibliografía relevante para el estudio (Yepes-Nuñez et al., 2021) .

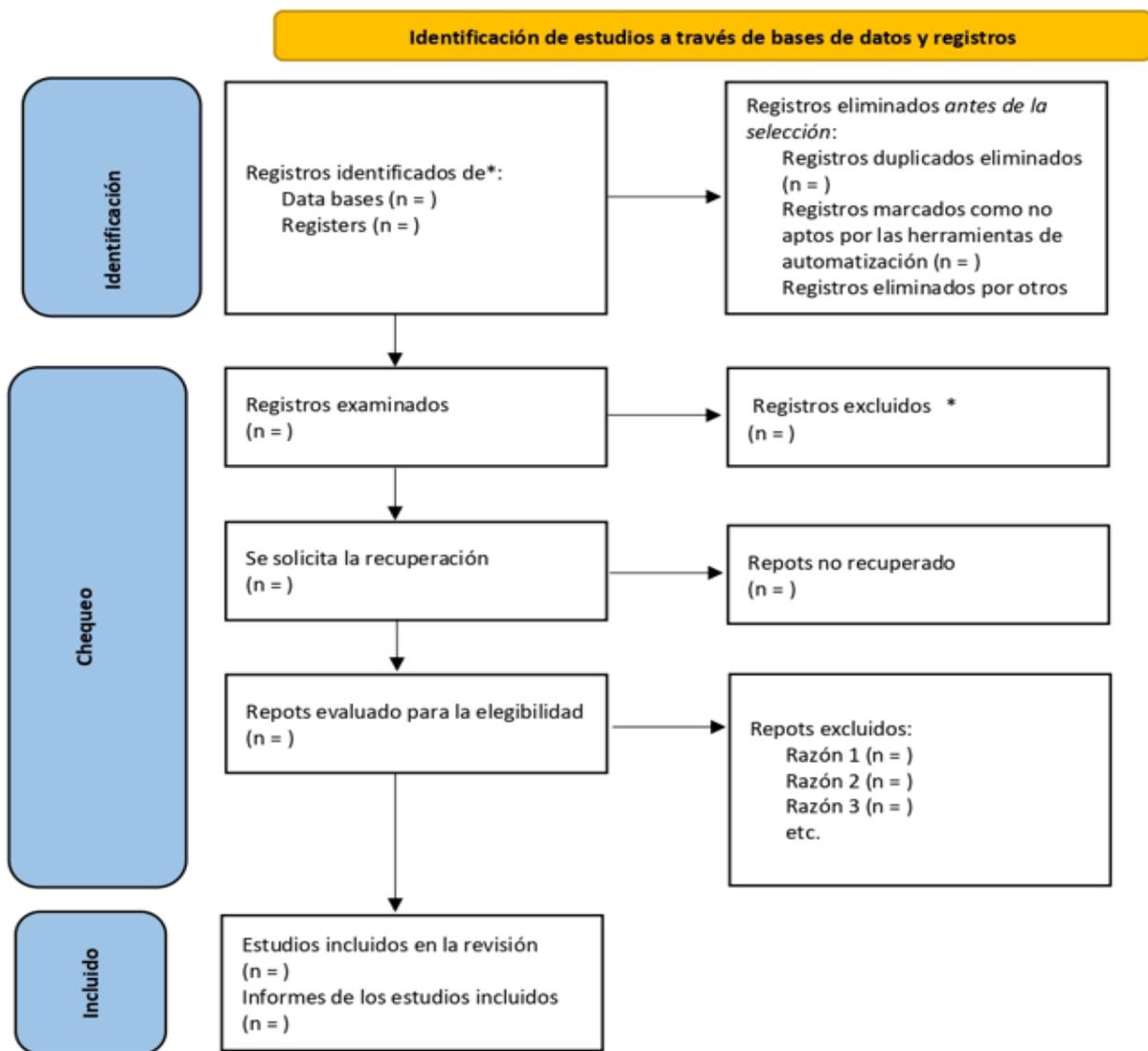


Figura 2.2 Esquema de metodología PRISMA obtenido de (PRISMA, 2020)

La parte más importante en el diagrama es el resultado final, es decir, los documentos oficiales que estarán incluidos en el desarrollo de la investigación.

2.2.1 Criterios de elegibilidad

Especificar los criterios utilizados para decidir qué evidencia era elegible o no elegible con suficiente detalle debería permitir a los lectores comprender el alcance de la revisión y verificar las decisiones de inclusión. La información con la que se desarrollará el estudio se basa en artículos científicos obtenidos de los buscadores, Scopus y Web of Science, a partir de los cuales se proyecta la revisión sistemática de los métodos para caracterización estática en yacimientos de petróleo con secuestro de CO₂, en el período de tiempo a partir del año 2000 hasta el año 2022. En este trabajo se ha decidido utilizar artículos publicados en español e inglés, el español por ser el lenguaje de la mayoría de los países latinoamericanos, en donde se encuentra Ecuador en donde se ambientará el estudio, y el inglés por ser un lenguaje universal dentro de los aportes científicos.

2.2.1.2 Estrategia de búsqueda

Se realizará una búsqueda con palabras claves referentes al tema central de la investigación, para delimitar de manera precisa la información que requerimos.

Las palabras claves se clasificaron en segmentos como: Modelo Geológico, Modelo Petrofísico, Modelo estratigráfico, Modelo de porosidad y de facies.

Todas asociadas a un tema principal que es la caracterización estática en yacimientos con secuestro de CO₂ como se muestra a continuación (Ver Tabla 1).

Tabla 1.- Palabras claves usadas para búsqueda avanzada

Palabras claves
Caracterización estática y Modelo geológico y CCUS
Modelamiento estático y Modelo geológico y Secuestro CO ₂
Caracterización estática y Modelo petrofísico y CCUS
Modelamiento estático y Modelo petrofísico y Secuestro CO ₂
Caracterización estática y Modelo estratigráfico y CCUS
Modelamiento estático y Modelo estratigráfico y Secuestro CO ₂
Caracterización estática y Modelo porosidad y CCUS
Modelamiento estático y Modelo porosidad y Secuestro CO ₂
Caracterización estática y Modelo facies y CCUS
Modelamiento estático y Modelo facies y Secuestro CO ₂

La búsqueda de información para la revisión sistemática avanzada se desarrolló a partir de noviembre del 2022, se usaron palabras claves para desarrollar el estudio, debido a que, los algoritmos que están disponibles en las plataformas virtuales Scopus y Web of Science están en base a estos códigos, los cuales permiten especificar los criterios de selección para obtener resultados destacados en el formato CSV (valores separados por comas) (Ver Tabla 2).

Tabla 2. Ejemplo de búsqueda avanzada tanto para Scopus como para WOS

Ejemplo de formulación de búsqueda avanzada
<p>Scopus</p> <p><i>Para Yacimientos de Petróleo sin secuestro de CO2:</i></p> <p>Key= ("reservoir modeling" AND "static modeling" AND "oil reservoir" AND ("petrophysics" OR "fluid properties" OR "geology" OR "geologic"))</p> <p><i>Para Yacimientos de Petróleo con secuestro de CO2:</i></p> <p>Key= ("Characterization" AND "static modeling" AND "reservoir" AND ("petrophysics" OR "fluid properties" OR "geology" OR "geologic") AND ("Storage" AND "carbon dioxide"))</p>
<p>WOS</p> <p><i>Para Yacimientos de Petróleo sin secuestro de CO2:</i></p> <p>ALL= ("reservoir modeling" OR "static modeling" AND "oil reservoir" AND ("petrophysics" OR "fluid properties" OR "geology" OR "geologic"))</p> <p>Refined by: Enriched Cited References and Open Access</p> <p><i>Para Yacimientos de Petróleo con secuestro de CO2:</i></p> <p>ALL= ("static characterization" AND "oil reservoir" OR "Static modeling" Or "Characterization" AND "Carbon dioxide" AND "CO2 STORAGE")</p>

2.2.1.3 Procesamiento de datos

El tratamiento de los datos se establece junto con la selección de los artículos científicos adecuados para el estudio. Se inicia con la conversión de los datos del formato csv a xls (extensión de archivo), que pertenece a Microsoft Excel para su mejor manipulación. Luego se leerán cada uno de los artículos científicos y se identificará su importancia dentro del reconocimiento de metodologías y tecnologías utilizadas en la caracterización estática de yacimientos con y sin

secuestro de CO₂. Además, deben cumplir las condiciones de tener como caso de estudio yacimientos de petróleo cuyos campos sean tierras adentro (on-shore). Se consideran parámetros de selección como el número de citas, año y grupo de estudio (geológico, petrofísico o fluidos del yacimiento)

2.2.1.4 Análisis de datos recopilados

Una vez seleccionados, los artículos se clasificaron por metodologías. Se genera una hoja de cálculo de Microsoft Excel con todos los artículos científicos; se realizan gráficos para mostrar los resultados en el software Power BI, el cual es un programa gratuito que permite procesar datos tabulados para presentarlos de manera visible y didáctica (AgileThought, 2021), debido a su compatibilidad con el formato Excel con el programa y la sencilla visualización de resultados.

2.3 Determinación de los métodos geológicos, petrofísicos y comportamiento de fluidos para caracterización estática en yacimientos de petróleo con secuestro de CO₂

Para poder establecer el flujo de trabajo se deben comparar los casos de estudio de la fuente de datos inicial, por una vez filtrada la información haciendo uso del Power BI y la lectura comprensiva se procederá a agrupar los artículos según correspondan a cada grupo, ya sean métodos geológicos, petrofísicos o comportamiento de fluidos.

2.3.1 Análisis con Power BI

Power BI es una plataforma que nos permite observar de manera interactiva el estudio de un conjunto de datos, por lo cual esto nos sirve en nuestro estudio para tomar una mejor interpretación de resultados y poder definir que metodologías se utilizarán en el flujo de trabajo (Microsoft, 2022).

Dentro de Power BI se priorizará conocer datos como el número de citas que tiene cada documento para así evaluar el impacto que ha tenido el uso de cada tecnología dentro de los estudios publicados en cada motor de búsqueda, ya sea este WOS o SCOPUS.

2.4 Selección de los métodos empleados en el flujo de trabajo final

Finalmente se tomarán los artículos con mayor impacto en el área científica para utilizar sus técnicas dentro del flujo de trabajo que servirá como guía para realizar una caracterización estática en yacimientos con secuestro de CO₂.

CAPITULO III

3.0 RESULTADOS

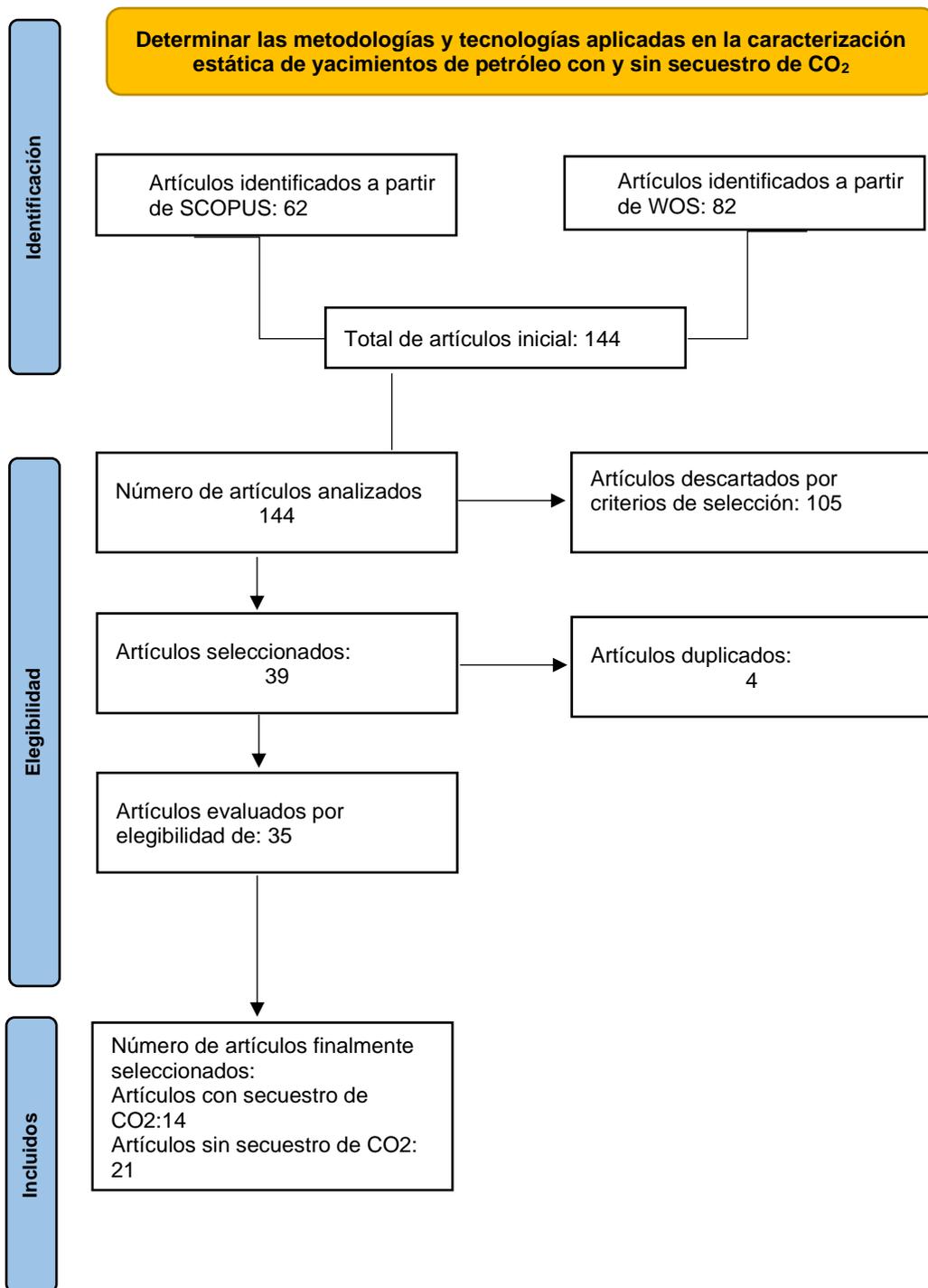
En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos luego de haber analizado la base de datos. Se indicará el número de artículos que cumplen con los criterios de selección establecidos en la metodología. Además, se mostrará los resultados obtenidos de la metodología PRISMA para el procesamiento de la información.

También se mostrará las tecnologías y los métodos que se presentan dentro de los artículos seleccionados como prioritarios dentro de este trabajo, la forma de presentar cada tecnología es mediante una discusión de comparaciones entre los datos obtenidos en caracterización de reservorios de petróleo convencionales y las metodologías aplicadas para yacimientos de petróleo con secuestro de CO₂.

3.1 Datos obtenidos de la metodología PRISMA

Luego de haber obtenido la información de los motores de búsqueda como Web of Science y Scopus, se procedió a filtrar la información obteniendo los resultados de artículos seleccionados para cada uno de los casos de estudio (Caso 1.- Yacimientos de petróleo sin secuestro de CO₂; Caso 2.- Yacimientos de petróleo con secuestro de CO₂), donde se obtuvo que para el análisis de la caracterización estática de yacimientos de petróleo sin secuestro de CO₂ se tiene 21 artículos, mientras que para la caracterización estática en yacimientos con secuestro de CO₂ se tiene 14 artículos.

El filtrado de la información se lo puede observar en el siguiente diagrama, el cual detalla cada uno de los pasos con el número de artículos que se tenía en cada etapa.



3.2 Datos de SCOPUS: Yacimientos de Petróleo sin secuestro de CO₂

En cuanto a los artículos analizados sobre metodologías para caracterización estática en yacimientos de petróleo se tiene que el 38% de los artículos obtenidos con la búsqueda avanzada en Scopus cumple con los requerimientos planteados

en la sección de la metodología denominada “procesamiento de datos” y un 62% fueron descartados por no tener una estrecha relación al tema de estudio.

A este grupo de artículos se los clasificó por grupo de estudio en metodologías de “Geología”, “Petrofísica y Geología” y Comportamiento de fluidos como se observa en la figura 3.1, donde se muestra el número de artículos seleccionados por cada categoría. Teniendo al grupo “Petrofísica y Geología” en primera instancia aportando mayor número de publicaciones (artículos), seguido de “Geología” y por último “Comportamiento de fluidos”.

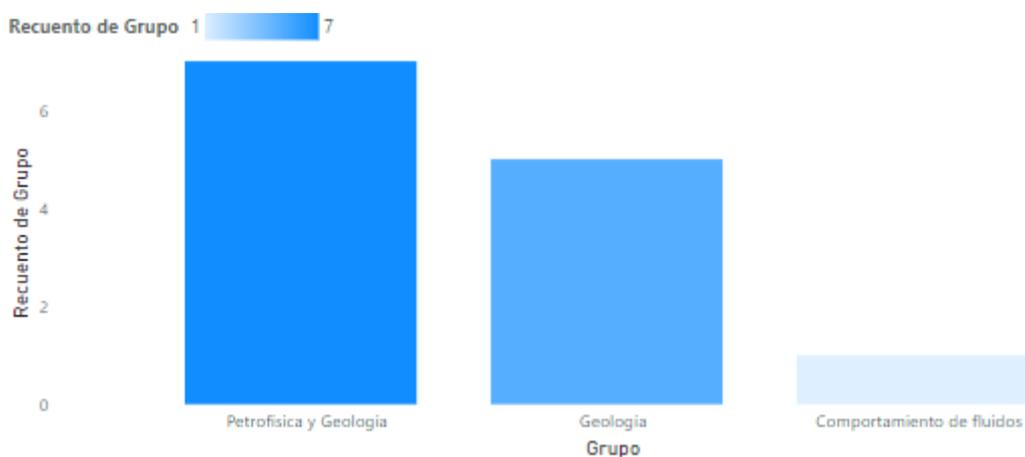


Figura 3.1 Número de publicaciones por grupo de estudio en yacimientos de petróleo sin secuestro de CO₂

También se puede observar en la figura 3.2 que el número veces citado es mayor en el grupo de “Petrofísica y Geología”, teniendo este aproximadamente el 55% de las citas totales de la base de datos estudiada.

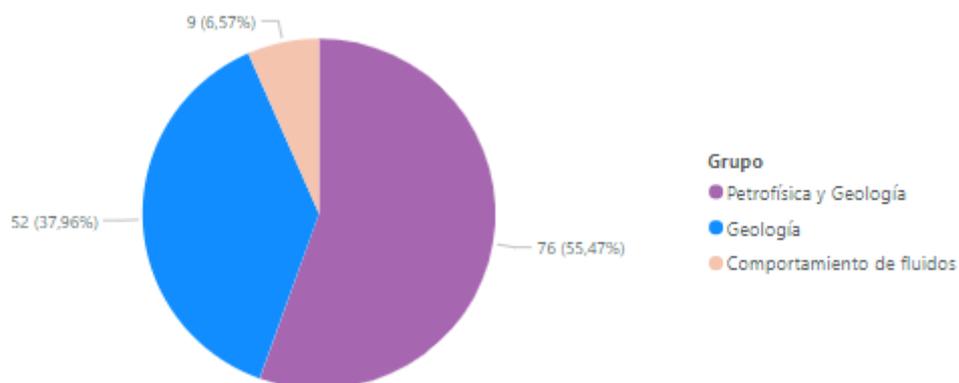


Figura 3.2 Número de citas por categorías en yacimientos de petróleo

3.3 Datos de SCOPUS: Yacimientos de Petróleo con secuestro de CO₂

Con respecto a las fuentes analizadas en Scopus, se puede observar en la figura 3.3 que para la caracterización estática de yacimientos de petróleo con secuestro de CO₂ se tiene que casi el 72% del total (21/29) de la base de datos inicial no fue seleccionada para el estudio. Sin embargo, se tiene un 27% (8/29) de los documentos que corresponden a la temática de interés. Teniendo como eje principal a los artículos relacionados al modelamiento estático con bases de geología, seguido por los que optan por enfocar la caracterización en modelos geológicos y petrofísicos y por último los que se enfocan en el comportamiento de los fluidos.

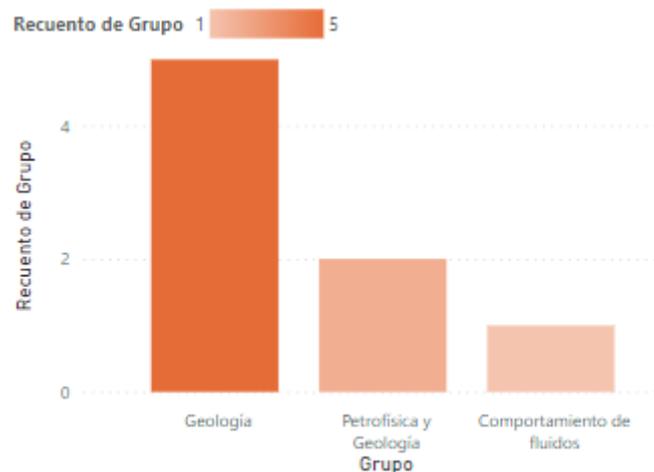


Figura 3.3 Número de publicaciones por Grupo de estudio en yacimientos con secuestro de CO₂

En cuanto al número de citas se observa en la figura 3.4 que el grupo de estudio que maneja tanto petrofísica como geología es el que mayor número de citas ha obtenido con aproximadamente 68% del total de documentos citados.

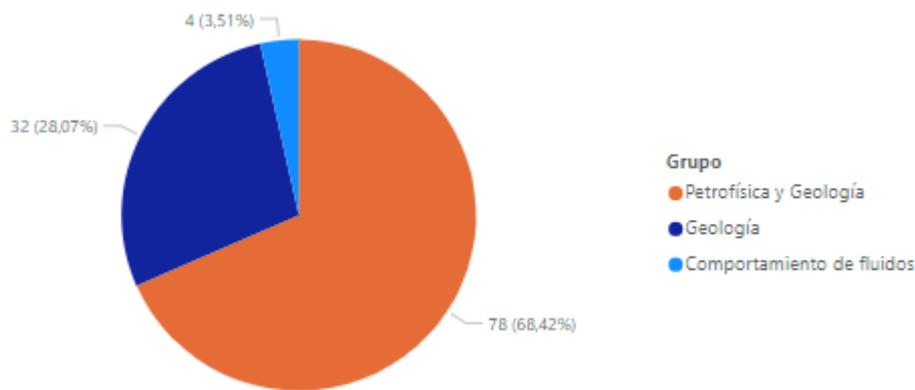


Figura 3.4 Número de citas por grupo de estudio en yacimientos con secuestro de CO₂

Para un mejor entendimiento de los artículos utilizados en esta sección se presenta una tabla con los nombres del artículo correspondientes a cada punto del gráfico la cual puede ser observada en la sección final de “Anexos” con el nombre de anexo 1; en el cual se podrá encontrar el número de documento en el gráfico y el nombre del artículo para que se pueda entender el siguiente gráfico en el que se detallan el número de veces citado por cada artículo, se lo grafica para buscar picos que ayuden a fijar un desarrollo de tendencias dentro de los grupos de estudio que se mencionaron anteriormente.

Tomando un enfoque específico de las citas por cada artículo seleccionado se observa en la figura 3.5 que el artículo con mayor número de veces citadas individualmente contiene 60 de las mismas y pertenece al grupo de estudio de “Petrofísica y Geología”

Este hecho muestra una tendencia pues ya se ha ido viendo que los estudios de este trabajo generalmente se están enfocando en hacer uso de la geología y la petrofísica dentro de sus metodologías.

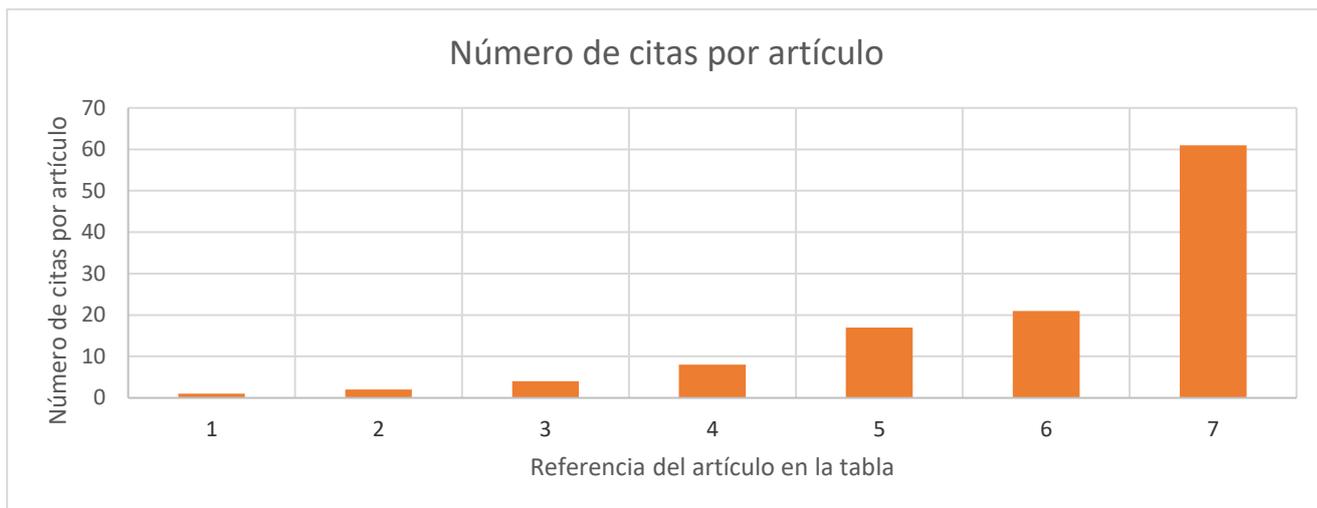


Figura 3.5 Número de citas por publicación de base de datos SCOPUS

3.4 Datos de WOS: Yacimientos con secuestro de CO₂

Del total de artículos recopilados para la base de datos de WOS se obtuvo que el 18% cumplían con los requerimientos planteados en el apartado de “procesamiento de datos” de la metodología. Es decir, que sean artículos relevantes en la caracterización estática de yacimientos con secuestro de CO₂ y a su vez cumplan con que sean reservorios de petróleo que se encuentren en tierra (on shore).

En la figura 3.6 se puede observar que de los artículos seleccionados para su análisis se tiene que la mayoría unifican los grupos de Geología y Petrofísica, un 71% de ellos.

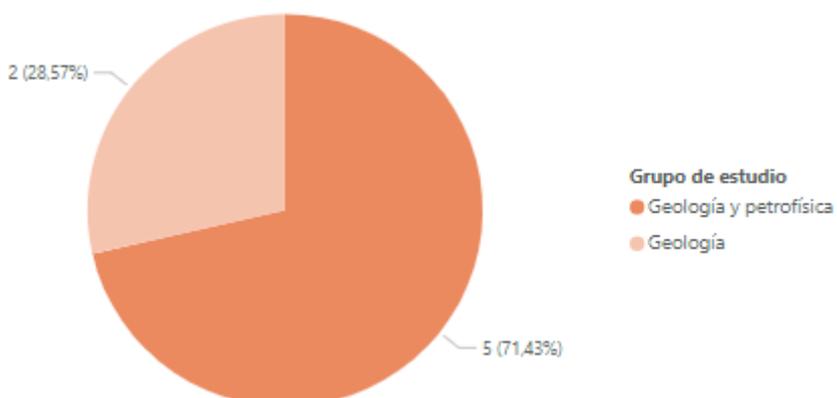


Figura 3.6 Conteo de artículos por grupo de estudio para yacimientos con secuestro de CO₂ de base de datos WOS

Al hacer un análisis particular de los artículos seleccionados, como se observa en la figura 3.7, el artículo con mayor número de citas corresponde al grupo de estudio en el cual se presentan tanto la aplicación geológica como petrofísica; dando a notar una clara afinidad con la relación de estos 2 segmentos.

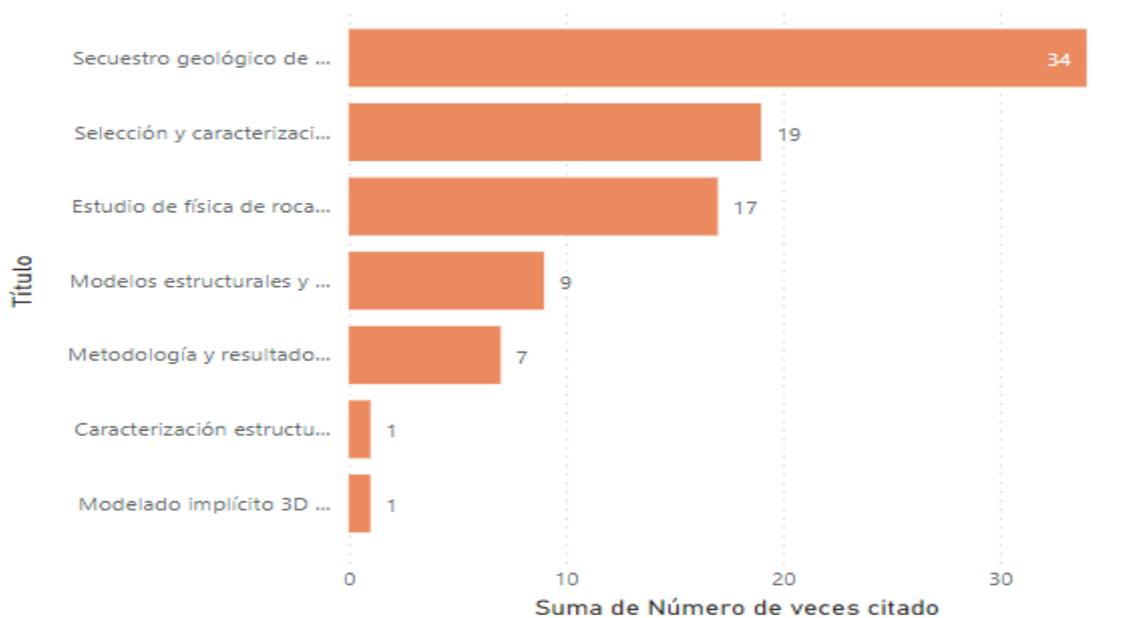


Figura 3.7 Número de citas por artículo para Yacimientos con secuestro de CO₂ para base de datos WOS

3.5 Fuentes bibliográficas seleccionadas

A continuación, se muestra una tabla de datos en la que se observan todos los documentos utilizados en cada una de las categorías para que el lector tenga acceso de manera sencilla a los datos usados en el proyecto.

Podrá observar la tabla con cada uno de los nombres de artículos y grupo al que pertenece en la parte de anexos, ver como anexo 2, se detallan los artículos utilizados para determinar tecnologías para modelamiento estático de yacimientos convencionales.

También se tiene la información referente a los artículos usados para la caracterización estática en yacimientos con secuestro de CO₂

Todos los artículos se detallan en la sección de anexos, se lo puede observar como “anexo 3”, estos han sido evaluados por grupos de estudio mencionados anteriormente como: Geología, Petrofísica y Comportamiento de fluidos.

Una vez se tenga en claro de donde se obtuvo la información luego de haber pasado por el filtro de la metodología PRISMA, se procede a desarrollar los resultados encontrados en cada estudio.

3.6 Análisis de métodos y tecnologías de la caracterización estática en yacimientos de petróleo

Según lo analizado en las fuentes de datos presentadas con anterioridad, se ha podido observar que la caracterización estática de yacimientos de petróleo se encuentra segmentada en tres secciones. Estas son: a) la inicialización del modelo en la cual se obtiene los datos necesarios relacionados con sísmica para formar el modelo estructural del yacimiento (mallado), b) se suele observar una tendencia a tomar valores petrofísicos de análisis de núcleos y registros de pozos, c) finalmente se tiende a hacer uso de un modelo matemático para interpolar los valores petrofísicos como porosidad y permeabilidad a lo largo de toda la malla.

Se han realizado diagramas para mostrar la frecuencia con la que se utilizaron cada una de las tecnologías que serán descritas en este trabajo, como se puede ver en la figura 3.8, la mayoría de las tecnologías se centra en el análisis de registros de pozos, siendo el Gamma Ray el mayormente utilizado, seguido por el de densidad y neutrón.

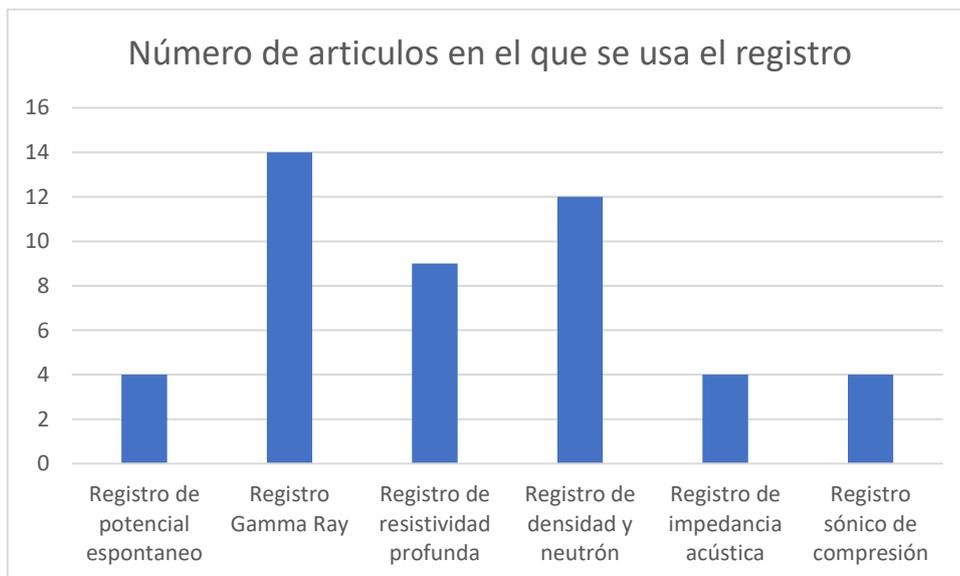


Figura 3.8 Número de artículos en el cual se usó el registro en cuestión para yacimientos sin secuestro de CO₂

Así mismo se tiene el uso de otras metodologías y tecnologías que ayudan a caracterizar estáticamente un yacimiento los cuales son presentados a continuación en la figura 3.93, la cual describe el número de veces que se utilizó esta tecnología entre los 21 documentos analizados.

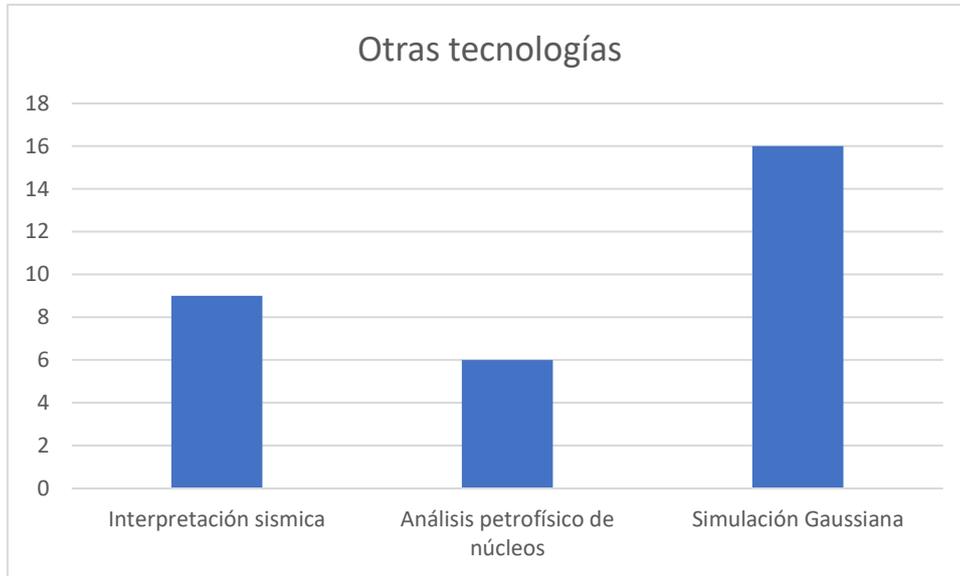


Figura 3.9 Número de veces en la que se usó tecnologías de sísmica, análisis de núcleos y simulación en yacimientos sin secuestro de CO₂

Dentro de las metodologías para formar la estructura de yacimiento se tiene la interpretación sísmica la cual según el artículo publicado por (Abdel-Fattah et al., 2018), se la utiliza para la construcción del modelo estructural mediante la interconexión de la reflexión sísmica con la estratigrafía del reservorio, dicho proceso se lo conoce como estratigrafía sísmica, el cual es un proceso usado para comprender la interrelación que existe entre la tectónica y los procesos sedimentarios en la distribución de los posibles yacimientos de hidrocarburos (Samakinde et al., 2020).

Posteriormente se procura obtener los valores de porosidad y permeabilidad lo cual se lo logra con análisis petrofísico de núcleos en laboratorio y la interpretación de los registros de pozo. Según (Ali et al., 2022) estas 2 tecnologías ayudan a caracterizar petrofísicamente el yacimiento.

Los registros de pozos son una parte muy importante del modelamiento del yacimiento ya que ayudan no solo con la caracterización petrofísica sino también a definir zonas de fluidos y estructura de las facies. Entre los registros que más

destacan se encuentra el de Gamma Ray que según un artículo publicado por (Bate et al., 2023) revela la propagación de varios estratos en distintas etapas geológicas y valores como índice de gamma ray que ayudan a distinguir las facies del reservorio. Dentro del estudio se encontraron 14 de 21 artículos relacionados a caracterización estática en yacimientos de petróleo.

Otros registros muy utilizados son los de densidad, neutrón, y resistividad profunda los cuales según (Soleimani et al., 2017) ayudan a definir las zonas petrolíferas del reservorio y distinguirla de las zonas de agua. En los artículos analizados se notó el uso extensivo de estos registros. El registro de densidad neutrón se utilizó 12 veces y 9 el de resistividad.

El registro de potencial espontaneo según (Adelu et al., 2019) es una herramienta utilizada para obtener valores como el Vsh que será luego usado para el cálculo de la porosidad. Además, se tiene los registros sínicos de compresión e impedancia acústica los cuales tienen la función de ayudar a distinguir las facies del yacimiento.

Según (Liu et al., 2015) una vez obtenido los valores para ciertas celdas de permeabilidad y porosidad se utiliza un modelo de simulación Gaussiana con el fin de interpolar los valores de celdas donde no se tiene información de dichas propiedades petrofísicas y asignarles uno.

En pocas palabras, las herramientas que se han presentado ayudan a formar la caja de lo que será la representación del reservorio y los datos de registros y núcleos son los valores que permitirán llenar e interpolar los valores petrofísicos en todas las celdas del modelo.

3.7 Análisis de métodos y tecnologías de la caracterización estática en yacimientos de petróleo con secuestro de CO₂

La caracterización de yacimientos de petróleo con secuestro de CO₂ es muy similar a la de yacimientos convencionales, con la diferencia que el objetivo de esta caracterización es modelar la capacidad de almacenamiento geológica del reservorio o calcular el valor total de toneladas de CO₂ que se pueden almacenar en el reservorio.

En el análisis bibliográfico de los artículos obtenidos de WOS y Scopus se obtuvo que en este caso donde se secuestra CO₂, las tecnologías tienen cierta similitud con la aplicadas en los yacimientos que no retienen CO₂. Como se muestra en la figura 3.10, la inicialización se enfoca en la interpretación sísmica y finaliza con un modelo matemático que termine el llenado de la malla.

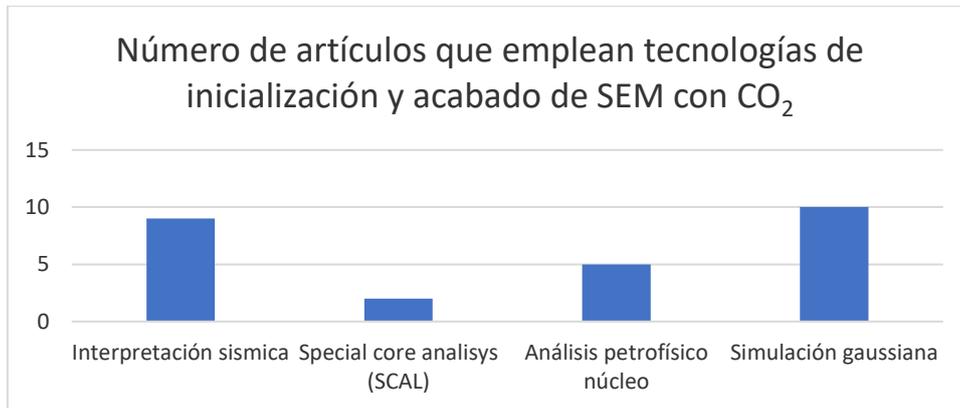


Figura 3.10 Número de artículos que emplean tecnologías para caracterización de yacimientos con secuestro de CO₂

Dentro de la caracterización estática en yacimientos con secuestro de CO₂ también se toma información de los registros de pozos, como se muestra en la figura 3.11, los registros de pozos utilizados en los artículos estudiados son varios pero cada uno cumple un rol que ayuda a modelar el yacimiento.

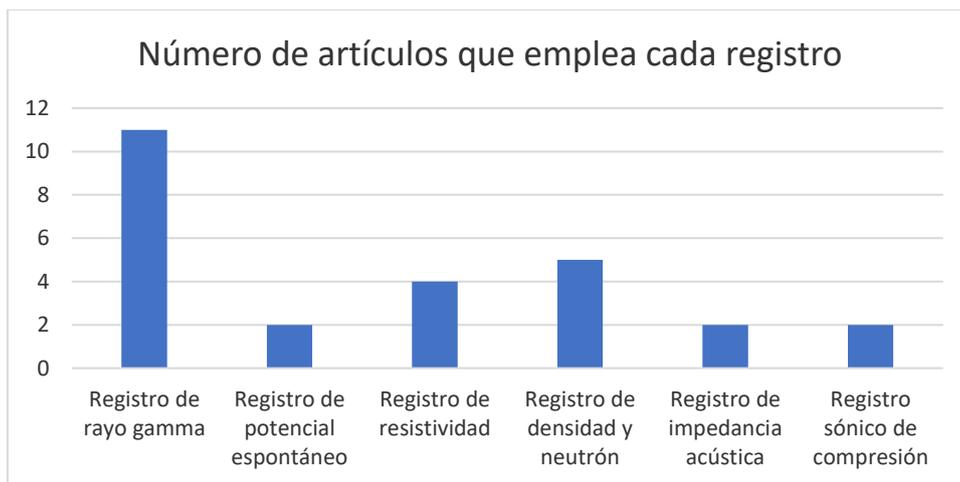


Figura 3.11 Número de artículos sobre SEM con CCUS en el que se empleó cada registro

En primer lugar, se tiene la interpretación sísmica la cual tiene el mismo objetivo que la descrita en el apartado anterior para los reservorios sin secuestro de CO₂. Sin embargo, se tiene también la necesidad de obtener datos petrofísicos del

yacimiento como la permeabilidad de los pozos, porosidad, saturaciones, volúmenes de arcilla, resistividad, entre otros; lo cual se lo obtiene según (Sharma et al., 2017) de los análisis de núcleos tanto especiales, como simples, de los cuales se puede obtener la geomecánica y permeabilidad relativa del reservorio.

Los registros tienen funciones similares a las presentadas anteriormente, se tienen a varios autores que utilizan estos registros como son (Alrassas et al., 2022), (Yahaya-Shiru et al., 2022), (Bunch et al., 2011), (Vo Thanh et al., 2019), (Zhong & Carr, 2019), estos autores hacen uso de los registros como gamma ray, potencial espontáneo, resistividad profunda, densidad y neutrón, impedancia acústica y sónico de comprensión para poder modelar las diferentes secciones de la caracterización estática como los modelos de permeabilidad, porosidad y saturación de fluidos.

La simulación gaussiana según (Yahaya-Shiru et al., 2022) es utilizada para capturar las incertidumbres de valores presentes en el espacio simulado, de los núcleos se obtendrán artefactos de uso cotidiano.

3.8 Métodos para utilizar en el flujo de trabajo

Considerando lo anteriormente expuesto según las referencias analizadas, se tienen que tanto para los yacimientos de petróleo con secuestro de CO₂ y los que no tienen secuestro de CO₂ se inicializa la caracterización con datos de sísmica y estructura del yacimiento, por ello se puede observar en artículos de autores como (Bate et al., 2023)(Soleimani et al., 2017) o (Adelu et al., 2019) en los cuales la etapa inicial de sus estudios comienza con interpretación sísmica y una caracterización estructural del yacimiento. Posteriormente se requiere información sustentable para los datos petrofísicos de cada celda, para lo cual, profesionales en el tema como (Sharma et al., 2017) y (Ali et al., 2022) proponen hacer uso del análisis petrofísico convencional y especial de núcleos tomados del reservorio y obtener con ello datos como la geomecánica y permeabilidades relativas del reservorio. Además, según las referencias consultadas en los yacimientos de petróleo tenemos 6 registros comúnmente utilizados, mientras que en yacimientos con CCUS tenemos que 6 registros son los más utilizados en estos procesos. Dentro de este grupo de registros hay coincidencias para ambos casos como son los anteriormente expuestos: Registro

de Rayo Gamma, Potencial espontaneo, Resistividad profunda, Densidad Neutrón, e Impedancia Acústica.

Dichos registros son los que se pueden colocar como las tecnologías más importantes dentro de la caracterización estática de yacimientos con secuestro de CO₂ ya que no solo se aplican en específico en su caso, sino que tiene aplicaciones expandidas al caso base. Estos registros presentan la información de partida para lograr obtener los modelos de permeabilidad y porosidad necesarios en el cálculo del almacenamiento geológico de CO₂.

Sin embargo, no se obtiene valores para todas las celdas, ya que se pueden encontrar celdas sin valores petrofísicos de los cuales no se encontró información de primera mano con los datos del yacimiento, por lo cual los autores (Yahaya-Shiru et al., 2022) y (Liu et al., 2015) proponen tomar a la interpolación Gaussiana como método óptimo para el llenado de los valores petrofísicos de las celdas.

Se decidió hacer uso de los modelos petrofísicos y no de los sedimentológicos debido a que en la literatura estudiada se tomó como parte fundamental de la predicción de capacidad de almacenamiento geológico de CO₂ a los modelos petrofísicos como el de porosidad y permeabilidad, es cierto que se menciona el modelo sedimentológico y se lo utiliza pero se puede hacer uso de la información inicial tomada de núcleos para obtener la misma información que se logra con dicho modelo, por lo cual se estaría optimizando tiempo en la construcción del modelo estático y cumpliendo el mismo objetivo final.

3.9 Flujo de trabajo

El siguiente flujo de trabajo se encuentra desarrollado en base a las referencias bibliográficas anteriormente expuestas, tomando la comparación entre tecnologías tanto para caracterización estática de yacimientos convencionales como con secuestro de CO₂. Se lo desarrolló a partir de 2 ejes de estudio, como ente principal la parte geológica y petrofísica, así como las tecnologías aplicadas en cada etapa de la formación del modelo (ver figura 3.12).

El flujo de trabajo parte de la fuente de datos necesarias para desarrollar el modelo estático del yacimiento con secuestro de CO₂, estos datos generalmente se los toma de registros de pozos, interpretación sísmica y análisis de núcleos; como se

mencionaba anteriormente combina la parte geológica con la petrofísica. Para obtener datos en la parte de registros de pozos se puede tomar la información proporcionada por los registros de Rayo Gamma, Potencial Espontáneo, Resistividad Profunda, Densidad-Neutrón e impedancia acústica; además de análisis de núcleos como el petrofísico y el especial.

La interpretación sísmica sirve para desarrollar el modelo estructural el cual es a caja del modelo simulado, y se complementa con los datos petrofísicos para obtener los modelos que son eje para el cálculo de almacenamiento geológico como son los de porosidad, permeabilidad, saturaciones y finalmente el de capacidad de almacenamiento. Dentro del flujo de trabajo se pasa los modelos por el proceso de simulación Gaussiana para obtener un llenado homogéneo de los valores al obtener un interpolado de las celdas vacías.

Así finalmente se tiene el modelo estático para yacimientos con secuestro de CO₂ el cual permite que se obtenga de manera certera y confiable la capacidad de almacenamiento de CO₂ en todo el yacimiento.

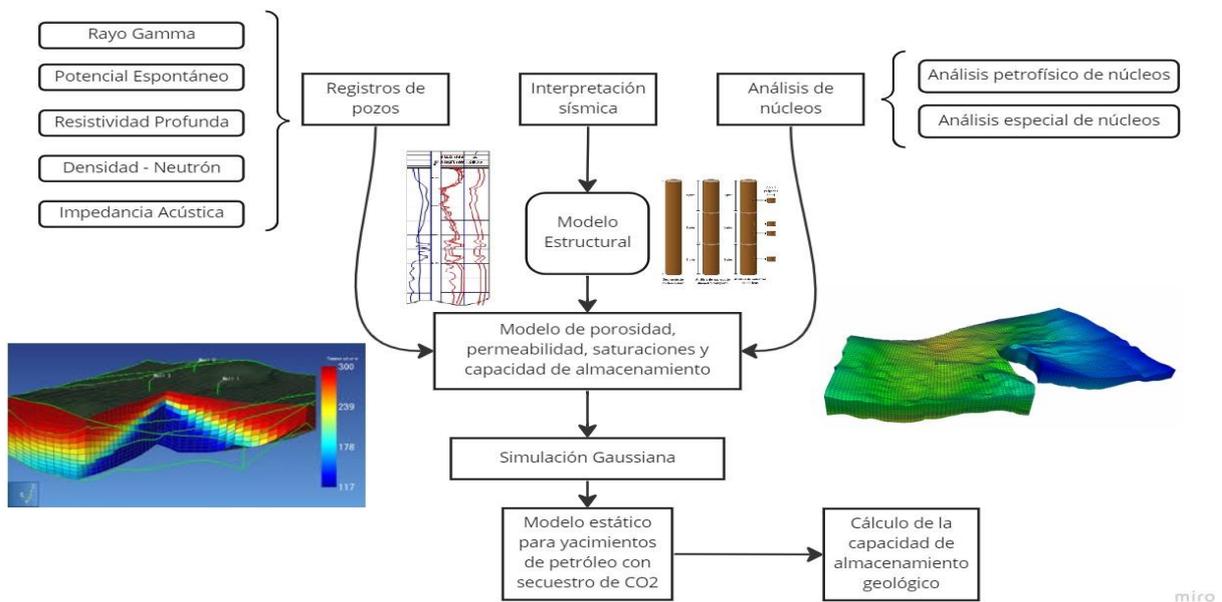


Figura 3.12 Flujo de trabajo para Caracterización estática de yacimientos con secuestro de CO₂

CAPÍTULO IV

4.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el siguiente apartado se detallarán las conclusiones de este trabajo las cuales parten del análisis de los resultados que lleva a determinar el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio de este proyecto, así como las recomendaciones para futuros enfoques que pueda tener el proyecto.

4.1 Conclusiones

1. La aplicación de una metodología de revisión bibliográfica que nos permita obtener información de forma sistemática fue indispensable para la identificación de métodos y tecnologías en la caracterización de yacimientos, por tanto, se utilizó la metodología PRISMA.

2. Se obtuvieron los métodos y tecnologías necesarios para caracterizar estáticamente un yacimiento de petróleo convencional, y con secuestro de CO₂, los cuales fueron interpretación sísmica, registros de pozos y análisis de núcleos.

3. Se determinó un flujo de trabajo que detalla las características más importantes e idóneas para desarrollar un modelamiento estático de yacimientos con secuestro de CO₂, mediante la comparación de métodos y tecnologías para yacimientos de petróleo convencionales y con secuestro de CO₂ estudiados en los 35 artículos tomados como base de datos.

4. El eje principal para el modelamiento de yacimientos petroleros con secuestro de CO₂, son los modelos petrofísicos como el de porosidad, permeabilidad, saturaciones y conjunto a ellos el de capacidad de almacenamiento ya que se complementan uno con otro.

4.2 Recomendaciones

1. Se recomienda tomar como fuente de datos buscadores confiables y verificados por la comunidad científica, así se asegura que el contenido sea real y de gran aporte al tema estudiado.

2. Se debe presentar nuevas propuestas de flujo de trabajo correspondientes a otras formas de almacenamiento de CO₂ como es el caso de los acuíferos salinos, así se logra reducir la dificultad de la apertura a nuevos proyectos e impulse el desarrollo de estos.

3. Se puede partir de este flujo de trabajo que se enfoca en el modelamiento estático para desarrollar el modelo dinámico en el cual se pueda observar el avance de la pluma de CO₂ en el yacimiento.

4. Podría probarse el flujo de trabajo en un caso de aplicación real desarrollado para un yacimiento específico, ya que por cuestiones de tiempo no se lo desarrolló en este trabajo, pero podría servir como punto de partida para otras investigaciones.

Bibliografía

- Abdel-Fattah, M. I., Metwalli, F. I., & Mesilhi, E. S. I. (2018). Static reservoir modeling of the Bahariya reservoirs for the oilfields development in South Umbarka area, Western Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 138, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.11.002>
- Abdelmaksoud, A., Ewida, H. F., El-Habaak, G. H., & Amin, A. T. (2019). 3D structural modeling of the Upper Bahariya Member in Abu Gharadig oil and gas field, North Western Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 150(September 2017), 685–700. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.09.022>
- Adelu, A. O., Aderemi, A. A., Akanji, A. O., Sanuade, O. A., Kaka, S. L. I., Afolabi, O., Olugbemiga, S., & Oke, R. (2019). Application of 3D static modeling for optimal

- reservoir characterization. *Journal of African Earth Sciences*, 152(February), 184–196. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.02.014>
- AgileThought. (2021). *Análisis de datos simplificado: introducción a Power BI*. 2021. <https://agilethought.com/blogs/getting-started-with-power-bi/>
- Alcorn, Z. P., Fredriksen, S. B., Sharma, M., Rognmo, A. U., Føyen, T. L., Fernø, M. A., & Graue, A. (2019). An integrated carbon-dioxide-foam enhanced-oil-recovery pilot program with combined carbon capture, utilization, and storage in an Onshore Texas heterogeneous carbonate field. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 22(4), 1449–1466. <https://doi.org/10.2118/190204-PA>
- Ali, A. M., Radwan, A. E., Abd El-Gawad, E. A., & Abdel-Latif, A. S. A. (2022). 3D Integrated Structural, Facies and Petrophysical Static Modeling Approach for Complex Sandstone Reservoirs: A Case Study from the Coniacian–Santonian Matulla Formation, July Oilfield, Gulf of Suez, Egypt. *Natural Resources Research*, 31(1), 385–413. <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09980-9>
- Alrassas, A. M., Vo Thanh, H., Ren, S., Sun, R., Al-Areeq, N. M., Kolawole, O., & Hakimi, M. H. (2022). CO₂ Sequestration and Enhanced Oil Recovery via the Water Alternating Gas Scheme in a Mixed Transgressive Sandstone-Carbonate Reservoir: Case Study of a Large Middle East Oilfield. *Energy and Fuels*, 36(17), 10299–10314. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c02185>
- Barclay, F., Rasmussen, K. B., Cooke, A., Cooke, D., Salter, D., Lowden, D., Pickering, S., Rasmussen, A., & Roberts, R. (2008). Inversión sísmica : Lectura entre líneas. *Oilfield Review*, Verano, 44–66.
- Bate, B. B., Boboye, O. A., Fozao, K. F., Ndip, E. A., & Anene, N. O. (2023). Petrophysical characterization and 3D seismic interpretation of reservoirs in the Baris Field, onshore Niger Delta Basin, Nigeria. *Energy Geoscience*, 4(1), 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2022.02.001>
- Benjamin, N. I., & Lin, B. (2020). Quantile analysis of carbon emissions in China metallurgy industry. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118534. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118534>
- BID - Banco Interamericano de Desarrollo. (2020). El empleo en un futuro de cero

- emisiones netas en América Latina y el Caribe. In *Banco Interamericano de Desarrollo*.
- Bunch, M. A., Backé, G., & Kaldi, J. (2011). Geological appraisal of an onshore CO₂ storage prospect. *Energy Procedia*, 4, 4625–4632. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.422>
- García, B. (2012). *Conceptos Básicos de Caracterización dinámica de yacimientos* (p. 157). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Holmslykke, H. D., Olivarius, M., & Dideriksen, K. (2020). *Capture , Storage and Use of CO 2 (CCUS) Capture , Storage and Use of CO 2 (CCUS)*. 2.
- Hull, H. L. (2021). *Characterizing Reservoir Quality for Geologic Storage of CO 2 — A Case Study from the Lower Miocene Shore Zone at Matagorda Bay , Texas APPROVED BY SUPERVISING COMMITTEE :*
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). *Outlook for the global energy transition*.
- Liu, L., Zhang, J., Wang, J., Li, C., Yu, J., Zhang, G., Fan, Z., Wei, G., Sun, Z., Xue, H., Yu, T., & Wang, G. (2015). Geostatistical modeling for fine reservoir description of Wei2 block of Weicheng oilfield, Dongpu depression, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(11), 9101–9115. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1924-2>
- Luz, M., Letelier, S., Manríquez, J., & Rada, G. (2005). MEDICINA BASADA EN EVIDENCIA Revisiones sistemáticas y metaanálisis: ¿son la mejor evidencia? *Rev Méd Chile*, 133, 246–249. <http://www.scielo.cl/pdf/rmc/v133n2/art15.pdf>
- Mart, Q. (2021). *Transición Energética : Hacia una mayor cooperación en integración energética regional en América Latina y el Caribe*.
- Moreno, B., Muñoz, M., Cuellar, J., Domancic, S., & Villanueva, J. (2018). Revisiones Sistemáticas: definición y nociones básicas. *Revista Clínica de Periodoncia, Implantología y Rehabilitación Oral*, 11(3), 184–186. <https://doi.org/10.4067/s0719-01072018000300184>
- Orr, F. M. (2018). Carbon capture, utilization, and storage: An update. *SPE Journal*, 23(6), 2444–2455. <https://doi.org/10.2118/194190-PA>

- Othman, A. A. A., Fathy, M., Othman, M., & Khalil, M. (2021). 3D static modeling of the Nubia Sandstone reservoir, gamma offshore field, southwestern part of the Gulf of Suez, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 177(February), 104160.
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104160>
- Pérez-Martínez, E., Velázquez-Bueno, L. N., & Santiago-Reyes, H. (2016). Caracterización dinámica de yacimientos naturalmente fracturados, caso Ku-Cretácico. *Ingeniería Petrolera*, 56(12), 622–641.
- Porras Velázquez, A. (2017). Método Kriging de inferencia espacial. *Repositorio Nacional CONACYT*, 7.
[https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/160/1/16-Método Kriging de Inferencia espacial - Diplomado en Análisis de Información Geoespacial.pdf](https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/160/1/16-Método%20Kriging%20de%20Inferencia%20espacial%20-%20Diplomado%20en%20Análisis%20de%20Información%20Geoespacial.pdf)
- Ramlal, A., Ahmad, S., Kumar, L., Khan, F. N., & Chongtham, R. (2021). From molecules to patients: the clinical applications of biological databases and electronic health records. In *Translational Bioinformatics in Healthcare and Medicine*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-89824-9.00009-4>
- Report, S., & Utilisation, C. C. (2020). *Energy Technology Perspectives Energy Technology Perspectives*.
- Samakinde, C. A., Van Bever Donker, J. M., Durrheim, R., & Manzi, M. (2020). Application of seismic stratigraphy in reservoir characterisation: a case study of the passive margin deposits of the northern Orange Basin, South Africa. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11(1), 45–61.
<https://doi.org/10.1007/s13202-020-01050-9>
- SENER. (2018). *Captura , Uso y almacenamiento de CO2*.
<https://dgel.energia.gob.mx/CCUS/>
- Sharma, S., Van Gent, D., Burke, M., & Stelfox, L. (2017). The Australian South West Hub Project: Developing a Storage Project in Unconventional Geology. *Energy Procedia*, 114(November 2016), 4524–4536.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1569>
- Soleimani, M., Jodeiri Shokri, B., & Rafiei, M. (2017). Integrated Petrophysical Modeling

for a Strongly Heterogeneous and Fractured Reservoir, Sarvak Formation, SW Iran. *Natural Resources Research*, 26(1), 75–88. <https://doi.org/10.1007/s11053-016-9300-9>

Turan, G., Zapantis, A., Kearns, D., Tamme, E., Staib, C., Zhang, T., Burrows, J., Gillespie, A., Havercroft, I., Rassool, D., Consoli, C., & Liu, H. (2021). Global status of CCS 2021. *Global CCS Institute*, 1–43. https://www.japanccs.com/wp/wp-content/uploads/2021/10/0-4-GCCSI_Jarad-Daniels.pdf

Vo Thanh, H., Sugai, Y., Nguete, R., & Sasaki, K. (2019). Integrated workflow in 3D geological model construction for evaluation of CO₂ storage capacity of a fractured basement reservoir in Cuu Long Basin, Vietnam. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 90(September), 102826. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102826>

Yahaya-Shiru, M., Igwe, O., & Obafemi, S. (2022). 3D structural and stratigraphic characterization of X field Niger Delta: implications for CO₂ sequestration. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12(4), 959–977. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01348-2>

Yepes-Nuñez, J. J., Urrútia, G., Romero-García, M., & Alonso-Fernández, S. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *Revista Espanola de Cardiologia*, 74(9), 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>

Zhong, Z., & Carr, T. R. (2019). Geostatistical 3D geological model construction to estimate the capacity of commercial scale injection and storage of CO₂ in Jacksonburg-Stringtown oil field, West Virginia, USA. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 80(December 2018), 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.10.011>

Baker, R. (2004). *Oil and Natural Gas: Offshore Operations*. Encyclopedia of Energy.

Beñoga. (2018). Revisiones Sistemáticas: definición y nociones básicas. *Periodoncia Implantol*, 3.

Blanco, P. (2020). Retrieved from EL ARTÍCULO CIENTÍFICO: PUNTUALIZACIONES ACERCA DE SU ESTRUCTURA Y REDACCIÓN: https://www.ub.edu/doctorat_eapa/wp-content/uploads/2012/12/El-art%C3%ADculo-cient%C3%ADfico_aspectos-a-tener-en-cuenta.pdf

Civan, F. (2007). *Reservoir Formation Damage*. Gulf Professional Publishing.

Elsevier. (2020). *Scopus: Base de datos de resúmenes y citas seleccionada por expertos*. Retrieved from <https://www.elsevier.com/solutions/scopus>

Falcon, R. (2018). *Importancia de los Modelos Sedimentológico y Estratigráfico en la Reevaluación de Campos Maduros*. Retrieved from <https://bauerbergklein.com/es/technical-articles/importancia-de-los-modelos-sedimentologico-y-estratigrafico-en-la-reevaluacion-de-campos-maduros/#:~:text=El%20Modelo%20Estratigr%C3%A1fico%20permitir%C3%A1%20determinar,o%20almacenamiento%20de%20los%20mis>

García, J. (2020). Retrieved from El almacenamiento geológico de CO2 como solución viable para un futuro sostenible y su aplicación en la cuenca del Ebro: <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2020/CT%202020/5413.pdf>

International Energy Agency. (2020). Retrieved from Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage. CCUS in clean energy transitions: https://iea.blob.core.windows.net/assets/181b48b4-323f-454d-96fb-0bb1889d96a9/CCUS_in_clean_energy_transitions.pdf

Lejeune, H. (2021). *Characterizing Reservoir Quality for Geologic Storage of CO2*.

León, G., & Benavides, H. (2007). *INFORMACIÓN TÉCNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y CAMBIO CLIMÁTICO*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Microsoft. (2022). Retrieved from ¿Qué es Power BI?: <https://powerbi.microsoft.com/es-es/what-is-power-bi/>

Naciones Unidas. (2020). *Acción por el Clima*. Retrieved from Acuerdo de París: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>

National Geographic. (2017). *NATIONAL GEOGRAPHIC*. Retrieved from ¿Qué es el calentamiento global?: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-es-el-calentamiento-global>

Repsol. (2020). *Transición energética*. Retrieved from Reduce emisiones y conviértelas en energía: <https://www.repsol.com/es/energia-innovacion/energia-futuro/transicion-energetica/que-es-la-transicion-energetica/index.cshtml#:~:text=La%20transici%C3%B3n%20energ%C3%A9tica%20es%20el,clim%C3%A1tico%20es%20el%20efecto%20invernadero>.

Selley, R. C., & Sonnenberg, S. (2015). Elements of Petroleum Geology (Third Edition). *Academic Press*, 255-320.

UNICEF. (2020). Retrieved from TECHNOLOGY BRIEF CARBON CAPTURE, USE AND STORAGE (CCUS): https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure_EN_final.pdf

Anexos

Anexo 1: Tabla de nombres de artículos que presentan caracterización estática con secuestro de CO₂

Tabla 3 Nombres de artículos que presentan caracterización estática con secuestro de CO₂

Número del documento en el gráfico	Nombre del artículo
1	"CO ₂ Sequestration and Enhanced Oil Recovery via the Water Alternating Gas Scheme in a Mixed Transgressive Sandstone-Carbonate Reservoir: Case Study of a Large Middle East Oilfield"
2	"Integrated static modeling and dynamic simulation framework for CO ₂ storage capacity in Upper Qishn Clastics, S1A reservoir, Yemen"

3	"The Australian South West Hub Project: Developing a Storage Project in Unconventional Geology"
4	"Geological appraisal of an onshore CO2 storage prospect"
5	"Integrated workflow in 3D geological model construction for evaluation of CO2 storage capacity of a fractured basement reservoir in Cuu Long Basin, Vietnam"
6	"Geostatistical 3D geological model construction to estimate the capacity of commercial scale injection and storage of CO2 in Jacksonburg-Stringtown oil field, West Virginia, USA"
7	"Co-optimization of CO2-EOR and Storage Processes under Geological Uncertainty"

Anexo 2: Artículos usados para caracterización de yacimientos de petróleo sin secuestro de CO₂

Tabla 4. Artículos usados para caracterización de yacimientos de petróleo sin secuestro de CO₂

Nombre del artículo	Grupo
"Iterative static modeling of channelized reservoirs using history-matched facies probability data and rejection of training image"	Geología
"Integrated reservoir and basin modeling in understanding the petroleum system and evaluating prospects: The Cenomanian reservoir, Bahariya Formation, at Falak Field, Shushan Basin, Western Desert, Egypt"	Geología
"3D structural modeling of the Upper Bahariya Member in Abu Gharadig oil and gas field, North Western Desert, Egypt"	Geología
"Structural and facies modeling of the Lower Cretaceous Alam El Bueib reservoirs in the Shushan Basin, Western Desert, Egypt"	Geología
"3D Seismic Structural Analysis and Basin Modeling of the Matruh Basin, Western Desert, Egypt"	Geología
"Layering and reservoir modeling of Silurian uppermost Tannezuft and Acacus reservoirs in the Tunisian Ghadames Basin: Inferred static model and prolific layers"	Geología
"Lithofacies modeling by multipoint statistics and economic evaluation by NPV volume for the early Cretaceous Wabiskaw Member in Athabasca oilsands area, Canada"	Geología
"3D Modeling of Fracture-Cave Reservoir from a Strike-Slip Fault-Controlled Carbonate Oilfield in Northwestern China"	Geología

“Static Reservoir Modeling of the Eocene Clastic Reservoirs in the Q-Field, Niger Delta, Nigeria”	Geología
“Integrated Petrophysical Modeling for a Strongly Heterogeneous and Fractured Reservoir, Sarvak Formation, SW Iran”	Petrofísica y Geología
“3-D reservoir characterization and hydrocarbon volumetric estimation of parts of Niger Delta Basin-Nigeria”	Petrofísica y Geología
“3D Static Modeling and Petrographic Aspects of the Albian/Cenomanian Reservoir, Komombo Basin, Upper Egypt”	Petrofísica y Geología
“3D Integrated Structural, Facies and Petrophysical Static Modeling Approach for Complex Sandstone Reservoirs: A Case Study from the Coniacian–Santonian Matulla Formation, July Oilfield, Gulf of Suez, Egypt”	Petrofísica y Geología
“3D geocellular modeling for reservoir characterization of lacustrine turbidite reservoirs: Submember 3 of the third member of the Eocene Shahejie Formation, Dongying depression, Eastern China”	Petrofísica y Geología
“Subsurface Structural Setting and Hydrocarbon Potentiality of the Komombo and Nuqra Basins, South Egypt: A Seismic and Petrophysical Integrated Study”	Petrofísica y Geología
Geostatistical modeling for fine reservoir description of Wei2 block of Weicheng oilfield, Dongpu depression, China	Petrofísica y Geología
“Static reservoir modeling of the Bahariya reservoirs for the oilfields development in South Umbarka area, Western Desert, Egypt”	Petrofísica y Geología
“Petrophysical characterization and 3D seismic interpretation of reservoirs in the Baris Field, onshore Niger Delta Basin, Nigeria”	Petrofísica y Geología
“Application of 3D static modeling for optimal reservoir characterization”	Petrofísica y Geología
“Integrated petrophysical and petrographical studies for characterization of reservoirs: a case study of Muglad Basin, North Sudan”	Comportamiento de fluidos
“Study of hydraulic flow units using static modeling in upper Surmeh Formation (Arab) in one oil field in south of Iran”	Comportamiento de fluidos

Anexo 3: Artículos de caracterización de yacimientos con secuestro de CO₂

Nombre del artículo	Grupo
---------------------	-------

“Structural and Parametric Models of the Zalecze and Zuchlow Gas Field Region, Fore-Sudetic Monocline, Poland - An Example of a General Static Modeling Workflow in Mature Petroleum Areas for CCS, EGR or EOR Purposes”	Geología
“Geomechanical modelling of CO2 geological storage with the use of site specific rock mechanics laboratory data”	Geología
“CO2 Sequestration and Enhanced Oil Recovery via the Water Alternating Gas Scheme in a Mixed Transgressive Sandstone-Carbonate Reservoir: Case Study of a Large Middle East Oilfield”	Geología
“3D structural and stratigraphic characterization of X field Niger Delta: implications for CO2 sequestration”	Geología
“The Australian South West Hub Project: Developing a Storage Project in Unconventional Geology”	Geología
“Geological appraisal of an onshore CO2 storage prospect”	Geología
“Co-optimization of CO2-EOR and Storage Processes under Geological Uncertainty”	Geología
“Selection and Characterization of Geological Sites able to Host a Pilot-Scale CO2 Storage in the Paris Basin (GeoCarbone-PICOREF)”	Geología y petrofísica
“3D implicit modeling applied to the evaluation of CO2 geological storage in the shales of the Irati Formation, Parana Basin, Southeastern Brazil”	Geología y petrofísica
“A rock physics and seismic reservoir characterization study of the Rock Springs Uplift, a carbon dioxide sequestration site in Southwestern Wyoming”	Geología y petrofísica
“CO2 geological sequestration in heterogeneous binary media: Effects of geological and operational conditions”	Geología y petrofísica
“Integrated workflow in 3D geological model construction for evaluation of CO2 storage capacity of a fractured basement reservoir in Cuu Long Basin, Vietnam”	Geología y petrofísica
“Geostatistical 3D geological model construction to estimate the capacity of commercial scale injection and storage of CO2 in Jacksonburg-Stringtown oil field, West Virginia, USA”	Geología y petrofísica
“Integrated static modeling and dynamic simulation framework for CO2 storage capacity in Upper Qishn Clastics, S1A reservoir, Yemen”	Comportamiento de fluidos