

Revisión del estado del conocimiento sobre el uso de catalizadores liposolubles en el recobro mejorado de crudos pesados y su influencia en la corrosión de aceros usados en la industria del gas y petróleo

Dubán Gabriel Suárez Patiño

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Dario Yesid Peña Ballesteros

PhD en Corrosión

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los materiales

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Agradezco a Dios por acompañarme en cada etapa de este proceso y por permitir que todo se desarrollara según sus planes. A la mujer más importante de mi vida, quien me dio el privilegio de ser su hijo, le debo cada uno de mis logros, ya que su amor incondicional ha sido el motor que me impulsa. Te agradezco inmensamente por ser tanto mamá como papá. A Ricardo Castillo, por estar siempre a mi lado, motivándome a alcanzar mis metas en los momentos más difíciles y por sembrar en mí la semilla de la ambición profesional. También quiero expresar mi gratitud a todos mis amigos, quienes compartieron conmigo las aulas y se convirtieron en una parte fundamental de mi vida.

“Dubán Suárez Patiño”

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que formaron parte de mi proceso educativo, en especial a los docentes que, con dedicación y cariño, compartieron su sabiduría, particularmente aquellos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Agradezco de manera especial a Darío Yesid Peña Ballesteros por su apoyo, disposición y sobre todo paciencia, que fueron cruciales para la finalización de este proyecto. También quiero reconocer a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales por su valiosa contribución a mi formación académica.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco teórico y Estado del arte	14
2.1 Crudos pesados y extrapesados.....	14
2.2 Tecnologías de recobro mejorado.....	14
2.3 Catalizadores liposolubles	15
2.4 Corrosión en ambientes de extracción	17
2.5 Inhibidores de corrosión	18
2.6 Estado del arte.....	18
3. Metodología	19
3.1 Introducción a la metodología	19
3.2 Criterios de selección de fuentes.....	20
3.3 Búsqueda y recolección de información	21
3.4 Análisis y síntesis de selección.....	22
3.5 Estrategias de evaluación crítica.....	22
3.6 Método de organización de la revisión	23
4. Resultados y discusión	24
4.1 Aplicación de catalizadores en el proceso de inyección de vapor	24

4.1.1 Naftenato de hierro	28
4.1.2 Naftenato de níquel	29
4.1.3 Naftenato de molibdeno.....	30
4.2 Influencia del catalizador en la viscosidad del crudo	32
4.3 Cambios en las propiedades químicas	39
4.4 Alteraciones que promueven la corrosión.....	41
4.5 Efecto del naftenato de hierro sobre la corrosión del acero al carbono API-P110	42
4.6 Principales brechas del conocimiento identificadas	47
5. Conclusiones.....	48
6. Recomendaciones	50
Referencias Bibliográficas	51

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Porcentajes de las fracciones obtenidas de las muestras de crudo (Sánchez y Suárez., 2023).	34
Tabla 2. Asignaciones estructurales en el espectro ¹ H RMN (Poveda & Molina, 2012).	40
Tabla 3. Asignaciones estructurares en el espectro ¹ H RMN de las pruebas (Sánchez y Suárez., 2023).	41

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Inyección de vapor y combustión in situ.....	15
Figura 2. Representación de las reacciones catódicas y anódicas durante el proceso de corrosión en el acero al carbono bajo un ambiente de dióxido de carbono y vapor de agua.	17
Figura 3. Comportamiento de la viscosidad en función de diferentes temperaturas de medición.	25
Figura 4. Bases metálicas empleadas en pruebas de acuatermolisis reportadas en literatura.	28
Figura 5. Análisis del fraccionamiento SARA.	33
Figura 6. Peso molecular de resina antes y después de la reacción de acuatermolisis.	35
Figura 7. Peso molecular de asfalteno antes y después de la reacción de acuatermolisis.	36
Figura 8. Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura.....	37
Figura 9. Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura.....	37
Figura 10. Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura.....	38
Figura 11. Valores de viscosidad obtenida de un crudo 11.8° API a 45°C	39
Figura 12. Espectro del crudo base y prueba con mayor reducción obtenida en los diseños experimentales	40
Figura 13. Análisis de la velocidad de corrosión en diferentes intervalos de tiempo (5, 33, 66 y 120 horas) en función de la fase de contacto (líquida y gaseosa) utilizando el proceso de inyección de vapor convencional con nafta y con la adición de un catalizador.	43
Figura 14. Velocidad de corrosión en función del tiempo (120 h) para el acero API-P110.....	44

Resumen

Título: Revisión del estado del conocimiento sobre el uso de catalizadores liposolubles en el recobro mejorado de crudos pesados y su influencia en la corrosión de aceros usados en la industria del gas y petróleo*

Autor: Dubán Gabriel Suárez Patiño **

Palabras Clave: Catalizadores liposolubles, corrosión, recobro mejorado, eficiencia.

Descripción

La presente tesis se centra en la revisión exhaustiva del uso de catalizadores liposolubles en el recobro mejorado de crudos pesados, con un enfoque particular en su influencia sobre la corrosión en los aceros ampliamente utilizados en la industria petrolera. A medida que la demanda de petróleo de alta viscosidad aumenta, la implementación de tecnologías que optimicen la extracción se vuelve crucial. Los catalizadores liposolubles han emergido como una técnica prometedora, ya que facilitan la descomposición de compuestos de alto peso molecular, mejorando la fluidez del crudo y reduciendo la energía requerida para su extracción.

Sin embargo, su uso plantea preocupaciones significativas en relación con la corrosión de materiales metálicos, especialmente bajo condiciones de alta temperatura y presión. Esta investigación abordará los mecanismos de interacción entre los catalizadores liposolubles y los aceros al carbono, analizando cómo los subproductos generados pueden llegar a mitigar o acelerar los procesos corrosivos.

La tesis incluirá una revisión crítica de la literatura científica y técnica, identificando tendencias, brechas en el conocimiento y recomendaciones para futuras investigaciones. El objetivo final es proporcionar una visión integral que contribuya al avance del conocimiento en esta área y ofrezca pautas prácticas para la optimización de procesos industriales, promoviendo un uso más seguro y eficiente de los catalizadores liposolubles en la recuperación de crudos pesados.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Dario Yesid Peña Ballesteros. PhD en Corrosión.

Abstract

Title: Review of the state of knowledge on the use of liposoluble catalysts in the enhanced recovery of heavy crudes and their influence on the corrosion of steels used in the gas and oil industry *

Author(s): Dubán Gabriel Suárez Patiño**

Key Words: Liposoluble catalysts, corrosion, enhanced recovery, efficiency.

Description

This thesis focuses on a comprehensive review of the use of liposoluble catalysts in the enhanced recovery of heavy crudes, with a particular emphasis on their influence on corrosion in the steels widely used in the oil industry. As the demand for high-viscosity oil increases, the implementation of technologies that optimize extraction becomes crucial. Liposoluble catalysts have emerged as a promising technique, as they facilitate the breakdown of high molecular weight compounds, improving the flow of crude oil and reducing the energy required for its extraction.

However, their use raises significant concerns regarding the corrosion of metallic materials, especially under high temperature and pressure conditions. This research will address the interaction mechanisms between liposoluble catalysts and carbon steels, analyzing how the generated byproducts may mitigate or accelerate corrosive processes. The thesis will include a critical review of the scientific and technical literature, identifying trends, knowledge gaps, and recommendations for future research. The ultimate goal is to provide a comprehensive insight that contributes to the advancement of knowledge in this area and offers practical guidelines for optimizing industrial processes, promoting a safer and more efficient use of liposoluble catalysts in the recovery of heavy crudes.

* Degree Work

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Dario Yesid Peña Ballesteros. PhD en Corrosión

Introducción

La industria energética global se enfrenta a un reto sin precedentes en su búsqueda por satisfacer la creciente demanda de petróleo y derivados. A medida que las reservas de crudo liviano, tradicionalmente más fáciles de explotar, continúan disminuyendo, el sector ha redirigido sus esfuerzos hacia la explotación de crudos pesados y extrapesados, que actualmente representan alrededor del 70% de las reservas totales de petróleo del mundo (Y. Li et al., 2021; C. Li et al., 2019). Estos hidrocarburos, a pesar de ser abundantes, presentan desafíos significativos debido a su elevada viscosidad y densidad (entre 10° y 20° API), lo que impide su flujo natural bajo las condiciones de presión y temperatura prevalentes en los yacimientos convencionales (Shah et al., 2010a; Speight, 2019). Esta dificultad inherente se traduce en altos costos operativos y una mayor complejidad técnica para su extracción, poniendo en riesgo la viabilidad económica de los proyectos de producción (Hart, 2014; Pérez & Gómez, 2020).

En respuesta a estas limitaciones, se han desarrollado tecnologías de recobro mejorado que buscan aumentar la eficiencia en la recuperación de estos crudos. Dentro de estas, los métodos térmicos como la inyección de vapor, la acuatermolisis, y la combustión in situ se han consolidado como los más efectivos para reducir la viscosidad del crudo y, en consecuencia, mejorar su movilidad dentro del yacimiento (Alvarado & Manrique, 2010; Ramírez et al., 2020). Estudios recientes han demostrado que estos métodos pueden incrementar significativamente la tasa de recuperación al reducir las fuerzas capilares que retienen los hidrocarburos en las rocas porosas (Shah et al., 2010b; Gao et al., 2022). Sin embargo, el elevado consumo de energía y el potencial

impacto ambiental de estas tecnologías han llevado a los investigadores a explorar alternativas complementarias que optimicen el proceso.

Entre estas estrategias, el uso de catalizadores liposolubles ha cobrado relevancia como una técnica prometedora para aumentar la eficiencia de los métodos térmicos. Los catalizadores liposolubles actúan facilitando la descomposición de compuestos de alto peso molecular, mejorando así la fluidez del crudo y reduciendo la energía requerida para su extracción (González et al., 2021). La integración de estos catalizadores en procesos de recobro térmico ha demostrado beneficios en términos de costos y eficiencia, potenciando la recuperación en yacimientos maduros y complejos (Salas-Chía & Núñez, 2023).

A pesar de los avances en el uso de estos catalizadores, surge una preocupación crítica en torno a su impacto en la corrosión de materiales. Los aceros al carbono que son ampliamente utilizados en tuberías y equipos de perforación debido a sus propiedades mecánicas se ven afectados por la presencia de estos catalizadores bajo condiciones de alta temperatura y presión (Zhang et al., 2020). La exposición prolongada del acero a compuestos químicos agresivos puede acelerar procesos corrosivos, comprometiendo la integridad estructural de las instalaciones y aumentando los costos de mantenimiento y reemplazo (Ramírez et al., 2020). La corrosión no solo afecta la durabilidad de los equipos, sino que también puede llevar a fallos catastróficos, con graves implicaciones tanto económicas como de seguridad (Hart, 2014).

Estudios recientes han demostrado que los catalizadores liposolubles, al descomponerse en el ambiente reactivo del yacimiento, pueden generar subproductos corrosivos que interactúan de manera adversa con los aceros, acelerando el desgaste de las superficies metálicas (Salas-Chía & Núñez, 2023; Pérez & Gómez, 2020). La falta de datos empíricos que aborden de forma exhaustiva

esta problemática subraya la necesidad de realizar investigaciones adicionales que permitan comprender mejor los mecanismos de interacción de la corrosión en estos entornos.

El presente estudio tiene como objetivo abordar esta laguna en el conocimiento mediante una revisión de los efectos de los catalizadores liposolubles en la corrosión de los aceros al carbono en condiciones que simulan los entornos operativos de los yacimientos. Para lograr este objetivo, se analizarán y sintetizarán estudios previos que han empleado técnicas avanzadas de caracterización, tales como la microscopía electrónica de barrido (SEM), la espectroscopía de energía dispersiva (EDS) y el análisis de resistencia a la corrosión mediante ensayos potencioestáticos (Zhang et al., 2020; Gao et al., 2022).

Además, este estudio se enfocará en analizar la compatibilidad de diferentes formulaciones de catalizadores con diferentes aceros, a partir de la revisión de investigaciones que evalúan la efectividad de estos para mitigar los efectos adversos observados en estudios anteriores. El análisis de la literatura permitirá identificar pautas prácticas para la optimización de procesos industriales, con el objetivo de promover un uso más seguro y eficiente de los catalizadores liposolubles en la recuperación de crudos pesados, basándose en los hallazgos reportados por estudios previos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar una revisión del estado del conocimiento sobre el uso de los catalizadores liposolubles en el recobro mejorado de crudos pesados y su posible influencia en la corrosión de aceros usados en la industria del gas y petróleo.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar una revisión de la literatura científica y técnica relacionada con el uso de catalizadores liposolubles en procesos de recobro mejorado de crudos pesados.

Identificar las principales brechas en el conocimiento actual relacionadas con el uso de catalizadores y su impacto en la corrosión de los aceros al carbono, proporcionando recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en la industria petrolera.

2. Marco teórico y Estado del arte

2.1 Crudos pesados y extrapesados

Los crudos pesados y extrapesados, que representan alrededor del 70% de las reservas totales de petróleo, son hidrocarburos de alta densidad y viscosidad, con valores API generalmente entre 10° y 20° (Y. Li et al., 2021; Speight, 2019). Estas características dificultan su flujo natural bajo las condiciones de presión y temperatura típicas de los yacimientos, haciendo que su extracción sea técnica y económicamente desafiante (Shah et al., 2010a). Los métodos convencionales de recuperación primaria suelen ser insuficientes, lo que ha impulsado la implementación de tecnologías de recobro mejorado para maximizar su explotación (Alvarado & Manrique, 2010). Sin embargo, estas tecnologías conllevan desafíos ambientales y económicos que exigen enfoques más sostenibles y eficientes.

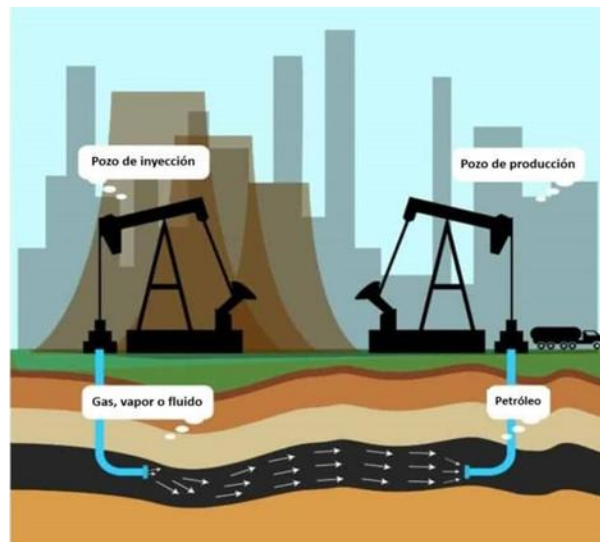
2.2 Tecnologías de recobro mejorado

El recobro mejorado abarca un conjunto de métodos que buscan aumentar la eficiencia de extracción de hidrocarburos atrapados en las formaciones rocosas. Entre las tecnologías más consolidadas se encuentran los métodos térmicos, como la inyección de vapor y la combustión in situ, que reducen la viscosidad del crudo mediante el aumento de la temperatura en el yacimiento (Ramírez et al., 2020; Gao et al., 2022). Estas técnicas han demostrado ser efectivas al reducir las fuerzas capilares que retienen los hidrocarburos, incrementando así la movilidad del crudo y la

tasa de recuperación (Shah et al., 2010b). No obstante, los altos costos energéticos y su impacto ambiental han llevado a la exploración de alternativas complementarias como el uso de catalizadores (González et al., 2021).

Figura 1.

Inyección de vapor y combustión in situ



Nota. Adaptado de Avances en métodos térmicos para la recuperación mejorada de petróleo (Ramírez et al., 2020).

2.3 Catalizadores liposolubles

Los catalizadores liposolubles han emergido como una solución prometedora para la mejora in situ del petróleo pesado, un recurso energético que presenta desafíos significativos debido a su alta viscosidad y baja calidad. En el artículo de Kapadia et al. (2015), se discute cómo estos catalizadores pueden facilitar la conversión de petróleo pesado en productos más ligeros y valiosos, al permitir reacciones químicas que reducen la viscosidad y mejoran las propiedades de

flujo del crudo. La investigación destaca la importancia de la selección adecuada de catalizadores, que deben ser solubles en la fase orgánica del petróleo para maximizar su efectividad en condiciones de alta temperatura y presión, características comunes en los reservorios de petróleo pesado.

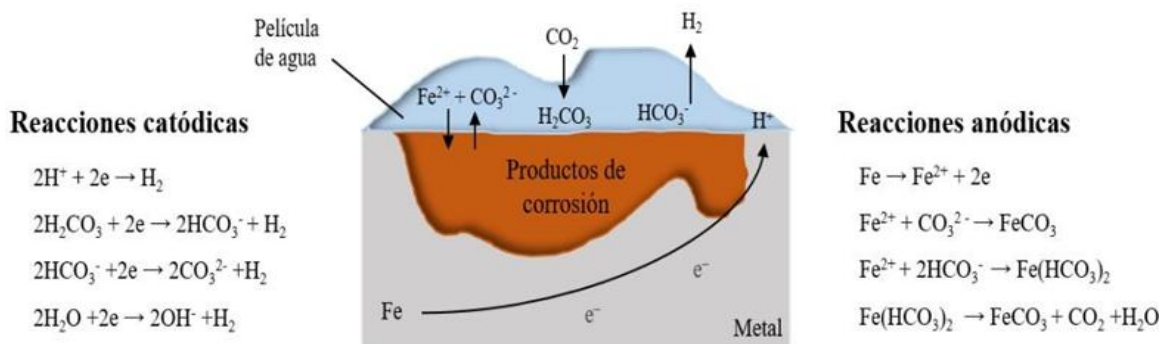
Por otro lado, el estudio de Muraza y Galadima (2015) se centra en el proceso de acuatermólisis, que combina la acción de agua y calor para descomponer el petróleo pesado. Este proceso se ve potenciado por la adición de catalizadores liposolubles, que no solo aceleran la reacción, sino que también mejoran la calidad del producto final. Los autores enfatizan que la interacción entre el agua y los catalizadores liposolubles es crucial, ya que permite la formación de especies reactivas que facilitan la ruptura de enlaces químicos en las moléculas de petróleo pesado. Este enfoque no solo optimiza la producción de hidrocarburos más ligeros, sino que también puede contribuir a la reducción de emisiones contaminantes durante el proceso de mejora. Los autores destacan que la eficacia de estos catalizadores depende de varios factores, incluyendo su estructura química, la temperatura de reacción y la composición del petróleo. Además, se discuten las perspectivas futuras para la investigación en este campo, sugiriendo que la combinación de catalizadores liposolubles con otras tecnologías de mejora podría llevar a un aumento significativo en la eficiencia de la producción de petróleo pesado. En conjunto, estos estudios subrayan el potencial de los catalizadores liposolubles como una herramienta clave para enfrentar los retos asociados con la explotación de recursos de petróleo pesado.

2.4 Corrosión en ambientes de extracción

La corrosión es un problema crítico en la industria petrolera, ya que afecta directamente la integridad estructural y la vida útil de los materiales utilizados en tuberías y equipos (Hart, 2014). Los aceros tales como el API 5L X65, API N80, API P110, entre otros, son ampliamente empleados debido a su resistencia mecánica, sumado a esto tienden a ser particularmente susceptible a procesos corrosivos en presencia de compuestos químicos agresivos, como los subproductos generados por el proceso de acuatermolisis. Estudios han revelado que estos subproductos pueden acelerar la formación de capas corrosivas, comprometiendo la durabilidad del material y aumentando los costos de mantenimiento y reemplazo (Salas-Chía & Núñez, 2023).

Figura 2.

Representación de las reacciones catódicas y anódicas durante el proceso de corrosión en el acero al carbono bajo un ambiente de dióxido de carbono y vapor de agua.



Nota. Adaptado de (G. Cui et al., 2019).

2.5 Inhibidores de corrosión

Los inhibidores de corrosión son compuestos químicos diseñados para reducir o prevenir los efectos adversos de la corrosión en materiales metálicos. Su uso en entornos de extracción de crudos pesados ha demostrado ser efectivo para proteger superficies metálicas como de los aceros, al formar barreras protectoras que limitan la interacción con agentes corrosivos (Zhang et al., 2020; Gao et al., 2022). La elección de un inhibidor adecuado depende de factores como la composición química del catalizador, las condiciones de operación y el costo-beneficio en el contexto industrial. Investigaciones recientes subrayan la importancia de optimizar estas formulaciones para garantizar una compatibilidad efectiva con los procesos térmicos y los materiales utilizados (Salas-Chía & Núñez, 2023).

2.6 Estado del arte

El recobro mejorado de crudos pesados (EOR, por sus siglas en inglés) es una técnica crucial para la explotación de yacimientos que contienen petróleo de alta viscosidad. Estos métodos, que incluyen la inyección de catalizadores y reactivos, buscan mejorar la movilidad del petróleo y aumentar la producción de hidrocarburos. En particular, el uso de catalizadores liposolubles ha ganado atención debido a su capacidad para reducir la viscosidad del crudo y mejorar la eficiencia de recuperación.

Los catalizadores liposolubles, definidos como aquellos que pueden disolverse en medios oleosos sin perder su actividad, se han identificado como agentes efectivos en la reducción de la viscosidad del crudo pesado. Estos catalizadores se introducen en los reservorios para modificar la

estructura química del petróleo, facilitando su flujo hacia los pozos de producción. Según varios estudios, el empleo de estos catalizadores en procesos como la inyección de vapor o de solventes ha mostrado mejoras significativas en la recuperación de crudo.

El trabajo de Su et al. (2019) resalta que los catalizadores liposolubles, tales como ácidos orgánicos y complejos metálicos, funcionan principalmente modificando las interacciones moleculares en el crudo, disminuyendo la viscosidad y mejorando la movilidad. Además, el uso de estos catalizadores permite un mejor control sobre la temperatura y la presión del reservorio, optimizando el proceso de inyección de vapor o agua caliente, típicamente utilizado en la recuperación de crudos pesados.

3. Metodología

3.1 Introducción a la metodología

La metodología adoptada para esta tesis es una revisión del estado del conocimiento sobre el uso de catalizadores liposolubles en el recobro mejorado de crudos pesados y su posible influencia en la corrosión de los aceros. Este tipo de metodología se considera adecuada debido a que el propósito principal es sintetizar y analizar la literatura existente sobre ambos temas: la mejora de la recuperación de crudos pesados mediante catalizadores y el impacto de estos procesos sobre la corrosión de materiales empleados en la industria petrolera. El enfoque de la revisión es narrativo, buscando integrar los avances y tendencias más relevantes, resaltando los estudios que

abordan tanto los mecanismos de acción de los catalizadores liposolubles como los efectos corrosivos en los metales utilizados en las perforaciones y conductos.

3.2 Criterios de selección de fuentes

Para asegurar la calidad y la relevancia de la información, se establecieron los siguientes criterios para la selección de las fuentes de literatura revisadas:

Años de Publicación: Se incluyeron estudios publicados entre 2010 y 2024 para garantizar la actualización de la información. Sin embargo, se consideraron artículos más antiguos cuando fueron fundamentales para el desarrollo de conceptos clave en los temas tratados.

Tipo de Documento: Se seleccionaron principalmente artículos científicos revisados por pares, pero también se incluyeron capítulos de libros especializados, informes técnicos de la industria y trabajos de conferencias internacionales. La diversidad en los tipos de fuentes asegura una perspectiva integral de los avances en el tema.

Relevancia Temática: Solo se seleccionaron documentos que abordaran, de manera directa o indirecta, los catalizadores liposolubles aplicados al recobro mejorado de crudos pesados y su impacto en la corrosión de los aceros. La relevancia temática se evaluó mediante un análisis preliminar de los resúmenes y conclusiones de cada documento. Cabe anotar que son muy escasas las referencias con respecto a la influencia de los catalizadores liposolubles sobre la corrosión de materiales metálicos.

Calidad y Fiabilidad: Se prefirieron fuentes publicadas en revistas indexadas en bases de datos reconocidas, tales como Scopus, Web of Science, y Elsevier. También se incluyeron informes técnicos de organizaciones como la Sociedad de Ingenieros Petroleros (SPE) y la

American Chemical Society (ACS), por su reputación y fiabilidad en la divulgación científica junto a la base de datos bibliográficos ofrecidos por la universidad industrial de Santander.

3.3 Búsqueda y recolección de información

La recolección de la información se realizó mediante una búsqueda exhaustiva en las siguientes bases de datos electrónicas:

Google Scholar: Se utilizó para acceder a artículos de acceso abierto y localizar publicaciones relevantes de autores que investigan en la intersección entre la ingeniería química y la ingeniería del petróleo.

ScienceDirect: Esta plataforma fue consultada para obtener artículos completos que tratan sobre catalizadores y su relación con la corrosión de los aceros.

Scopus y Web of Science: Se recurrió a estas bases de datos para garantizar que las fuentes seleccionadas fueran de alta calidad y ampliamente citadas en otros estudios de relevancia.

Redalyc y Scielo: Se incluyeron investigaciones provenientes de estas plataformas para incorporar estudios publicados en revistas científicas latinoamericanas que abordan aspectos clave del recobro mejorado de crudos pesados y la ingeniería petrolera.

Base de datos bibliográficos Uis: Usada principalmente para tener acceso a plataformas que se es necesaria una suscripción de pago para su uso además de publicaciones relacionadas al tema investigado propiamente de la universidad.

3.4 Análisis y síntesis de selección

Una vez recolectada la información, se procedió a un análisis y síntesis sistemática de los estudios seleccionados. El análisis se centró en:

Mecanismos de acción de los catalizadores liposolubles en la mejora de la recuperación de crudos pesados. Se identificaron las principales clases de catalizadores, sus propiedades, su interacción con el petróleo y cómo estos afectan la viscosidad del crudo.

Impacto de los catalizadores en la corrosión de los aceros, enfocándose en los estudios que analizan los efectos del uso de ciertos catalizadores en la integridad estructural de los metales empleados en la industria petrolera.

Tendencias y vacíos en la literatura, identificando áreas de investigación que requieren más exploración, como la efectividad de ciertos catalizadores en condiciones extremas de temperatura y presión, o el impacto a largo plazo en la vida útil de los materiales.

3.5 Estrategias de evaluación crítica

Para evaluar críticamente la literatura, se adoptaron las siguientes estrategias:

Revisión comparativa de los resultados obtenidos en distintos estudios, buscando consistencias y discrepancias en los hallazgos relacionados con la eficiencia de los catalizadores y la corrosión del acero.

Análisis de metodologías utilizadas en los estudios revisados, considerando el diseño experimental, la selección de materiales y las condiciones de prueba.

Evaluación de la aplicabilidad de los resultados a la práctica industrial, valorando las limitaciones de los estudios y la escalabilidad de las soluciones propuestas en la literatura.

3.6 Método de organización de la revisión

La revisión se organizó en torno a tres ejes principales:

Catalizadores liposolubles en el recobro de crudos pesados: Esta sección aborda los tipos de catalizadores más utilizados, su mecanismo de acción, y su efectividad en la mejora de la recuperación de crudos de alta viscosidad.

Corrosión de los aceros: Se examinan los efectos de los catalizadores en la integridad estructural de los aceros, así como las estrategias para mitigar la corrosión en ambientes de alta temperatura y presión.

Interacción entre catalizadores y los aceros: Finalmente, se analizan los estudios que combinan ambos factores, es decir, el impacto del uso de catalizadores en la corrosión de los materiales metálicos empleados en la industria.

4. Resultados y discusión

4.1 Aplicación de catalizadores en el proceso de inyección de vapor

Durante la inyección de vapor en un volumen específico del yacimiento, se crean condiciones de presión y temperatura que permiten que el vapor de agua interactúe con ciertos hidrocarburos y minerales presentes. Esta interacción causa efectos adicionales, como cambios permanentes en la composición y propiedades del crudo. Entre las propiedades físicas, la viscosidad se destaca como un factor crucial para la fluidez del crudo en los procesos de extracción. En la figura 3 se presenta el comportamiento de la viscosidad en función de diferentes temperaturas de medición, considerando crudos expuestos a varias concentraciones de agua, comenzando con el crudo inicial o blanco y relaciones másicas que varían de 0 a 0.6 W/O. Los autores observaron que la adición de agua resultó en una disminución de la viscosidad del crudo en el rango de 0 a 0.3. En el intervalo de 0.3 a 0.5, se registró la máxima reducción; sin embargo, la variación en esta reducción fue mínima.

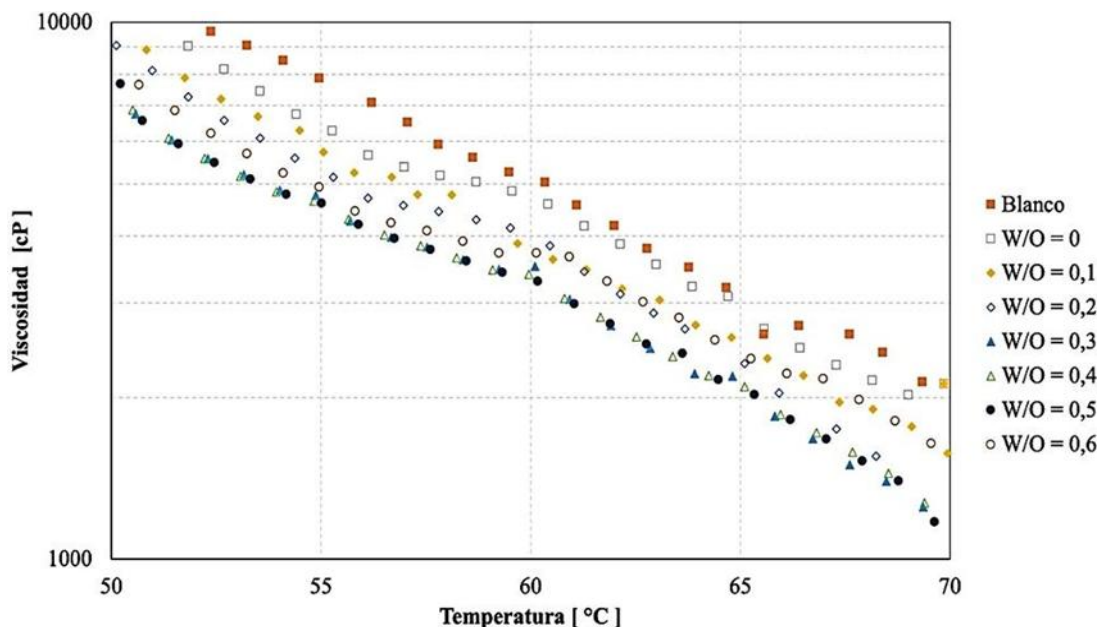
La relación de 0.6 produjo un cambio en la tendencia observada en las relaciones anteriores, y la magnitud de la reducción de la viscosidad disminuyó. Esto sugiere que la presencia de agua en estas cantidades produce efectos similares a los observados a bajas relaciones.

Este fenómeno puede atribuirse a una mayor acción del vapor en la ruptura de los radicales libres presentes en el crudo; sin embargo, la cantidad de hidrógeno disponible en el medio no aumenta de manera proporcional, lo que genera una policondensación en el proceso y produce un

aumento no deseado en la viscosidad del efluente, afectando así el mecanismo relacionado con la reacción de acuatermolisis.

Figura 3.

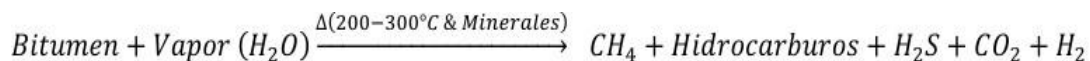
Comportamiento de la viscosidad en función de diferentes temperaturas de medición.



Nota. Adaptado de Viscosity Reduction of Heavy Oil by Aquathermolysis with Coordination Complex at Low Temperature (Hao et al., 2015).

Aunque durante más de tres décadas este proceso térmico fue considerado puramente físico, investigaciones y proyectos a escala comercial han confirmado la existencia de reacciones químicas. Hyne (1986) denominó a estas reacciones acuatermolisis, refiriéndose al proceso químico que ocurre cuando el aceite pesado o las arenas petrolíferas entran en contacto con agua a altas temperaturas, sin importar su estado físico. Varios investigadores han trabajado en establecer un esquema de reacción para este fenómeno, siendo el modelo más aceptado el propuesto por Hyne (1986), que considera las condiciones de las pruebas experimentales y los

productos observados en laboratorio y en los primeros proyectos piloto (Kapadia, Kallos, & Gates, 2015). La ecuación 1 ilustra la reacción general de la acuatermólisis, destacando la producción de dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, monóxido de carbono e hidrocarburos de menor peso molecular.



Ecuación 1

Las reacciones intermedias en la acuatermólisis están relacionadas con subprocesos de pirólisis, hidrólisis, reacciones water gas shift e hidro desulfuración, donde las dos últimas implican la reducción de heteroátomos de oxígeno y azufre, lo que conduce a la formación de los productos mencionados (Muraza & Galadima, 2015). Se ha demostrado que los compuestos organosulfurados, como los sulfuros y disulfuros, son los principales iniciadores de las secuencias de acuatermólisis.

Por lo tanto, la presencia de estas estructuras químicas en el crudo es crucial para la ocurrencia de los subprocesos mencionados. La acuatermólisis de aceites pesados, bajo la influencia de catalizadores y condiciones adecuadas de temperatura y composición, resulta en un aumento de la fracción de saturados y aromáticos, al mismo tiempo que disminuye la cantidad de asfáltenos y resinas, lo que reduce el peso molecular aparente del aceite y su viscosidad.

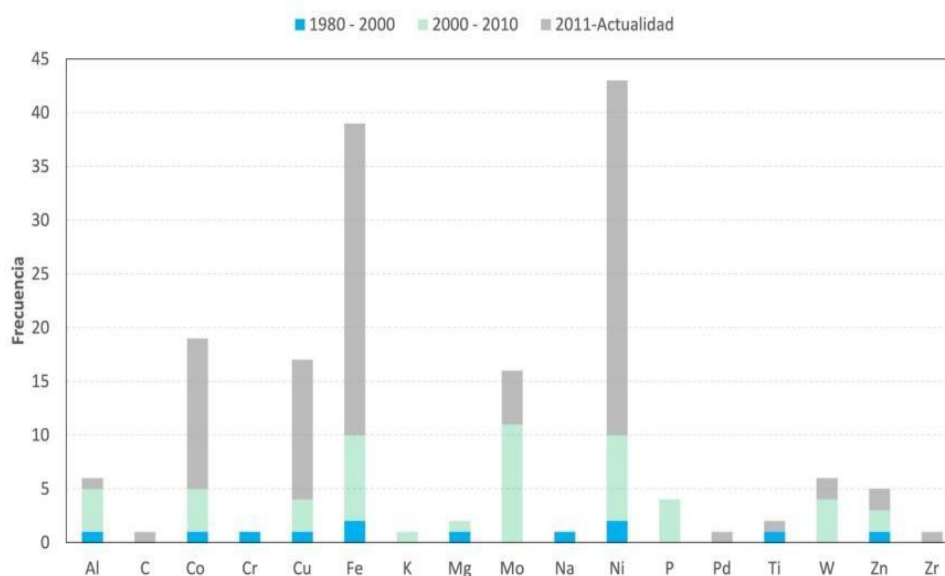
Desde que se consideró posible este efecto, se han llevado a cabo diversos estudios para evaluar la viabilidad de mejorar in situ mediante un proceso de inyección de vapor, utilizando tanto catalizadores comerciales como experimentales (Kapadia et al., 2015). En años recientes, se han realizado desplazamientos y pruebas de interacción fluido-fluido en reactores autoclave y tipo batch, enfocándose en mejorar propiedades del crudo como la gravedad API, la relación

hidrógeno-carbono, el análisis SARA y la viscosidad (H. Fan, Liu, Zhang, & Zhao, 2002; Jiang et al, 2005).

Mejorar el crudo en el yacimiento podría considerarse un mecanismo adicional de recuperación durante el proceso de recobro mejorado, ya que la reducción permanente de la viscosidad facilitaría su movimiento en el medio poroso. Además, no solo se incrementaría la producción, sino que también se generarían fluidos de mayor valor comercial, lo que disminuiría la intensidad de los tratamientos en refinería y transporte. Se han desarrollado y estudiado diversos compuestos químicos para actuar como sistemas catalíticos en las reacciones de acuatermólisis, que se clasifican en heterogéneos y homogéneos (Dong, X., Liu, H., Chen, Z., Wu, K., Lu, N., & Zhang, Q. 2019). Los catalizadores homogéneos se dividen en solubles en agua, como las sales de molibdeno, tungsteno, hierro, níquel y cobalto; y solubles en aceite, como lo son los catalizadores de metal orgánico entre otros, en la figura 4 se observan las bases metálicas empleadas mayoritariamente en los procesos de acuatermólisis.

Figura 4.

Bases metálicas empleadas en pruebas de acuatermólisis reportadas en literatura.



Nota. Modificado de: Salas Chía et al. (2023) Influencia de parámetros operacionales de la inyección de vapor sobre las propiedades de crudos pesados sometidos a reacciones de acuatermólisis.

4.1.1 Naftenato de hierro

El naftenato de hierro ha emergido como un catalizador prometedor en la mejora y extracción de crudos pesados, un desafío significativo en la industria del petróleo debido a la alta viscosidad y complejidad química de estos hidrocarburos. Los crudos pesados, que contienen una alta proporción de compuestos pesados como asfáltenos y resinas, requieren métodos eficientes para su procesamiento y transporte. El naftenato de hierro, al ser un compuesto que combina propiedades catalíticas con la capacidad de interactuar con estos compuestos pesados, se ha estudiado por su potencial para facilitar la reducción de la viscosidad y mejorar la fluidez del crudo.

Investigaciones han demostrado que el naftenato de hierro puede actuar como un agente desagregante, ayudando a romper las interacciones entre las moléculas de los crudos pesados, lo que resulta en una mejora en la eficiencia del flujo y la recuperación del petróleo (Zhang Y, Wang Y, Liu Y, 2014)

Además, el uso de naftenato de hierro en procesos de conversión de crudos pesados ha mostrado resultados prometedores en la mejora de la calidad del producto final. Según un estudio de Zhang et al. (2014), la adición de naftenato de hierro en la conversión térmica de crudos pesados no solo reduce la viscosidad, sino que también mejora el rendimiento de los productos ligeros, lo que es crucial para maximizar la rentabilidad en la producción de petróleo.

El naftenato de hierro actúa como catalizador al facilitar la descomposición y transformación de compuestos pesados, mejorando así la eficiencia en la extracción y procesamiento de crudos pesados. Este enfoque no solo optimiza el rendimiento, sino que también promueve la sostenibilidad en la industria del petróleo al disminuir la necesidad de métodos más agresivos y costosos (Liu Y, Zhang Y, Wang Y. 2014).

4.1.2 Naftenato de níquel

Los crudos pesados, que contienen una mezcla considerable de compuestos pesados, como asfáltenos y resinas, requieren enfoques innovadores para su procesamiento y transporte. En este sentido, el naftenato de níquel ha sido objeto de estudio por su capacidad para facilitar la reducción de la viscosidad del crudo, mejorando así su fluidez y, en consecuencia, su recuperabilidad (Wang et al., 2010).

Estudios recientes han demostrado que el naftenato de níquel no solo actúa como un agente desagregante, sino que también promueve reacciones químicas que transforman los compuestos pesados en fracciones más ligeras y manejables. Según Yi et al. (2009), la incorporación de naftenato de níquel en procesos de conversión térmica de crudos pesados resulta en una notable disminución de la viscosidad y un aumento en el rendimiento de productos más ligeros, lo que es esencial para optimizar la rentabilidad en la producción.

El mecanismo de acción del naftenato de níquel se basa en su capacidad para facilitar reacciones de hidrogenación y descomposición, lo que permite una mayor eficiencia en la extracción y procesamiento de crudos pesados. Este enfoque catalítico no solo mejora el rendimiento del crudo, sino que también contribuye a la sostenibilidad de la industria del petróleo al reducir la dependencia de métodos más costosos y agresivos. La investigación en el uso de naftenato de níquel sigue siendo fundamental para el desarrollo de tecnologías más eficientes en la extracción de crudos pesados.

4.1.3 Naftenato de molibdeno

El naftenato de molibdeno ha sido objeto de creciente interés en la industria del petróleo, especialmente en el contexto de la extracción de crudos pesados. Este compuesto catalítico se ha destacado por su capacidad para mejorar la eficiencia de los procesos de conversión y extracción, abordando los retos asociados con la alta viscosidad y la complejidad química de los crudos pesados. A medida que la demanda de petróleo ligero disminuye, la necesidad de desarrollar tecnologías que optimicen la producción de crudos pesados se vuelve cada vez más crítica. El naftenato de molibdeno se ha investigado por su habilidad para facilitar la reducción de la

viscosidad del crudo, lo que permite un flujo más eficiente y una recuperación más efectiva del petróleo (Fan et al., 2002).

Además, el uso de naftenato de molibdeno en procesos de conversión de crudos pesados ha mostrado resultados prometedores en la mejora de la calidad del producto final. Según un estudio de Nares et al. (2006), la adición de naftenato de molibdeno en la conversión térmica de crudos pesados no solo reduce la viscosidad, sino que también mejora el rendimiento de productos más ligeros, lo que es crucial para maximizar la rentabilidad en la producción de petróleo. Este catalizador ha demostrado ser especialmente efectivo en la transformación de compuestos pesados en fracciones más ligeras, facilitando su procesamiento posterior.

El mecanismo de acción del naftenato de molibdeno como catalizador se basa en su capacidad para facilitar reacciones de hidrogenación y descomposición, lo que permite una mayor eficiencia en la extracción y procesamiento de crudos pesados.

Entre los catalizadores mencionados, el naftenato de hierro se destaca como el más utilizado en la mejora y extracción de crudos pesados. Esta preferencia se debe a varias razones que subrayan su eficacia en el tratamiento de estos hidrocarburos. El naftenato de hierro combina propiedades catalíticas con la capacidad de interactuar de manera efectiva con compuestos pesados, como asfáltenos y resinas, que son comunes en los crudos pesados. Esta interacción le permite actuar como un agente desagregante, rompiendo las interacciones entre las moléculas del crudo y facilitando su flujo, lo que resulta en una mejora significativa de la fluidez, un aspecto crucial para el transporte y procesamiento de estos hidrocarburos.

Además, el uso del naftenato de hierro se refleja en una mayor eficiencia en la recuperación del petróleo, ya que no solo mejora la fluidez del crudo, sino que también aumenta el rendimiento

de productos más ligeros. Este aumento en la producción de fracciones más ligeras es esencial para maximizar la rentabilidad en la industria petrolera.

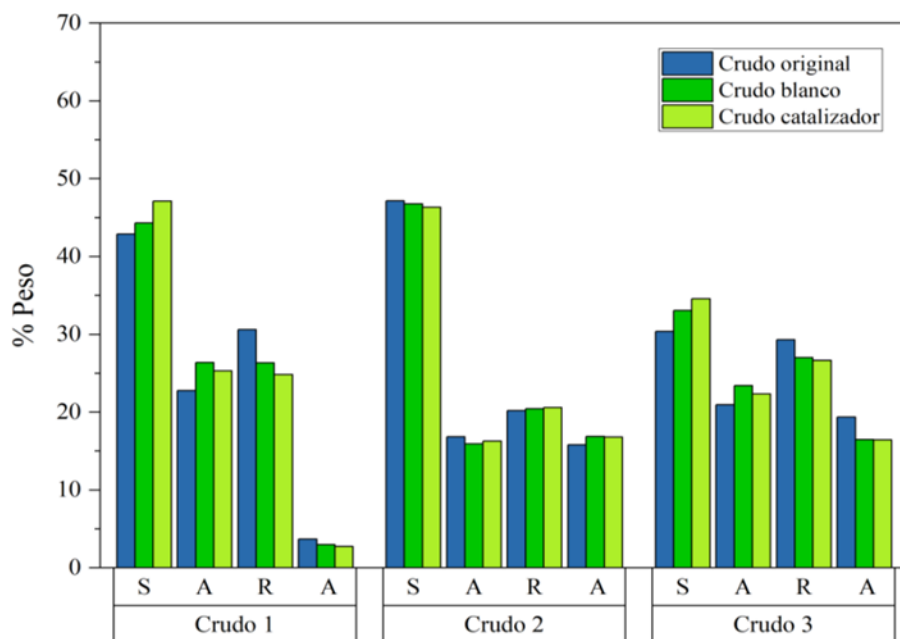
Asimismo, contribuye a la sostenibilidad en el sector al disminuir la necesidad de métodos más agresivos y costosos para el procesamiento de crudos pesados. En un contexto donde la eficiencia y la sostenibilidad son cada vez más importantes, este catalizador se presenta como una opción atractiva.

Aunque otros catalizadores, como el naftenato de níquel y el naftenato de molibdeno, también ofrecen ventajas significativas, el naftenato de hierro ha demostrado ser el más efectivo y ampliamente utilizado en la práctica. Su combinación de propiedades catalíticas, eficacia en la reducción de viscosidad y mejora de la calidad del producto final lo posiciona como el catalizador preferido en el tratamiento de crudos pesados, consolidando su relevancia en la industria del petróleo.

4.2 Influencia del catalizador en la viscosidad del crudo

La viscosidad de los crudos pesados está influenciada por varios factores, incluyendo la temperatura, la composición química y la presencia de aditivos o catalizadores. A temperaturas más altas, la viscosidad tiende a disminuir, lo que facilita el transporte y procesamiento del crudo. Sin embargo, la complejidad química de los crudos pesados, que incluye la interacción entre diferentes fracciones como saturados, aromáticos, resinas y asfáltenos, puede resultar en un comportamiento viscoso no lineal.

En la figura 5 se observa el análisis del fraccionamiento SARA realizado a tres crudos colombianos cuya gravedad API está el rango de 10 a 12 °API (Sánchez y Suárez,2023).

Figura 5.*Análisis del fraccionamiento SARA.*

Nota. Adaptado de Análisis del comportamiento de las propiedades fisicoquímicas de crudos colombianos sometidos a condiciones de inyección de vapor con naftenato de hierro (Sánchez y Suárez., 2023).

En dicho estudio se observa la composición porcentual en peso de los crudos donde se analiza una muestra original, en blanco y otra con el adiconamiento del naftenato de hierro (catalizador). De este análisis cabe resaltar que los autores encontraron una relación importante en los crudos 1 y 3 donde se observa un aumento en la proporción de saturados y aromáticos y una disminución en los asfáltenos y resinas como lo evidencia la Tabla 1. Dichos resultados confieren propiedades importantes en el comportamiento de la viscosidad del crudo dado que el aumento de dos estos dos componentes (saturados y aromáticos) de naturaleza ligera y disminución de resinas

y asfáltenos que son los componentes más pesados del mismo probablemente conduzca a una reducción en la viscosidad del crudo.

Tabla 1.

Porcentajes de las fracciones obtenidas de las muestras de crudo (Sánchez y Suárez., 2023).

Crudos	Porcentaje en peso del fraccionamiento SARA			
	S	A	R	A
Crudo 1 Original	42,87	22,79	30,63	3,71
Crudo 1 Blanco	44,33	26,37	26,32	2,98
Crudo 1 Catalizado	47,14	25,29	24,82	2,75
Crudo 2 Original	47,17	16,82	20,19	15,82
Crudo 2 Blanco	46,78	15,91	20,42	16,89
Crudo 2 Catalizado	46,34	16,28	20,59	16,80
Crudo 3 Original	30,36	20,97	29,32	19,36
Crudo 3 Blanco	33,06	23,42	27,02	16,50
Crudo 3 Catalizado	34,58	22,33	26,64	16,45

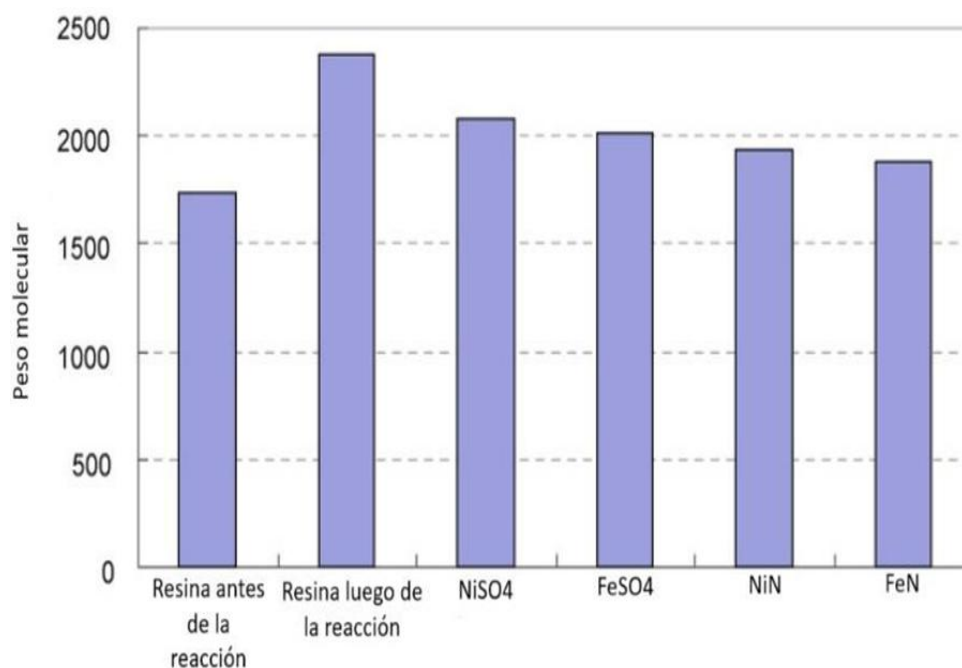
Los pesos moleculares de los asfáltenos y resinas, tanto antes como después de la reacción de acuatermolisis, se presentan en las Figuras 6 y 7. En términos generales, se esperaría que la desalquilación o el acortamiento de la cadena alifática resultaran en una disminución del peso molecular promedio de los asfáltenos y resinas. Sin embargo, se observó un aumento en el peso molecular promedio de ambos componentes tras la acuatermolisis (ver Figuras 6 y 7).

Específicamente, el peso molecular promedio de la resina incrementó de 1.738 a 2.380 después de la reacción de acuatermolisis sin catalizador, mientras que el de los asfáltenos aumentó de 2.710 a 3.510. Este fenómeno podría atribuirse a la asociación parcial de estos compuestos

aromáticos polinucleares, lo que resultó en un incremento de la polaridad. La presencia del catalizador parece haber limitado este aumento. Es posible que la formación de sulfuro haya facilitado la reacción de transferencia de hidrógeno, lo que a su vez podría haber inhibido la agregación de asfáltenos y resinas.

Figura 6.

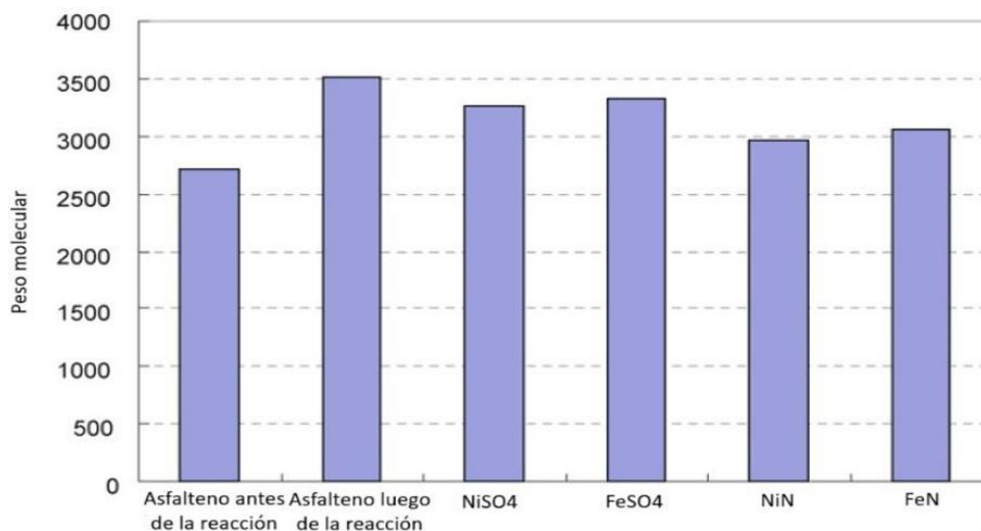
Peso molecular de resina antes y después de la reacción de acuatermolisis.



Nota. Adaptado de Change of asphaltene and resin properties after catalytic aquathermolysis (Yu Hang et al., 2009).

Figura 7.

Peso molecular de asfalteno antes y después de la reacción de acuatermolisis.



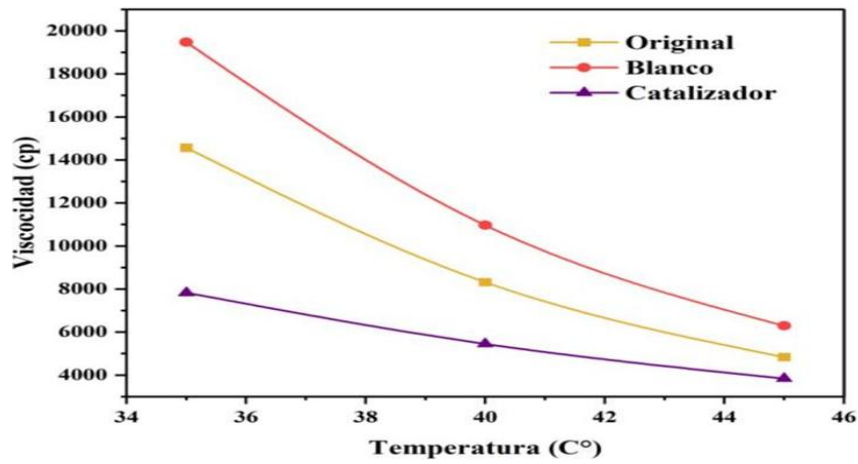
Nota. Adaptado de Change of asphaltene and resin properties after catalytic aquathermolysis (Yu Hang et al., 2009).

Del mismo estudio realizado por Sánchez y Suárez se obtuvieron las figuras 8,9 y 10 en donde se evidencia el comportamiento de la viscosidad en relación con la temperatura para cada crudo.

Crudo 1

Figura 8.

Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura

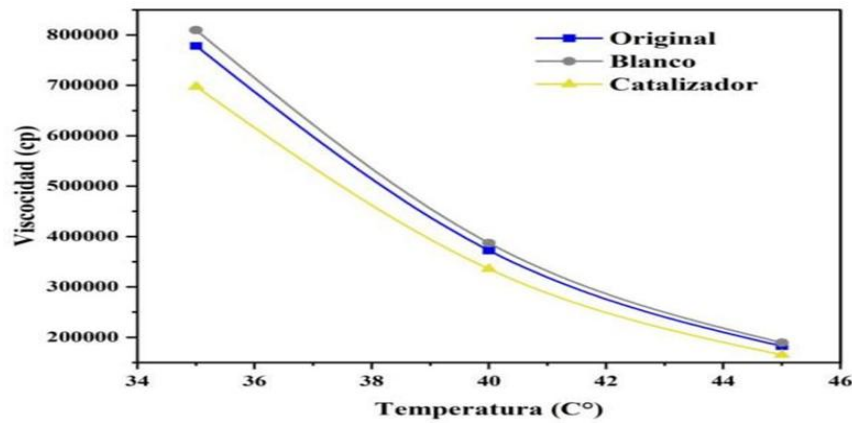


Nota. Tomado de: (Sánchez y Suárez., 2023).

Crudo 2

Figura 9.

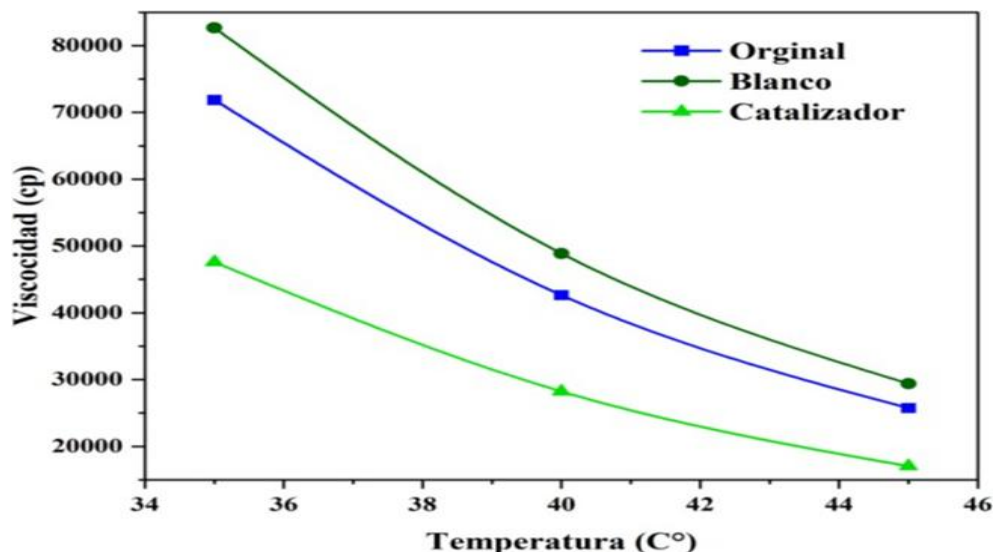
Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura



Nota. Tomado de: (Sánchez y Suárez., 2023).

Crudo 3**Figura 10.**

Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura



Nota. Tomado de: (Sánchez y Suárez., 2023)

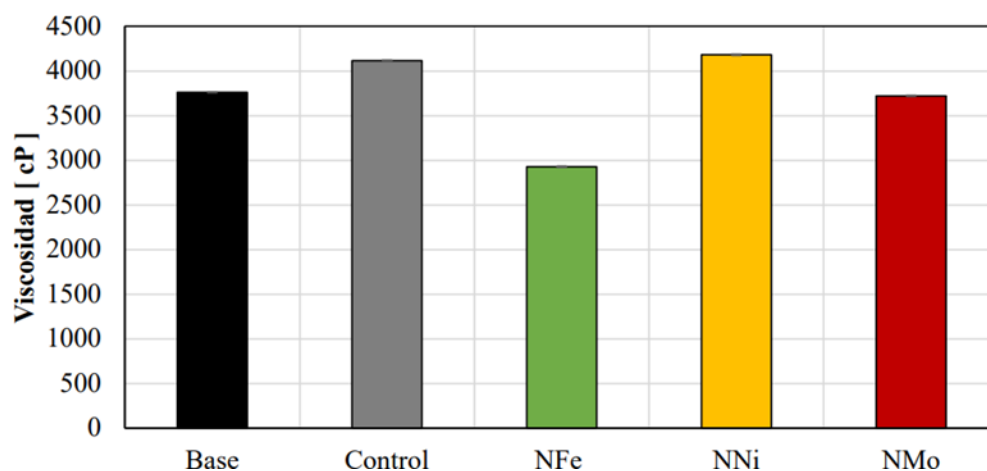
A partir de las gráficas presentadas, se puede deducir que, para todos los tipos de crudo analizados, se observa una reducción en la viscosidad a medida que se incrementa la temperatura. Esta disminución es más pronunciada cuando se utiliza un catalizador, dado que el tratamiento previo con este ha permitido la eliminación de compuestos pesados del crudo.

En la figura 11 se tiene la comparación de la viscosidad para 3 de los catalizadores más comunes utilizados en la recuperación de crudo donde se establece que la inyección de vapor causa un incremento en la viscosidad debido a la falta de estabilización de los radicales libres generados por la policondensación en el sistema, que se ve afectada por la ausencia de hidrógeno. La utilización de un catalizador reduce los requerimientos energéticos de las reacciones y mejora las condiciones para alcanzar un valor de viscosidad más favorable. No obstante, en el crudo utilizado

en estas pruebas, solo dos de los tres agentes mostraron una disminución en la viscosidad. Los cambios en la viscosidad, ordenados de menor a mayor, fueron: el naftenato de níquel (NNi) con un aumento del 11.21%, el naftenato de molibdeno (NMo) con una reducción del 1.07% y el naftenato de hierro (NFe) con una disminución del 22.16%. Estos resultados fueron analizados mediante pruebas de Tukey, las cuales indicaron que las diferencias entre los resultados son estadísticamente significativas.

Figura 11.

Valores de viscosidad obtenida de un crudo 11.8° API a 45°C



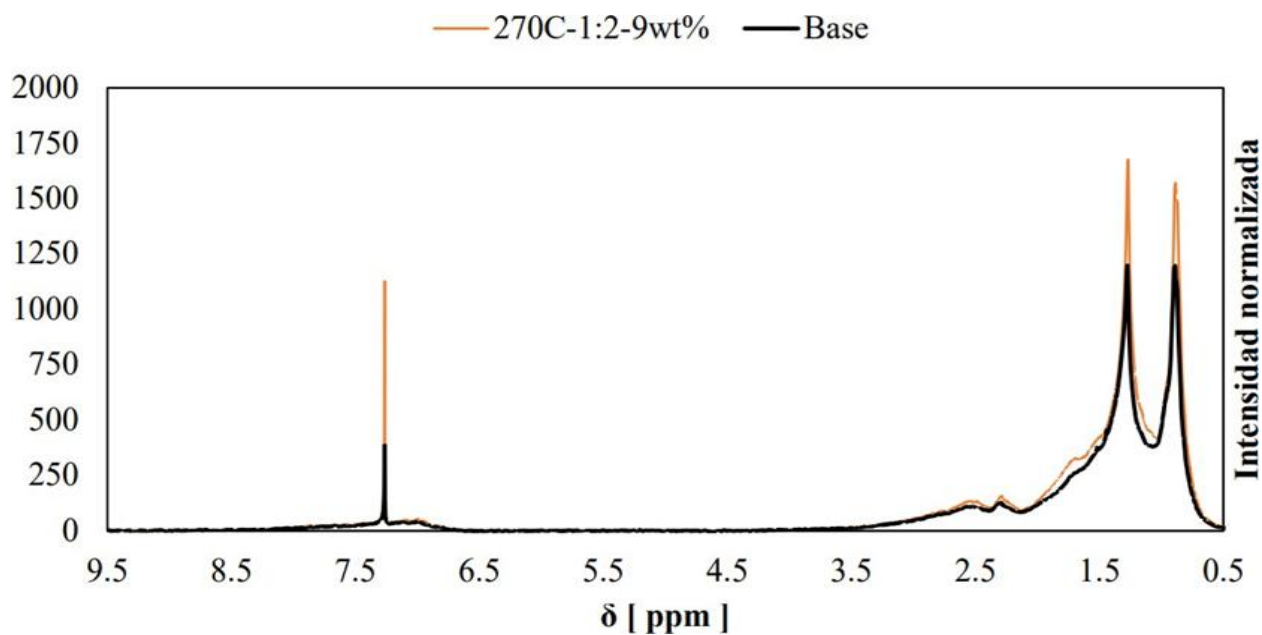
Nota. Tomado de: (Salas Chia.,2023)

4.3 Cambios en las propiedades químicas

La Figura 12 presenta el espectro del crudo base junto con el espectro correspondiente a la muestra que mostró la mayor reducción en viscosidad (Naftenato de Fe). En esta figura, se pueden observar las diferencias en las curvas, las cuales facilitarán la evaluación de los cambios químicos mediante los parámetros establecidos en la Tabla 2.

Figura 12.

Espectro del crudo base y prueba con mayor reducción obtenida en los diseños experimentales



Nota. Tomado de: (Salas Chia.,2023).

Tabla 2.

Asignaciones estructurales en el espectro 1H RMN (Poveda & Molina, 2012).

Rango del espectro [ppm]	Segmento	Tipo de hidrógeno
0.5-1.0	H1	γ CH ₃ y algunos CH nafténicos y CH ₂
1.0-1.7	H2	β CH ₃ s y algunos β CH
1.7-1.9	H3	Principalmente CH y CH ₂ en posiciones β
1.9-2.1	H4	α CH ₃ en olefinas
2.1-2.4	H5	α CH ₃ en hidrocarburos aromáticos
2.4-3.5	H6	α CH y α CH ₂ en carbonos aromáticos
3.5-4.5	H7	Puentes CH ₂
4.5-6.0	H8	Olefinas
6.0-7.2	H9	Anillos mono-aromáticos
7.2-8.3	H10	Anillos di aromáticos y algunos tri y tetra aromáticos
8.3-8.9	H11	Algunos anillos tri y tetra aromáticos
8.9-9.3	H12	Algunos anillos tetra aromáticos

En primer lugar, se llevaron a cabo análisis de las 12 asignaciones estructurales de hidrógeno propuestas en la Tabla 2. La Tabla 3 muestra las variaciones observadas en estos 12 parámetros, los cuales fueron obtenidos a partir de la normalización de los espectros. Como se puede apreciar, las asignaciones H2, H5 y H11 exhiben la mayor dispersión en sus datos, lo cual se evidencia a través de las desviaciones estándar calculadas. Estas regiones corresponden a hidrógenos asociados a grupos CH₃ y CH beta, CH₃ alfa aromáticos, así como a anillos tri y tetra aromáticos, respectivamente. Estos cambios indican que la estructura química de los crudos resultantes presenta variaciones que se reflejan en sus propiedades, tales como la intensidad de los picos observados en el espectro de resonancia magnética nuclear.

Tabla 3.

Asignaciones estructurares en el espectro 1H RMN de las pruebas (Sánchez y Suárez., 2023).

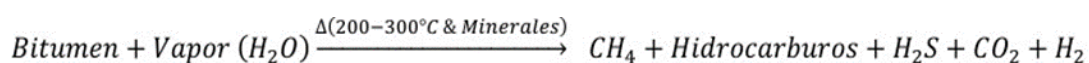
	MIN	MAX	PROMEDIO	DESV
H 1	0,03	0,11	0,07	0,04
H 2	45,62	46,70	46,08	0,45
H 3	3,65	3,90	3,76	0,12
H 4	4,29	4,41	4,37	0,05
H 5	9,42	9,99	9,71	0,25
H 6	0,99	1,25	1,13	0,11
H 7	0,03	0,14	0,07	0,05
H 8	1,43	1,70	1,59	0,12
H 9	3,51	4,14	3,78	0,28
H 10	0,29	0,51	0,37	0,10
H 11	20,87	23,73	22,51	1,24
H 12	6,35	6,75	6,56	0,19

4.4 Alteraciones que promueven la corrosión

En primer lugar, es fundamental considerar la Ecuación 1, que representa los principales subproductos de la acuatermolisis. En esta ecuación, se destaca la producción simultánea de

dióxido de carbono (CO₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S) en fases líquidas y gaseosas, lo que genera un entorno altamente corrosivo. Por un lado, la mezcla de CO₂ y agua da lugar a la formación de ácido carbónico (H₂CO₃), lo que provoca una disminución del pH del medio. Esta reducción en el pH incrementa la acidez del entorno, lo que a su vez favorece la corrosión de los metales y las tuberías en los sistemas de extracción petrolífera.

El sulfuro de hidrógeno (H₂S) es un agente altamente corrosivo, y su interacción con el acero puede dar lugar a la formación de sulfuro de hierro (FeS). Este producto tiene un impacto significativo en la integridad del metal, ya que puede contribuir a la formación de depósitos que agravan el proceso de corrosión.



Ecuación 1

Por otro lado, la presencia de vapor de agua de inyección, en combinación con el catalizador, puede dar lugar a una serie de reacciones químicas. En este contexto, el naftenato de base metálica puede disolverse y liberar iones en la solución. Además, dependiendo del pH y de la concentración de iones presentes, también puede formarse hidróxidos.

4.5 Efecto del naftenato de hierro sobre la corrosión del acero al carbono API-P110

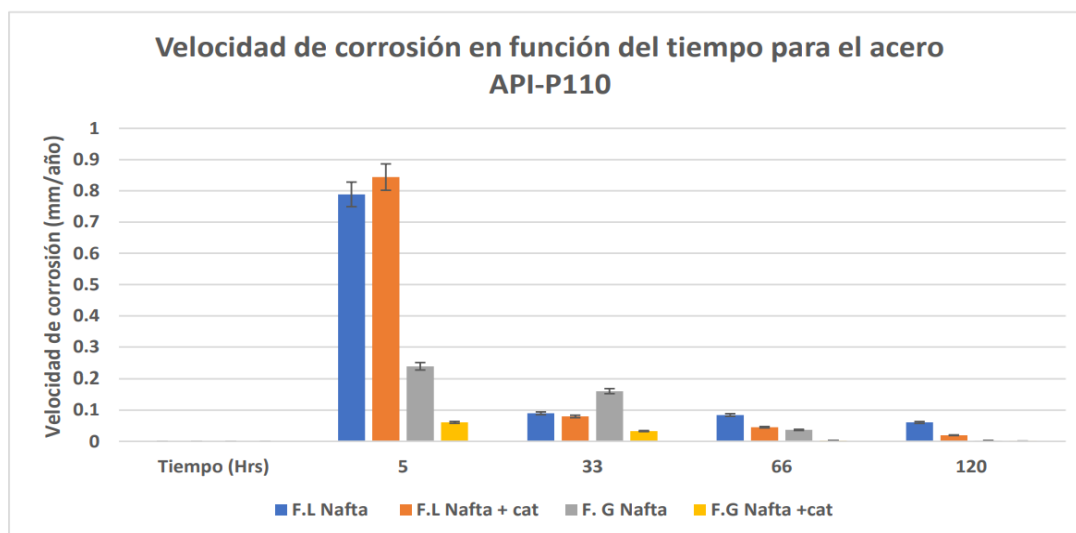
En el trabajo de investigación García Murillo, L. P. (2023) se evaluó el efecto del proceso de inyección de vapor con nafta y catalizador sobre la corrosión del acero al carbono API-P110 en el que se utilizó la técnica de gravimetría discontinua para medir la velocidad de corrosión, evaluando la pérdida de masa del acero expuesto a mezclas de nafta y naftenato de hierro tanto en

fase líquida como en fase gaseosa bajo las condiciones de tiempo de exposición (5, 33, 66 y 120 h), catalizador (presencia y ausencia de este) y fase de exposición (líquida y gaseosa).

Como resultado de este proceso se determina que la corrosión del acero al carbono API-P110 es más agresiva en fase líquida y que la adición del catalizador a la mezcla tiene un efecto protector en la corrosión en fase gas.

Figura 13.

Análisis de la velocidad de corrosión en diferentes intervalos de tiempo (5, 33, 66 y 120 horas) en función de la fase de contacto (líquida y gaseosa) utilizando el proceso de inyección de vapor convencional con nafta y con la adición de un catalizador.



Nota. Adaptado de Efecto del proceso de inyección de vapor con naftenato de hierro y nafta sobre la corrosión del acero al carbono API-P110.

Los resultados indican que la velocidad de corrosión es mayor en la fase líquida durante las primeras 5 horas de exposición para ambas mezclas, lo que se atribuye a que los iones en la solución pueden interactuar directamente con la superficie del acero, aumentando la corrosión. En

contraste, en la fase gaseosa, las moléculas están más dispersas, lo que reduce la velocidad de corrosión.

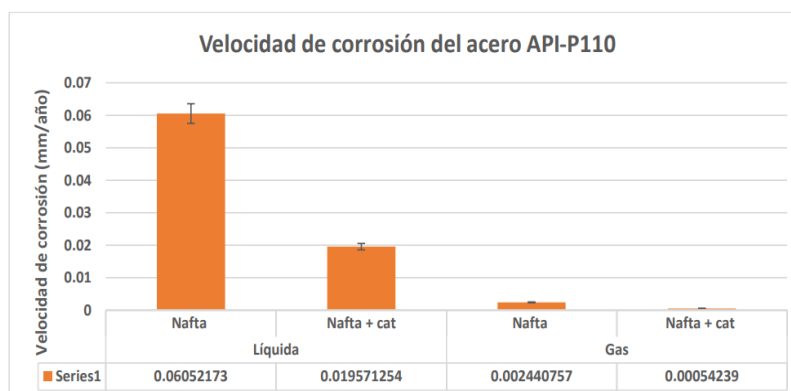
Para los cupones expuestos durante 120 horas, la velocidad de corrosión disminuye más del 50% en comparación con las 66 horas, posiblemente debido a la formación de una capa de Fe₃O₄ en la superficie del acero, que actúa como una barrera protectora.

Además, el medio corrosivo puede volverse menos agresivo con el tiempo por el agotamiento de iones corrosivos o la reducción de oxígeno en la solución, lo que también contribuye a la disminución de la velocidad de corrosión. La presencia de naftenato de hierro como catalizador reduce la velocidad de corrosión, ya que este compuesto reacciona con los iones en el ambiente.

En la figura 14 se observa que la velocidad de corrosión en la fase líquida de nafta es aproximadamente el doble que en la mezcla con catalizador después de 120 horas, lo que sugiere que el naftenato de hierro efectivamente disminuye la corrosión en períodos prolongados.

Figura 14.

Velocidad de corrosión en función del tiempo (120 h) para el acero API-P110.



Nota. Adaptado de Efecto del proceso de inyección de vapor con naftenato de hierro y nafta sobre la corrosión del acero al carbono API-P110.

Los resultados mostraron que la velocidad de corrosión del acero aumentaba en la fase líquida al estar expuesto a la mezcla sin catalizador, mientras que la inclusión del catalizador resultó en una disminución de la velocidad de reacción, actuando como un inhibidor. Además, se observó que la velocidad de corrosión del acero disminuía con el tiempo en todos los casos analizados, lo que se atribuye a la formación de productos durante las primeras horas, los cuales reducen la cantidad de iones reactivos disponibles que contribuyen a la generación de más productos de corrosión.

La aparición de cristales esféricos de Fe_3O_4 fue beneficiosa, ya que se asocia con una superficie más uniforme y homogénea, lo que permitió una menor velocidad de corrosión. En contraste, el cupón expuesto a la fase líquida de la mezcla sin catalizador mostró un crecimiento dendrítico y desorganizado, lo que lo hace más susceptible a la acumulación de contaminantes y agentes corrosivos que pueden acelerar el proceso de corrosión. Los resultados de la investigación sugieren que el proceso híbrido de inyección de vapor junto a un catalizador promueve la formación de capas estables químicamente en la superficie del acero aumentando la protección contra la corrosión del acero.

La generación de óxidos durante la interacción de fases actúa como una barrera que impide el contacto directo entre el metal y los agentes corrosivos, tales como el agua y los iones disueltos. Las capas formadas, como el trióxido de molibdeno (MoO_3) y el dióxido de molibdeno (MoO_2), que son subproductos del uso de naftenato de molibdeno, generan óxidos que generalmente son más estables en ambientes corrosivos. Esta estabilidad contribuye a la prevención de la corrosión del sustrato metálico subyacente.

Asimismo, la presencia de óxidos de níquel en procesos híbridos que involucran naftenato de níquel puede ser beneficiosa para prevenir la corrosión localizada, como la corrosión por

picaduras, que es común en entornos agresivos. Esto se debe a que la capa de óxido formada puede mostrar una mayor resistencia a la ruptura en comparación con otras capas pasivas, lo que refuerza la protección del material frente a la corrosión.

En la investigación realizada por (Pavitra Shenoy et al., 2024), se analiza el comportamiento de los surfactantes orgánicos, los cuales desempeñan un papel crucial en la reducción de la tensión superficial entre el metal y el medio corrosivo. Esta reducción puede disminuir la velocidad de corrosión al facilitar la formación de una película protectora sobre la superficie del metal. Dicha película actúa como una barrera que impide el contacto directo entre el metal y los agentes corrosivos, y su eficacia está determinada por la estructura química del surfactante, incluyendo la longitud de la cadena hidrofóbica y la naturaleza del grupo polar.

Además, los surfactantes tienen la capacidad de modificar las interacciones químicas en la interfaz metal-solución, lo que puede alterar la cinética de las reacciones de corrosión, resultando en una disminución de la corrosión en ambientes ácidos, neutros o alcalinos. En el caso de el catalizador liposoluble interactúa con interfaces entre líquidos o entre un líquido y un sólido, dado que posee una parte hidrofílica (afín al agua) y una parte lipofílica (afín a los aceites). Esta característica le permite reducir la tensión superficial y mejorar la dispersión de compuestos. Este comportamiento, propio de los inhibidores y surfactantes, es fundamental en el mecanismo de acción que promueve la formación de capas pasivas que protegen el metal, al tiempo que facilita la disolución de productos de corrosión, mejorando así la durabilidad del metal.

4.6 Principales brechas del conocimiento identificadas

A pesar de los avances significativos en la investigación sobre catalizadores liposolubles, aún persisten importantes brechas en el conocimiento que limitan la comprensión de sus efectos en la corrosión de los materiales metálicos. Estas lagunas de conocimiento son críticas, ya que pueden afectar la seguridad y eficiencia de las operaciones en la industria del gas y petróleo, así como el desarrollo de tecnologías más sostenibles.

Uno de los principales desafíos en la investigación de catalizadores liposolubles es la escasez de estudios que analicen específicamente cómo estos catalizadores interactúan con los aceros al carbono. Los aceros al carbono son ampliamente utilizados en la industria del petróleo y gas debido a su resistencia y costo relativamente bajo. Sin embargo, su susceptibilidad a la corrosión en ambientes agresivos, como los que se encuentran en la extracción y procesamiento de hidrocarburos, plantea serias preocupaciones.

La falta de estudios específicos significa que no se comprende completamente cómo los catalizadores liposolubles pueden influir en la corrosión de estos materiales. Por ejemplo, es fundamental investigar si la presencia de catalizadores liposolubles puede acelerar o retardar la corrosión, así como identificar los productos de corrosión que se forman en estas interacciones. Un enfoque más detallado en esta área podría llevar a la formulación de estrategias de mitigación más efectivas y al desarrollo de recubrimientos protectores que integren catalizadores liposolubles.

Otro aspecto crítico que requiere atención es la comprensión de los mecanismos de corrosión a nivel molecular. Actualmente, la mayoría de los estudios se centran en observaciones macroscópicas, lo que limita la capacidad de los investigadores para identificar los factores que contribuyen a la corrosión en un nivel más fundamental.

La investigación a nivel molecular podría revelar cómo los catalizadores liposolubles afectan la cinética de las reacciones de corrosión, así como la formación de películas pasivas en la superficie de los metales. Además, comprender cómo las condiciones operativas, como la temperatura y la presión, influyen en estos mecanismos podría proporcionar información valiosa para optimizar el uso de catalizadores en entornos industriales.

La durabilidad de los materiales en condiciones operativas prolongadas es otro aspecto que necesita ser investigado más a fondo. En la industria del gas y petróleo, los equipos y materiales están expuestos a condiciones extremas durante períodos prolongados, lo que puede llevar a la degradación y falla de los materiales. Sin embargo, hay una escasez de datos que evalúen cómo los catalizadores liposolubles afectan la durabilidad de los aceros al carbono y otros materiales metálicos en estas condiciones.

Realizar estudios a largo plazo que evalúen la resistencia a la corrosión y la integridad estructural de los materiales tratados con catalizadores liposolubles en condiciones operativas reales es crucial. Estos datos no solo ayudarían a predecir la vida útil de los materiales, sino que también permitirían a los ingenieros diseñar sistemas más seguros y eficientes, minimizando el riesgo de fallas catastróficas.

5. Conclusiones

Esta revisión de la literatura, enfocada en el uso de catalizadores liposolubles en el recobro mejorado de crudos pesados y su influencia en la corrosión de aceros utilizados en la industria del

gas y petróleo, ha facilitado una exploración más profunda de las diversas investigaciones que son frecuentemente empleadas por investigadores de todo el mundo. Se resalta la identificación de las metodologías clave utilizadas, los resultados esperados y se permite examinar las diferentes variables implicadas en cada campo de investigación.

El uso de catalizadores liposolubles representa un gran aporte a la industria del gas y petróleo, facilitando los procesos de extracción. De acuerdo con los resultados obtenidos, se plantean las siguientes conclusiones:

De acuerdo con la literatura recopilada, se determinaron los beneficios del uso de un catalizador liposoluble en el proceso de recobro de crudo, influyendo en propiedades físicas y químicas cuya influencia facilita la interacción entre el vapor de agua y los compuestos del petróleo.

Entre los catalizadores liposolubles de base metálica utilizados en la industria del gas y del petróleo, el naftenato de hierro se distingue por presentar las mejores características catalíticas. Esta superioridad se manifiesta en una mayor eficiencia y calidad del producto final en comparación con otros catalizadores de base metálica.

La implementación de un proceso híbrido de inyección de vapor junto con catalizadores de base metálica promueve la formación de capas estables y químicamente resistentes en la superficie del acero, lo que refuerza su protección contra la corrosión.

6. Recomendaciones

Del presente trabajo de investigación surgen las siguientes recomendaciones a tener en cuenta:

Las investigaciones futuras, deben dar más profundidad a la investigación sobre la optimización de condiciones operativas y la caracterización de nuevos catalizadores para mejorar los procesos de recobro de crudos pesados.

La falta de estudios específicos sobre la interacción entre diferentes tipos de catalizadores y las condiciones ambientales, así como la necesidad de investigar más sobre los mecanismos de corrosión en ambientes específicos. Además, es necesario adoptar un enfoque más integral que contemple tanto la química de los catalizadores como su aplicación práctica en la industria, así como el análisis de los diferentes tipos de aceros al carbono utilizados en los sectores del gas y del petróleo.

Referencias Bibliográficas

- Alvarado, V., & Manrique, E. (2010). Enhanced oil recovery: An update review. *Energies*, 3(9), 1529–1575.
- Cui, G., Yang, Z., Liu, J., & Li, Z. (2019a). A comprehensive review of metal corrosion in a supercritical CO₂ environment. In *International Journal of Greenhouse Gas Control* (Vol. 90). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102814>
- Dong, X., Liu, H., Chen, Z., Wu, K., Lu, N., & Zhang, Q. (2019). Enhanced oil recovery techniques for heavy oil and oilsands reservoirs after steam injection. In *Applied Energy* (Vol. 239, pp. 1190–1211). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.244>
- Fan, H. F., Liu, Y. J., & Zhong, L. G. (2002). Studies on the synergetic effects of mineral and steam on the composition changes of heavy oils. *Energy and Fuels*, 15(6), 1475-1479.
- Gao, J., Zhao, X., & Wang, Y. (2022). Advances in the study of thermal recovery mechanisms for heavy oil reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109405.
- García Murillo, L. P. (2023). Efecto del proceso de inyección de vapor con naftenato de hierro y nafta sobre la corrosión del acero al carbono API-P110. Universidad Industrial de Santander.
- González, R., Martínez, L., & Silva, J. (2021). Liposoluble catalysts in heavy oil recovery: A sustainable alternative for the oil industry. *Journal of Petroleum Technology*, 73(5), 56–64.

- Hao, H.-r., Su, H.-j., Chen, G., Zhao, J., & Hong, L. (2015). Viscosity reduction of heavy oil by aquathermolysis with coordination complex at low temperature. *The Open Fuels & Energy Science Journal*, 8, 93-98.
- Hart, A. (2014). Corrosion in oil and gas production: Understanding and mitigating material degradation. *Corrosion Science*, 85, 1–16.
- Hyne, J. B. (1986). Aquathermolysis: A synopsis of work on the chemical reaction between water (steam) and heavy oil sands during simulated steam stimulation. In *AOSTRA Publication Series (Vol. 50)*. AOSTRA Publication Series.
- Jiang, S., Liu, X., Liu, Y., & Zhong, L. (2005). In situ upgrading heavy oil by aquathermolytic treatment under steam injection conditions. Society of Petroleum Engineers Inc. SPE 91973.
- Kapadia, P. R., Kallos, M. S., & Gates, I. D. (2015). A review of pyrolysis, aquathermolysis, and oxidation of Athabasca bitumen. *Fuel Processing Technology*, 131, 270–289. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.11.027>
- Li, C., & Wang, H. (2019). Challenges and opportunities in the development of heavy oil reservoirs. *Fuel*, 245, 370–378.
- Li, Y., Zhang, J., & Xu, Y. (2021). Global heavy oil reserves and production trends: A review. *Energy Reports*, 7, 1821–1833.
- Muraza, O., & Galadima, A. (2015). Aquathermolysis of heavy oil: A review and perspective on catalyst development. *Fuel*, 157, 219-231.
- Nares, C. A., et al. (2006). Comparative study of several non-commercial catalysts based on iron and molybdenum. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 50(1-2), 1-10.

- Pérez, A., & Gómez, F. (2020). Economic viability of enhanced oil recovery methods in mature fields. *Energy Policy*, 139, 111333.
- Poveda, J. C., & Molina, D. R. (2012). Average molecular parameters of heavy crude oils and their fractions using NMR spectroscopy. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 84–85, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.01.001>
- Ramírez, J., González, M., & Pérez, L. (2020). Avances en métodos térmicos para la recuperación mejorada de petróleo: Inyección de vapor y combustión in situ. *Revista de Ingeniería Petrolera*, 35(2), 123-145.
- Salas-Chía, J., & Núñez, P. (2023). Liposoluble catalysts and their impact on corrosion in high-pressure environments. *Materials Science and Engineering*, 596, 123456.
- Sánchez Beltrán, M. F., & Suárez Santamaría, J. P. (2023). Análisis del comportamiento de las propiedades fisicoquímicas de crudos. Universidad Industrial de Santander.
- Shah, A., Fishwick, R., Leeke, G., Rigby, S., & Greaves, M. (2010a). A review of novel techniques for heavy oil and bitumen extraction and upgrading. *Energy & Environmental Science*, 3(6), 700–714.
- Shenoy, P., kedimar, N. , & Rao, S. A. (2024). A comprehensive review on anticorrosive behaviour of surfactants across diverse metals using multiple techniques: Current insights and future horizons: *Chemical Engineering Journal Advances*, 100645. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2024.100645>
- Speight, J. G. (2019). Heavy and extra-heavy oil upgrading technologies. Gulf Professional Publishing.