

Revisión Bibliográfica de los Bioinhibidores Utilizados para Prevenir la Corrosión en Tuberías  
de Acero API 5LX

Karla Juliana Zúñiga Archila y Juan Pablo Espinel Vesga

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Director

Bianeth García Barrios

Bióloga

Codirector

Darío Yesid Peña Ballesteros

Ph.D. en Corrosión

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

*Este proyecto tiene una razón principal de ser, mi mamá, Audrey Vesga, quien con su paciencia y amor me guiaron durante todos estos años, su sacrificio y entrega han sido invaluable, agradezco toda la formación, los valores brindados, su labor como padre y madre, y sobre todo su ejemplo como persona y la calidad humana por la que siempre se ha caracterizado. También dedico este proyecto a mis abuelos, quienes siempre han estado presentes, me brindaron su amor incondicional y nunca han dudado de mí, son una parte fundamental de mi existencia y aunque mi abuelo ya no esté físicamente su memoria y enseñanzas me acompañarán toda la vida. Finalmente, quiero dedicar este proyecto a mi novia, Danna Silva, tú apoyo y aliento han sido un motor en mi vida, sin tú infinito amor, paciencia y motivación no hubiera sido posible superar los obstáculos en el camino, este logro también es de ustedes.*

**Juan Pablo Espinel Vesga**

*Dedico este proyecto con todo mi amor a mis padres, Rocio Archila Rueda y Alberto Zúñiga Cancino, quienes han sido el pilar de mi vida. Por su apoyo incondicional, por su esfuerzo y por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba.*

*A mi hermano John y a mis sobrinos Santiago y Heidy, por estar presentes en cada momento y llenar mi vida de alegría y motivación.*

*A Miguel, por su compañía, por animarme a seguir adelante y por caminar a mi lado en este proceso. Tu presencia ha sido fundamental.*

*A mi fiel compañero Yeiko, quien con su silenciosa lealtad me acompañó en incontables noches de estudio. Su amor incondicional y compañía me brindaron paz en medio del cansancio.*

*A todos ustedes, por caminar a mi lado. Esta meta también les pertenece.*

***Karla Juliana Zúñiga Archila***

### **Agradecimientos**

*Quiero agradecerle a Dios y a mi familia, en especial a mi mamá y abuelos, gracias por estar siempre presentes y apoyarme en cada paso que doy en el camino. Gracias a mi mamá Paty, a mi hermana Paula por escucharme y entenderme siempre, a Danna y doña Paola por su cariño, apoyo incondicional, por ser mi familia fuera de casa.*

*A los grandes amigos que me he hecho en el camino, José, Lina, el profe Yofre y todos aquellos que hicieron los días más amenos y este camino mucho más agradable, infinitas gracias por su apoyo incondicional, su amistad sincera y por los gratos recuerdos. A Karla Zúñiga, mi compañera de tesis, por su paciencia, dedicación y resiliencia durante este proceso, gracias por toda la dedicación y el tiempo invertido para sacar adelante este proyecto. Finalmente, quiero agradecer a la universidad, por todas las enseñanzas brindadas, sus espacios, su calidad humana, las experiencias adquiridas, su excelente formación me ha permitido superarme. Gracias a mis profesores de tesis, a la profe Bianeth, quien nos ha guiado durante este proceso y al profe Darío, sus conocimientos han sido muy importantes para llegar aquí.*

**Juan Pablo Espinel Vesga**

*En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme la sabiduría, la fortaleza y la perseverancia para culminar este proceso.*

*Agradezco profundamente a mis padres, a mi hermano John y a mi nona Nelly, por ser ejemplo de disciplina y responsabilidad, además por concederme el privilegio de estudiar. A Miguel, por ayudarme a superar los obstáculos con paciencia y amor, por no dudar de mis capacidades, este logro lleva su huella.*

*A mis compañeros y colegas, por los momentos compartidos, el apoyo mutuo en cada etapa y por hacer de esta experiencia algo único.*

*A mi compañero de tesis, Juan Pablo Vesga, por su compromiso, apoyo constante y dedicación. Fue una experiencia de aprendizaje compartido que valoro profundamente.*

*Agradezco a la Universidad Industrial de Santander por haber sido escenario donde no solo adquirí conocimientos, sino también experiencias valiosas que marcaron mi vida.*

*Agradezco también a mi directora de tesis Bianeth García y co-director Darío Peña, por su orientación académica y valiosos aportes en el desarrollo de esta investigación.*

*Finalmente, a mí misma, por no rendirme, por seguir adelante a pesar de las adversidades.*

*Por cada pequeño logro celebrado en silencio y por confiar en que todo esfuerzo valdría la pena.*

***Karla Juliana Zúñiga Archila***

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Estado del arte.....	14
2. Objetivos .....	18
2.1 Objetivo general.....	18
2.2 Objetivos específicos .....	18
3. Metodología .....	19
3.1 Búsqueda de la información.....	20
3.2 Selección y compilación de la información .....	21
3.3 Análisis de la información .....	22
4. Resultados y discusión.....	23
4.1 Resultados protocolo PRISMA.....	23
4.2 Análisis bibliométrico.....	25
4.3 Tipos de bioinhibidores en aceros API 5LX.....	27
4.3.1 Extractos vegetales naturales .....	29
4.3.2 Nanopartículas verdes .....	30
4.3.3 Biopolímeros naturales .....	31
4.3.4 Sintéticos verdes .....	32
4.3.5 Surfactantes.....	32
4.3.6 Molécula orgánica.....	33
4.4 Mecanismos electroquímicos y tipo de adsorción .....	33

4.5 Medición de la corrosión .....	34
4.6 Factores influyentes en la eficiencia de inhibición .....	35
4.7 Inhibidores químicos convencionales frente a bioinhibidores: desempeño, impacto ambiental y desafíos.....	40
4.8 Cítricos como inhibidores de corrosión .....	43
5. Conclusiones .....	47
6. Recomendaciones .....	48
Referencias Bibliográficas .....	49

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Ecuaciones de búsqueda .....	20
Tabla 2. Criterios de elegibilidad.....	21
Tabla 3. Resultados obtenidos por cada ecuación y base de datos .....	23
Tabla 4. Características de los Bioinhibidores aplicados a aceros API 5LX: condiciones y eficiencia.....	36
Tabla 5. Rendimiento de inhibidores convencionales sobre aceros API.....	42
Tabla 6. Comparativa de extractos cítricos como bioinhibidores en medios ácidos .....	44
Tabla 7. Efecto de temperatura y adsorción en inhibidores cítricos .....	45

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama metodológico del proyecto .....	19
Figura 2. Diagrama de flujo método PRISMA del proyecto .....	24
Figura 3. Mapa de distribución geográfica de los autores de los artículos seleccionados .....	25
Figura 4. Cantidad de publicaciones realizadas por país en el período (2014-2025) .....	26
Figura 5. Mapa bibliométrico de palabras clave mediante VOSviewer .....	27
Figura 6. Tipos de bioinhibidores según su origen y naturaleza aplicados en aceros API 5LX...	28
Figura 7. Comparación entre inhibidor convencional y bioinhibidor.....	40

## Glosario

**AFM:** Microscopía de fuerza atómica

**$\beta_a$ :** Pendiente Tafel anódica, indica la velocidad de la reacción de oxidación del metal

**$\beta_c$ :** Pendiente Tafel cátodica, indica la velocidad de la reacción de reducción del metal

**Corrosión:** Proceso electroquímico que afecta la integridad estructural del material evidenciándose en la pérdida de peso o rotura de este.

**$E_{corr}$ :** Potencial de corrosión

**EDX:** Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X

**FTIR:** Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier

**HCl:** Ácido clorhídrico

**$H_2SO_4$ :** Ácido Sulfúrico

**$i_{corr}$ :** Densidad de corriente de corrosión

**NaCl:** Cloruro de sodio

**NaOH:** Hidróxido de sodio

**SEM:** Microscopía Electrónica de Barrido

**XPS:** Espectroscopía de Fotoelectrones Emitidos por Rayos X

**XDR:** Difracción de Rayos X

## Resumen

**Título:** Revisión bibliográfica de los bioinhibidores utilizados para prevenir la corrosión en tuberías de acero API 5LX\*

**Autor:** Karla Juliana Zúñiga Archila, Juan Pablo Espinel Vesga\*\*

**Palabras Clave:** Bioinhibitors, Corrosion, Pipelines, Steel, API 5LX

### Descripción:

La corrosión en tuberías de acero API 5LX representa un desafío técnico y económico en la industria del petróleo y gas, debido a condiciones agresivas a las que se encuentran expuestas. Tradicionalmente, para mitigar este fenómeno se han empleado inhibidores químicos; sin embargo, su toxicidad, baja biodegradabilidad y efectos negativos en la salud humana han motivado la búsqueda de alternativas más sostenibles. En este estudio, se llevó a cabo una revisión de literatura de 528 artículos mediante la metodología PRISMA por título y resumen y 57 artículos con revisión completa, se identificaron inhibidores a partir de compuestos naturales con potencial anticorrosivo, ecológicos y aplicables industrialmente. Se reportan seis grupos de bioinhibidores a partir de: extractos vegetales, nanopartículas verdes, biopolímeros naturales, sintéticos verdes, biosurfactantes y molécula orgánica, el grupo más destacado fueron los extractos vegetales naturales. Se registraron los factores principales que influyen en la efectividad de estos, tales como: el medio, la temperatura, la concentración del inhibidor, entre otros. Adicionalmente, se realizó una comparación frente a los inhibidores convencionales, en los que se analizaron sus ventajas y desventajas respectivamente, por último, se evaluó la aplicación de compuestos cítricos, la cual se vio limitada debido a la poca disponibilidad de estudios en el acero API 5LX. En este sentido, es importante resaltar la viabilidad de los bioinhibidores, su alta efectividad que en muchos casos fue superior al 90%, aunque es necesario reconocer los desafíos de su efectividad en altas temperaturas y la falta de estudios respecto a condiciones dinámicas más reales.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Bianeth García Barrios. Bióloga. Codirector: Darío Yesid Peña Ballesteros. PhD. en Corrosión

### Abstract

**Title:** Literature review of bioinhibitors used to prevent corrosion in API 5LX steel pipelines \*

**Authors:** Karla Juliana Zúñiga Archila, Juan Pablo Espinel Vesga \*\*

**Key Words:** Bioinhibitors, Corrosion, Pipelines, Steel, API 5LX

#### Description:

Corrosion in API 5LX steel pipes represents a technical and economic challenge in the oil and gas industry, due to the aggressive conditions to which they are exposed. Traditionally, chemical inhibitors have been used to mitigate this phenomenon; however, their toxicity, low biodegradability and negative effects on human health have motivated the search for more sustainable alternatives. In this study, a literature review of 528 articles was carried out using PRISMA methodology by title and abstract and 57 articles with complete review, inhibitors were identified from natural compounds with anticorrosive, ecological and industrially applicable potential. Six groups of bioinhibitors are reported from: plant extracts, green nanoparticles, natural biopolymers, green synthetics, biosurfactants and organic molecule, the most prominent group were natural plant extracts. The main factors influencing their effectiveness were recorded, such as: medium, temperature, inhibitor concentration, among others. Additionally, a comparison was made with conventional inhibitors, in which their advantages and disadvantages were analyzed, respectively. Finally, the application of citric compounds was evaluated, which was limited due to the limited availability of studies on API 5LX steel. In this sense, it is important to highlight the viability of bioinhibitors, their high effectiveness, which in many cases was higher than 90%, although it is necessary to recognize the challenges of their effectiveness at high temperatures and the lack of studies regarding more realistic dynamic conditions.

---

\* Work of Grade

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Bianeth García Barrios. Bióloga. Codirector: Darío Yesid Peña Ballesteros. PhD. en Corrosión

## Introducción

El acero API 5LX es una designación estándar del *American Petroleum Institute* (API) (Díaz-Jiménez et al., 2024), es un acero al carbono ampliamente utilizado en la industria del petróleo y gas, esencial para la construcción de tuberías de oleoductos y gasoductos (Ghareba & Omanovic, 2010). La clasificación de los aceros API 5LX se da por medio de grados que hacen referencia a su límite mínimo de resistencia a la tracción, que, en el caso de una tubería API 5L X65 corresponde a 448 MPa (65 ksi)(Soudani et al., 2018). Otros grados ampliamente usados son API X70, X80, X100 (Bahgat Radwan et al., 2017), estas aleaciones son adecuadas para soportar altas presiones y temperaturas (Capelle et al., 2013).

A pesar de sus propiedades mecánicas favorables, el acero API 5LX se encuentra expuesto a medios altamente agresivos (salinos,  $H_2S$ ,  $CO_2$ ), este último representa el 25% de los incidentes relacionados con seguridad (Ghareba & Omanovic, 2010) y a otras condiciones como el pH, la temperatura y la composición del suelo influyen en el desarrollo de la corrosión (Díaz-Jiménez et al., 2024). Los tipos de corrosión más comunes evidenciados en los aceros API 5LX son la corrosión uniforme, corrosión localizada (picaduras), corrosión bajo tensión y corrosión influenciada microbiológicamente (MIC) (Kolawole et al., 2018).

Se han estimado pérdidas económicas globales que superan los 60 mil millones de dólares anuales, según la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión (NACE) (S. Umoren, 2020), equivalente al 3,4% del producto interno bruto (PIB) mundial (Díaz-Jiménez et al., 2024) producto de la corrosión en diferentes tipos de aceros entre los que se incluyen los API. Con el fin de mitigar estos daños, se han utilizado métodos integrados como recubrimientos, revestimientos, protección

catódica, inhibidores, etc (Kolawole et al., 2018). Entre estos, los inhibidores químicos han sido ampliamente usados debido a su bajo costo y operación simple, entre los que se destacan benzimidazol (Tang et al., 2013), benzotriazol (Recloux et al., 2018), e imidazol (Smitha et al., 2018). Sin embargo, presentan toxicidad elevada, baja biodegradabilidad y efectos adversos para la salud humana (Shang & Zhu, 2021 y Soudani et al., 2018).

Debido a lo anterior, se han incrementado los estudios de alternativas sostenibles obtenidas a partir de extractos vegetales y aceites esenciales, como el extracto de *Chenopodium ambrosioides* (Bammou et al., 2014), extracto de hojas de *Lagerstroemia speciosa* (Mobin et al., 2019) y hojas de *Diospyrus kaki* (Gerengi et al., 2016), que han demostrado eficacia superior al 90% en medios ácidos y evaluados en acero al carbono, acero dulce y acero St37 respectivamente, que cuentan con un menor impacto ambiental y son denominados bioinhibidores (Km et al., 2024).

En este sentido, el objetivo del presente estudio consistió en realizar una revisión bibliográfica sobre el uso de bioinhibidores, con el propósito de identificar tendencias, avances y desafíos en su aplicación para la protección de aceros API 5LX frente a la corrosión. Por esta razón, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué tipo de bioinhibidores se han implementado para la mitigación de la corrosión en aceros API 5LX?

## 1. Estado del arte

La industria del petróleo y gas sigue las especificaciones del Instituto Americano del Petróleo (API), una de las principales autoridades para la construcción de oleoductos y gasoductos.

En este contexto, los aceros de baja aleación y alta resistencia (HSLA) son ampliamente usados por su alta rentabilidad, excelentes propiedades mecánicas y alta tenacidad (Han et al., 2021 y Golchinvafa et al., 2020). Sin embargo, se estima que las pérdidas económicas anuales por corrosión en la industria del petróleo y gas alcanzan 589 millones de dólares en tuberías de superficie e instalaciones, y otros 463 millones corresponden a tuberías de fondo de pozo (Pérez, 2013).

Finšgar & Jackson (2014) afirman que el control inadecuado de la corrosión puede causar impactos sociales negativos, contaminación de recursos hídricos y medio ambiente. Un caso crítico fue expuesto por Verma et al. (2018) donde una explosión en México, causada por corrosión en una alcantarilla, provocó más de 200 muertes y generó pérdidas económicas superiores a 75 millones de dólares. Otras fallas asociadas a procesos corrosivos mal gestionados han sido evidenciadas en refinerías como Golden Eagle en 2009, Regina en 2011, Richmond y Chevron en 2012, ocasionaron graves consecuencias económicas y ambientales (Al-Moubaraki & Obot, 2021).

Para contrarrestar la corrosión, se han utilizado varios métodos de control como protección catódica, recubrimientos anticorrosivos y el uso de inhibidores de corrosión, estos últimos se han considerado una de las soluciones más prácticas y rentables, que en el año 2019 alcanzaron un valor de 7,2 mil millones de dólares y cuentan con una proyección de crecimiento de 9,6 mil millones para el año 2026 (Chauhan et al., 2021). A pesar de su crecimiento y alta eficiencia en entornos salinos, T. Hu et al., (2015) y Shang & Zhu, (2021) consideran que los inhibidores presentan desventajas en cuanto a su alta toxicidad y baja biodegradabilidad, que puede causar daños irreversibles al medio ambiente durante su síntesis y aplicación. Además, Finšgar & Jackson, (2014) realizaron una revisión de la literatura de inhibidores de aceros en medios ácidos en la que identificaron compuestos orgánicos que no cumplen con los requisitos de la comisión de

Oslo y París, ya que sus principales ingredientes activos pueden ser perjudiciales si se vierten al medio ambiente.

En lo referente al desarrollo de bioinhibidores, Parthipan et al., (2017) reveló que *Azadirachta indica* puede actuar como inhibidor de corrosión ecológico eficiente con propiedades biocidas para el control de la corrosión microbiológicamente influenciada (MIC) en acero al carbono API 5LX en un entorno hipersalino. Otras investigaciones realizadas a partir derivados de plantas como *Tragia plukenetti* contaron con una eficiencia de 88% a 500 ppm para acero dulce (MS) y la medición de la polarización mostró que este extracto actúa como un buen inhibidor tipo mixto (Prabakaran et al., 2016), y por su parte Gobara et al., en el 2015 utilizó el látex de *Calotropis gigantea* para mitigar la corrosión del acero al carbono en una solución de 0,5M  $H_2SO_4$ , en la que alcanzó una eficiencia de 97% y concluyó que su adsorción sobre la superficie del acero fue espontánea y exotérmica, el modelo se ajustó a la isoterma de Langmuir observando que obedecía al mecanismo de fisisorción.

Por otra parte, Tantawy et al. (2020) realizó un estudio de tres surfactantes catiónicos naturales a base de *Piper nigrum*, en el que se analizó como el potencial inhibidor mejoró con el aumento de la dosis del inhibidor, alcanzando un máximo del 98,9% para el acero C1018 en NaCl saturado con  $CO_2$ , este resultado fue evaluado mediante métodos electroquímicos y computacionales. Usman et al. (2019) estudiaron el ácido 2-tiobarbitúrico como un inhibidor de corrosión dulce para acero API 5L X60 en medio dulce de campo petrolífero, en donde un aumento en el tiempo de inmersión de 2 a 72 horas produjo un incremento en las eficiencias de inhibición del 96,3% al 98,5% en presencia de  $50 \text{ mgL}^{-1}$  de la concentración del inhibidor.

Ansari et al. (2020) han investigado otro tipo de bioinhibidores, al sintetizar una base de Schiff mediante la reacción de quitosano con salicilaldehído (SCSB) usado por primera vez como

inhibidor de corrosión para el acero J55. Mientras que Onyeachu et al. (2021) investigaron el medicamento vencido de clorhidrato de metformina en la superficie del acero C1018, en la que ambos lograron eficiencias superiores al 90% a concentraciones inferiores a  $200 \text{ mgL}^{-1}$ .

Recientes revisiones bibliográficas han profundizado el uso de inhibidores para la protección del acero API en distintos entornos corrosivos. Díaz-Jiménez et al. (2024) y Yeganeh et al. (2025) coinciden en que el desarrollo de inhibidores orgánicos, naturales y sintéticos como extractos vegetales, líquidos iónicos, nanopartículas y fármacos representan un enfoque creciente en alternativas ecológicas por su menor impacto ambiental. Además de compartir los mismos métodos electroquímicos y computacionales al ser evaluados.

Finalmente, Chauhan et al. (2021) destacan la urgencia de reemplazar inhibidores convencionales, como las imidazolinas, debido a su toxicidad, costos elevados y limitada estabilidad térmica en condiciones de corrosión dulce, por esta razón, los extractos vegetales, biopolímeros, surfactantes verdes y oleoquímicos han cobrado relevancia como compuestos más sostenibles. En esta misma línea, Shang & Zhu, (2021) enfatizan el potencial de los inhibidores verdes a partir de extractos de plantas, ricos en grupos funcionales activos, que permiten la formación de capas protectoras sobre el acero. A pesar de las ventajas, ambos autores reconocen los desafíos relacionados a la estabilidad, reproducibilidad y aplicación industrial.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Realizar una revisión bibliográfica sobre el uso de bioinhibidores como estrategia de mitigación de la corrosión en tuberías de acero API 5LX.

### **2.2 Objetivos específicos**

Identificar los principales tipos de bioinhibidores usados en la industria para el control de la corrosión en aceros API 5LX.

Describir los factores que contribuyen a la efectividad del uso de bioinhibidores respecto a la velocidad de corrosión en aceros API 5LX.

Comparar el rendimiento de los bioinhibidores a partir de extractos naturales frente a inhibidores químicos convencionales.

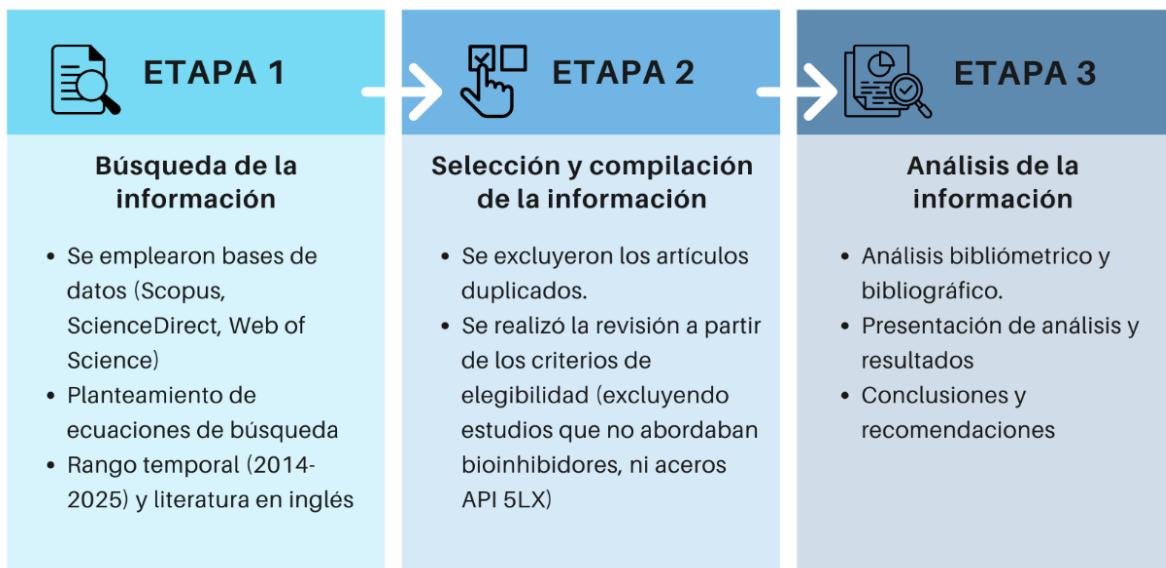
Evaluar la aplicación de bioinhibidores cítricos en la corrosión de aceros API 5LX.

### 3. Metodología

Esta revisión bibliográfica se desarrolló siguiendo las pautas metodológicas establecidas en la declaración PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (Page et al., 2021). El proceso se estructuró en tres etapas principales: La primera consistió en la búsqueda de información mediante la formulación de la pregunta de investigación y la selección de búsqueda sistemática de artículos. En la segunda etapa se llevó a cabo la selección y compilación de la información según los criterios de elegibilidad establecidos. Finalmente, en la tercera etapa se desarrolló el análisis de la información a partir de los datos recolectados de los artículos y se presentaron los resultados obtenidos (figura 1).

**Figura 1.**

*Diagrama metodológico del proyecto*



### 3.1 Búsqueda de la información

En esta etapa se seleccionaron tres bases de datos dentro del catálogo bibliográfico de la Universidad Industrial de Santander: Scopus, ScienceDirect y Web of Science. Se realizó una búsqueda inicial con tres ecuaciones utilizando palabras claves como “API”, “Steel”, “Bioinhibitors”, “Corrosion”, “Pipelines”, cada una de las palabras claves usaron combinación con los operadores Booleanos “AND”, “OR”, mostradas en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Ecuaciones de búsqueda*

<b>Ecuación de búsqueda</b>	
1	("bio-inhibitor" OR "green corrosion inhibitor") AND ("corrosion") AND ("API" OR "pipeline")
2	("API" OR "steel pipelines") AND corrosion AND ("bioinhibitors" OR "eco-friendly inhibitors" OR "green corrosion inhibitors")
3	("bioinhibitor" OR "natural inhibitor" OR "plant extract" OR "citrus extract") AND ("corrosion" OR "corrosion protection") AND ("API" OR "steel pipeline")

A partir de las ecuaciones de búsqueda seleccionadas, se filtró la información comprendida en el período de tiempo entre los años 2014 – 2025, además, se aplicaron filtros por tipo de publicación en donde se seleccionaron artículos de investigación en inglés, rechazando otros tipos de publicaciones como capítulos de libros, resúmenes de conferencias, artículos de datos, comunicaciones breves, entre otros.

### 3.2 Selección y compilación de la información

En esta sección se realizó una descarga de la información obtenida a partir de las tres ecuaciones de búsqueda de la Tabla 1, mediante el formato Bibtex el cual contenía información como título, autores, resumen y palabras claves. Los formatos Bibtex se unificaron para facilitar el análisis, seguido de esto, los resultados fueron cargados a la plataforma Rayyan (Ouzzani et al., 2016) en simultáneo con el gestor de referencias Zotero versión 7.0 (Zotero, s. f.) en donde se realizó el primer filtro para eliminar los duplicados.

Luego, se procedió a realizar una revisión inicial por título y resumen considerando los criterios de elegibilidad establecidos en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

*Criterios de elegibilidad*

<b>Criterios de inclusión</b>	<b>Criterios de exclusión</b>
Todo estudio que corresponda a bioinhibidores (extractos, cítricos, plantas) de corrosión aplicados en aceros API 5LX	Inhibidores no biológicos (fosfatos, cromatos, nitratos, molibdatos, depuradores y biocidas)
Estudios correspondientes a artículos científicos	Estudios que corresponda a revisiones, libros, blogs, foros y páginas web
Artículos originales con enfoque experimental	Estudios que usan otros tipos de materiales como: acero dulce, acero al carbono, P110, Q235, aluminio, cobre, entre otros que no sean API5LX
Disponibilidad (acceso abierto y documento completo)	Estudios no aplicables al contexto (fármacos, hormigón armado, etc)

Una vez aplicada la primera revisión por título y resumen a partir de los criterios de inclusión y exclusión, se desarrolló una lectura profunda de los artículos completos, dando lugar a los artículos finales a ser estudiados.

### 3.3 Análisis de la información

La información descargada desde Rayyan en formato CSV fue sintetizada en una matriz bibliográfica en Excel versión 2108 (*Microsoft Excel LTSC 2021*, 2021) que incorporó criterios como: año de publicación, resumen, título, autores y país de origen. A partir de esta información se realizó un mapa de distribución geográfica por número de publicaciones y un gráfico de países por número de estudios en el período de tiempo seleccionado. Además, por medio de la plataforma gratuita VOSviewer (versión 1.6.20) (van Eck et al., 2025) se identificó las relaciones entre coautoría y palabras claves.

Posterior a la selección y organización de la información se clasificaron los distintos tipos de bioinhibidores evaluados en aceros API 5LX, descritos según su origen y naturaleza. Así mismo, se describieron los mecanismos electroquímicos y tipos de adsorción los cuales son fundamentales y se encuentran directamente relacionados con los factores principales que influyen en la eficiencia de la inhibición de la corrosión, como lo son: la temperatura, la concentración, el medio y las técnicas, mediante las cuales se mide la eficiencia de cada bioinhibidor, entre otros. Adicionalmente, se llevó a cabo una comparación entre los inhibidores convencionales y los bioinhibidores, identificando sus ventajas y desventajas en cuanto a disposición, replicabilidad, biodegradabilidad. Por último, se realizó un seguimiento del avance científico y su aplicación respecto a bioinhibidores derivados de cítricos utilizados en la prevención de la corrosión de los aceros API 5LX.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Resultados protocolo PRISMA

La búsqueda arrojó un total de 831 resultados, de los cuales 303 artículos se identificaron como duplicados y fueron eliminados, obteniendo un total de 528 artículos que fueron revisados por título y resumen. En la herramienta Rayyan se llevó a cabo la verificación manual de los artículos, organizados en dos grandes grupos (incluidos y excluidos) (tabla 3).

**Tabla 3.**

*Resultados obtenidos por cada ecuación y base de datos*

Ecuación de búsqueda	Scopus	Web of Science	ScienceDirect	Total
("bio-inhibitor" OR "green corrosion inhibitor") AND ("corrosion") AND ("API" OR "pipeline")	63	15	372	450
("API" OR "steel pipelines") AND corrosion AND ("bioinhibitors" OR "eco-friendly inhibitors" OR "green corrosion inhibitors")	63	1	54	118
("bioinhibitor" OR "natural inhibitor" OR "plant extract" OR "citrus extract") AND ("corrosion" OR "corrosion protection") AND ("API" OR "steel pipeline")	11	9	155	175
Estudios totales				<b>831</b>

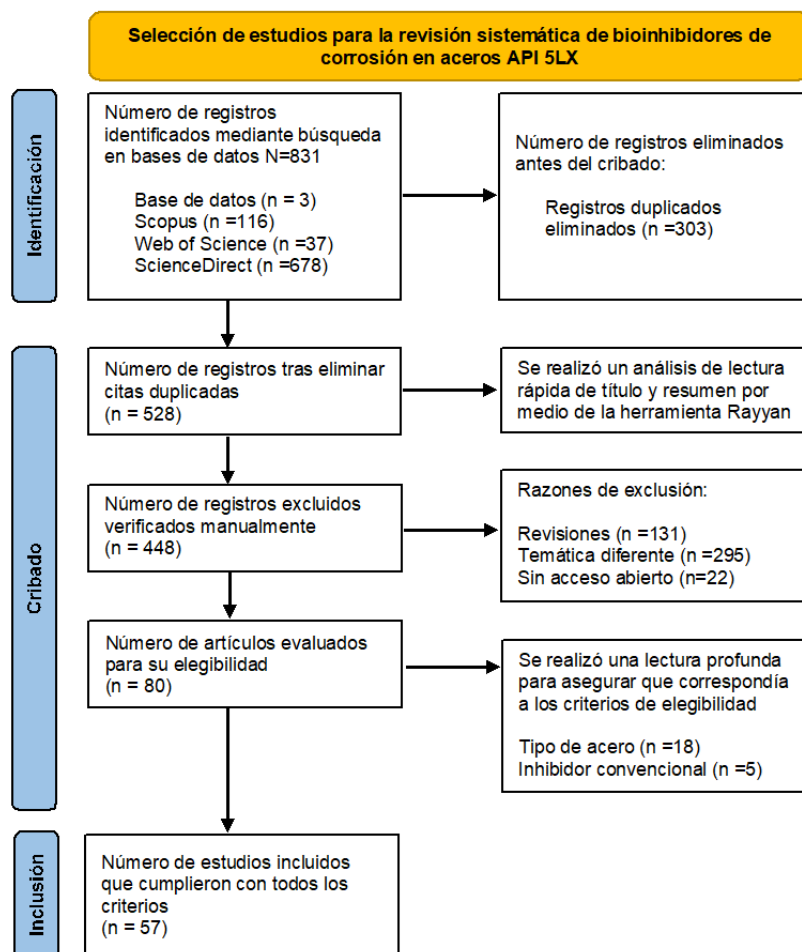
Los artículos excluidos fueron divididos en los siguientes subgrupos: tipo de publicación (revisiones) correspondiente a 131, temática diferente (materiales diferentes a API, inhibidores de origen no biológico), se eliminaron 295, y por último 22 artículos sin acceso, correspondientes a

aquellos que no cuentan con resumen, y no tienen acceso abierto. Dando como resultado la eliminación de 448 artículos.

Por otra parte, 80 artículos fueron evaluados mediante una lectura profunda en la que 18 de estos se descartaron porque no correspondían al acero API 5LX y 5 fueron descartados por ser inhibidores convencionales, dando lugar a 57 artículos incluidos. En la Figura 2, se observa el diagrama de la aplicación del protocolo PRISMA.

**Figura 2.**

*Diagrama de flujo método PRISMA del proyecto*



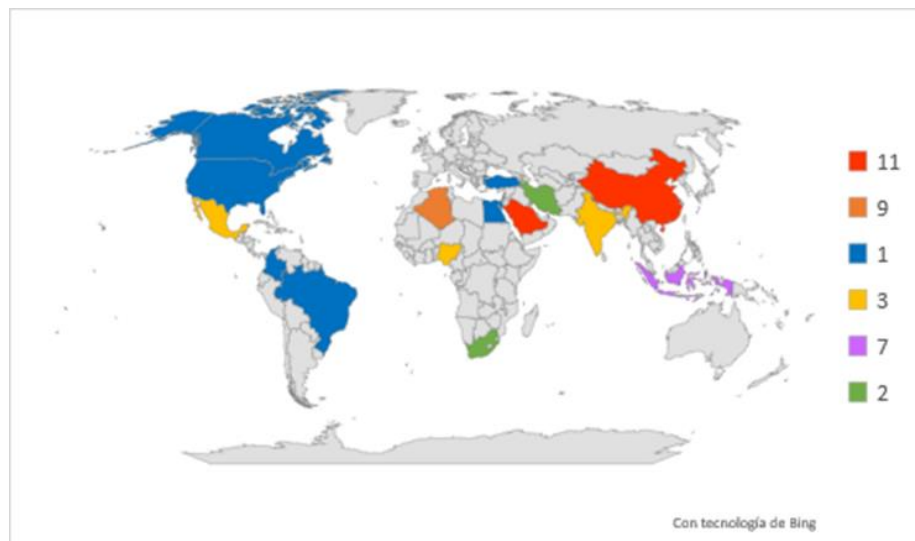
## 4.2 Análisis bibliométrico

A partir de los 57 artículos seleccionados se utilizó la herramienta Excel para elaborar el mapa de distribución geográfica de la cantidad de artículos publicados a nivel mundial.

En la Figura 3 se observa que los países de Brasil, Canadá, Colombia, Egipto, Estados Unidos y Turquía cuentan con 1 publicación y son representados por el color azul, además de que los países Irán y Sudáfrica, cuentan con 2 publicaciones cada uno representados por el color verde. A pesar de que los países anteriormente mencionados son grandes productores de petróleo, su bajo número de publicaciones se debe principalmente a su preferencia por tecnologías comerciales consolidadas y a una menor inversión en investigación de alternativas sostenibles.

### Figura 3.

*Mapa de distribución geográfica de los autores de los artículos seleccionados*



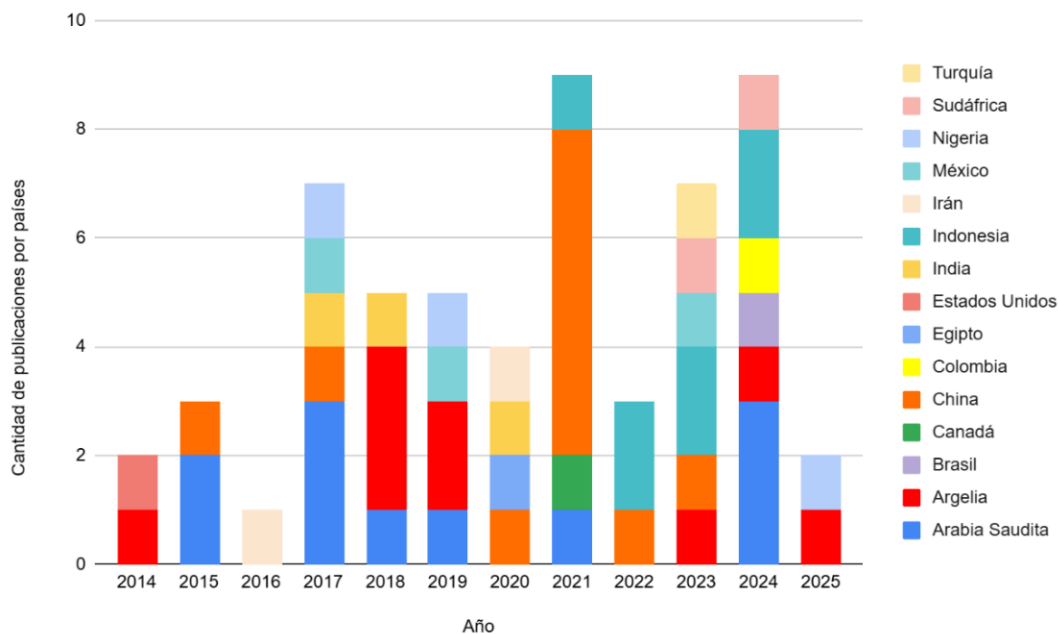
De la misma manera, se evidencia que los países que cuenta con mayor número de publicaciones son Arabia Saudita y China con 11 cada uno, señalados con el color rojo. En Arabia

Saudita, esto se relaciona con la necesidad de proteger infraestructuras petroleras en ambientes altamente corrosivos, lo que impulsa la investigación en soluciones sostenibles (Al-Otaibi et al., 2014). En el caso de China, el aumento en publicaciones se asocia con políticas ambientales más estrictas y el aprovechamiento de recursos naturales para desarrollar bioinhibidores (Zakeri et al., 2022).

De forma complementaria, en la Figura 4 se presentan las publicaciones realizadas en el período comprendido entre los años 2014 y 2025 por los distintos países.

**Figura 4.**

*Cantidad de publicaciones realizadas por país en el período (2014-2025)*



En último lugar, producto del análisis correspondiente a la relación entre las palabras clave usadas con más frecuencia se encontraron: *green corrosion inhibitors*, *pipeline corrosion*, *corrosion inhibitors* y *steel corrosion*. Por medio de la Figura 5, se observa que, el clúster rojo se



vegetales naturales, nanopartículas verdes, biopolímeros naturales, sintéticos verdes biosurfactantes y moléculas orgánicas (Tabla 4).

**Figura 6.**

*Tipos de bioinhibidores según su origen y naturaleza aplicados en aceros API 5LX*

<b>Tipo de inhibidor</b>	<b>Nombre común</b>	<b>Forma / Extracto</b>	<b>Referencias</b>
Extractos vegetales naturales	Ajo	Extracto acuoso del bulbo	(Parthipan et al., 2018)
	Morinda (noni)	Extracto metanólico de fruto	(Royani et al., 2024)
	<i>Ruta chalepensis</i>	Extracto natural de flores	(Soudani et al., 2018)
	<i>Trifolium repens</i>	Extracto vegetal de diclorometano	(Nour El Houda et al., 2024))
	<i>Moringa oleifera</i>	Extracto de hojas	(Didouh et al., 2023)
Nanopartículas verdes	AgNPs (anacardo)	Nanopartículas de Ag biosintezadas con extracto de hojas	(Eduok et al., 2021)
	AgNPs y ZnNPs (baobab)	Np de Ag y Zn biosintezadas con extracto de hojas	(Olanrewaju y Olaseinde, 2025)
	AgNPs (cebolla roja)	Nanocompuesto de AgNPs vía extracto acuoso de cáscaras de cebolla	(Ituen et al., 2021)
	NP de Cu (cebolla roja)	Nanocompuesto de Cu biosintetizado con extracto de cebolla	(Ituen et al., 2020)
Biopolímeros naturales	Aliganato de sodio	Polisacárido natural (algas marinas)	(Obot, Onyeachu, et al., 2017)
	Pectina	Polisacárido vegetal (manzana)	(Umoren et al., 2015))
	Goma arábica	Polisacárido ramificado (acacia senegal)	(Bentrah et al., 2014)
	ADN	Ácido nucleico (salmón sperm)	(Hu et al., 2017)

	8-Hidroxiquinolina (8-HQ)	Compuesto (quinolina)	puro	(Obot, Ankah, et al., 2017)
	ALAR (adenina-L-alanina)	Derivado sintético aminoácido	de	(Hu et al., 2015)
Sintéticos verdes / derivados	Surfactante Gemini (aguacate)	Surfactante sintético (aceite vegetal)	no iónico	(Cruz-Zabalegui et al., 2019)
	b-CD-XG (xanthan β-CD)	Polímero modificado	vegetal	(Cao et al., 2021)
	b-CD-PAM (β-CD-poliacrilamida)	Polímero sintético derivado		(Wang et al., 2021)
Biosurfactantes	Rhamnolípidos	Biosurfactante microbiano (pseudomonas aeruginosa)		(Li et al., 2022)
	Caprilamidopropil betaína (CAPB)	Surfactante zwitteriónico		(Fouda et al., 2020)
Molécula orgánica	Guanina	Base nitrogenada purina		(Silva et al., 2024)

#### 4.3.1 Extractos vegetales naturales

Los extractos vegetales son inhibidores sostenibles y de fácil obtención, ya que solo requieren procesos básicos de extracción y purificación. Sin embargo, su principal limitación es la baja estabilidad y vida útil, pues son propensos al deterioro microbiano durante el almacenamiento, lo que compromete su eficacia a largo plazo (Chauhan et al., 2021).

Entre los extractos vegetales utilizados como agentes anticorrosivos, el ajo ha captado especial atención debido a su contenido de compuestos organosulfurados que han mostrado propiedades inhibitorias contra microorganismos cuyas propiedades han sido usadas en el control de la corrosión ácida (Parthipan et al., 2018).

En el caso del extracto metanólico acuoso de Morinda contiene alta cantidad de compuestos bioactivos (flavonoides, alcaloides, ácidos fenólicos, entre otros), capaces de interactuar con el metal y el medio ambiente para reducir la velocidad de corrosión (Royani et al.,

2024). Por otra parte, el extracto de *Ruta chalepensis L.*, proveniente de una especie de planta de origen mediterráneo con flores de la familia de los cítricos fue aplicado en un acero API 5L X65 y obtuvo una mejora significativa de las propiedades mecánicas atribuida a la formación de una película protectora que actúa como barrera, reduciendo la absorción de hidrógeno y así mitigando los efectos de la fragilización por hidrógeno (Soudani et al., 2018).

Así mismo, las hojas de Moringa contienen fuertes propiedades antioxidantes atribuidas a los compuestos fenólicos, flavonoides y carotenoides (Didouh et al., 2023) igual que *Trifolium repens* (trébol blanco) ha revelado una importante reserva de isoflavonoides, flavonoides y otros compuestos antioxidantes (Nour El Houda et al., 2024).

#### **4.3.2 Nanopartículas verdes**

Las nanopartículas verdes tienen tamaño entre 1-100 nanómetros. En aplicaciones anticorrosivas, han mostrado su capacidad para adsorberse eficientemente sobre superficies metálicas, permitiendo una cobertura más homogénea y duradera, en condiciones agresivas como medios ácidos o ambientes marinos (Yadav et al., 2024).

La investigación realizada por Eduok et al. (2021), aborda el nanomaterial de quitosano/GO (óxido de grafeno) basado en carbono para reducir la humedad en las películas nanocompuestos protectoras adsorbidas sobre el acero durante el proceso de inhibición de la corrosión, su eficacia y facilidad para sintetizar se debe a que sus unidades moleculares de glucosamina unidas a aminas permiten la introducción de grupos químicos reactivos útiles en estas moléculas. Adicionalmente, Olanrewaju y Olaseinde (2025) demostraron que las nanopartículas de plata (AgNP) y las nanopartículas de zinc (AgZnNP) tienen potencial como agentes

anticorrosivos, las AgNP ofrecen mayor eficiencia y estabilidad térmica, mientras que las AgZnNP presentan una resistencia a la corrosión mejorada para metales como el acero dulce.

Por otra parte, residuos alimenticios como la cáscara de cebolla roja están siendo utilizadas por su gran riqueza en fenólicos solubles en agua, así como taninos, saponinas, antaquinonas, flavonoides, terpenoides y glucósidos cardíacos que contribuyen de manera positiva a la protección del medio ambiente (Ituen et al., 2021 y Ituen et al., 2020).

#### ***4.3.3 Biopolímeros naturales***

Los biopolímeros naturales son macromoléculas producidas por organismos vivos, como plantas, animales o microorganismos, a partir de monómeros naturales como azúcares, aminoácidos o nucleótidos ((CIAD), s. f.). Los biopolímeros se caracterizan por ser biocompatibles, biodegradables, contienen baja toxicidad y buena solubilidad como es el caso del aliganoato de sodio, el cual es un polisacárido aniónico extraído de las paredes celulares de las algas marinas y la pectina que es un heteropolisacárido estructural presente en las paredes celulares primarias de las plantas terrestres, en su mayoría cítricas como las manzanas, y bayas (frambuesas y zarzamora) (Obot, Onyeachu, et al., 2017 y S. A. Umoren et al., 2015).

Otras investigaciones han concentrado esfuerzos en estudiar biomacromoléculas como el ácido desoxirribonucleico (ADN) de esperma de salmón que favorece una mayor adsorción en las superficies de acero al carbono (K. Hu et al., 2017). Otro caso de estudio evaluó el uso de goma arábica el cual es un polisacárido complejo de cadena ramificada, neutro o ligeramente ácido, que se presenta como una sal mixta de calcio, magnesio y potasio de un ácido polisacárido (Bentrah et al., 2014).

#### ***4.3.4 Sintéticos verdes***

Estudios recientes han demostrado que la 8-hidroxiquinolina es un inhibidor mixto de la corrosión del aluminio que forma complejos con los metales disueltos (Cu, Mg), lo que a su vez genera una barrera que impide una mayor velocidad de corrosión (Obot, Ankah, et al., 2017). También se han desarrollado métodos para aplicar aminoácidos como inhibidores de corrosión ecológicos como es el caso la de adenina-L-alanina (ALAR) (K. Hu et al., 2015). El uso de aceites provenientes del aguacate, una fruta rica en lípidos, que contiene ácidos grasos como oleico, linoleico, palmítico, esteárico, etc., se ha utilizado para sintetizar inhibidores orgánicos como imidazolinas o amidas para la corrosión (Cruz-Zabalegui et al., 2019).

Algunos polisacáridos como la goma xantana (XG) tienen potencial como inhibidor de corrosión por sus grupos funcionales activos y presenta limitaciones de inestabilidad en agua. Por esta razón la modificación con  $\beta$ -ciclodextrina ( $\beta$ -CD) permite mejorar la estabilidad y rendimiento, con el fin de facilitar una adsorción más efectiva sobre superficies metálicas (Cao et al., 2021). De igual manera, la  $\beta$ -ciclodextrina puede modificar otros polisacáridos como la poliacrilamida (PAM) debido a que es una opción muy económica y disponible, que se obtiene por amilosa bajo la acción de la ciclodextrina glucosiltransferasa producida por *Bacillus* (Wang et al., 2021).

#### ***4.3.5 Surfactantes***

Los surfactantes son compuestos anfífilicos capaces de reducir la tensión superficial entre fases (líquidos, gas, sólidos), su grupo funcional hidrofílico (iónico, no iónico o zwitteriónico)

tiene afinidad con el medio acuoso y superficies metálicas, facilitando su adsorción (Chauhan et al., 2021).

Li et al. (2022) han mostrado que el ramnolípido (RH) se enfoca en reducir significativamente la tensión superficial de sólidos y al ser fermentado mediante bacterias, crean una película compacta y estable que bloquea el acceso del agua e iones corrosivos ( $H^+$  o  $Cl^-$ ). Otro estudio referente a la Caprilamidopropil betaína (CAPB) mostró que la adsorción de sus grupos funcionales amina y carboxilato sobre el metal forman una capa que impide el contacto directo con agentes corrosivos (Fouda et al., 2020).

#### ***4.3.6 Molécula orgánica***

La guanina es una base nitrogenada púrica que compone los ácidos nucleicos del ADN y el ARN por lo que está presente en organismos vivos y el medio ambiente, por tanto, su ausencia de toxicidad junto con sus múltiples sitios de adsorción y bajo costo la convierten en un inhibidor de corrosión ecológico ideal (Silva et al., 2024).

#### **4.4 Mecanismos electroquímicos y tipo de adsorción**

Los inhibidores de corrosión en fase líquida actúan a través de diversos mecanismos electroquímicos. Estos inhibidores pueden clasificarse en anódicos, catódicos o mixtos. Los inhibidores anódicos protegen el metal formando una capa pasiva en su superficie, lo que dificulta la transferencia de electrones en la reacción de corrosión. Por otro lado, los inhibidores catódicos actúan sobre la reacción en el cátodo, reduciendo la disponibilidad de electrones necesarios para

la corrosión, mediante precipitados que cubren la superficie metálica o por mecanismos como la adsorción de compuestos inhibidores (Verma et al., 2018). Los inhibidores mixtos, que combinan ambos efectos, ya que interfieren tanto en el proceso anódico como catódico, estabilizan la superficie metálica y forman barreras protectoras a través de la adsorción de una película delgada ya sea a través de fisisorción o quimisorción, que está directamente relacionado con la naturaleza del inhibidor y su interacción con el metal (Al-Moubaraki & Obot, 2021).

En la fisisorción, los inhibidores se adhieren a la superficie metálica por interacciones electroestáticas y fuerzas de Van der Waals, lo que impide las reacciones de corrosión al afectar la región cargada del electrodo. En contraste, la quimisorción implica la formación de enlaces químicos entre los inhibidores y el metal favoreciendo una adsorción más fuerte mediante mecanismos como el intercambio iónico y la formación de complejos (Zhao et al., 2023).

#### **4.5 Medición de la corrosión**

Entre los métodos más comunes para medir la corrosión se encuentra el método de pérdida de peso Weight Loss Method (WL), el cual compara el peso de los cupones antes y después de un período de exposición a un ambiente corrosivo para evaluar la pérdida de material debido a la corrosión. Por otra parte, métodos electroquímicos como la polarización de la corriente (Potenciodynamic Polarization) mide la corriente en función del potencial aplicado a una muestra metálica y ayuda a determinar la velocidad y la dirección de corrosión, este procedimiento se usa para obtener curvas de polarización y así evaluar la resistencia a la corrosión del metal. (Yeganeh et al., 2025) El espectro de impedancia electroquímica (EIS) es otro método electroquímico que representa los cambios en el estado de la superficie de corrosión del metal o la morfología del

recubrimiento a través de un sistema electroquímico por medio de la frecuencia de ondas sinusoidales (Zhao et al., 2023).

#### 4.6 Factores influyentes en la eficiencia de inhibición

Entre los factores más influyentes detallados en los bioinhibidores, se encontró que la temperatura juega un papel importante ya que impacta directamente los procesos de adsorción, la estabilidad química de los compuestos y la velocidad de las reacciones electroquímicas que desencadenan la corrosión (Zhao et al., 2023). De acuerdo con Zaher et al. (2024) quienes evidenciaron que la eficiencia de inhibición disminuyó con el aumento de la temperatura, sugiriendo que la adsorción física es sensible a las variaciones térmicas. En este sentido, el aligano de sodio fue analizado mediante la pérdida de peso en una muestra de acero API 5L X60 en una solución de NaCl al 3,5% sometiéndose a temperaturas de 25°C y 70°C con una concentración de 1000 ppm para ambos casos (tabla 5).

En la primera temperatura se obtuvo una eficiencia de 87,23%, y en la segunda temperatura el porcentaje de inhibición fue de 67,25%, en este estudio al aumentar la temperatura, la afinidad por la superficie metálica se redujo (Obot, Onyeachu, et al., 2017). Sin embargo, otro estudio realizado por Djermoune et al. (2025) evaluaron el extracto de *Aloysia triphylla* en acero API 5L X42 expuesto a HCl a 0,5 M, encontrando que, al aumentar la temperatura de 25°C a 50°C, la eficiencia inhibidora se incrementó de 88,63% a 92,92%, indicando una correlación directa entre temperatura y eficiencia.

**Tabla 4.**

*Características de los Bioinhibidores aplicados a aceros API 5LX: condiciones y eficiencia*

<b>Bioinhibidor</b>	<b>Acero API</b>	<b>Técnica</b>	<b>Medio</b>	<b>C (ppm), T (°C)</b>	<b>IE %</b>	<b>Referencia</b>
<i>Eucheuma</i>	5L	PDP	HCl 0,1 M	500, 50	96,40	(Nikitasari et al., 2022)
Hojas de <i>Sygygium cumini</i>	5L	EIS	HCl 1 M	500, 25	93	(Riastuti et al., 2022)
<i>Aloysia Triphylla</i>	5L X42	WL	HCl 0,5 M	3400, 25	97	(Djermoune et al., 2025)
Goma arábica	5L X42	PDP	HCl 1 M	2000, 25	93	(Bentrah et al., 2014)
Gemini surfactante no iónico	5L X52	PDP	NaCl al 3,5% con	10, 50	94	(Cruz-Zabalegui et al., 2019)
Dialquilamida (bagazo de café)	5L X52	EIS	NaCl al 3%	25, 60	99	(Gomez-Guzman et al., 2023)
Aliganato de sodio	5L X60	WL	NaCl al 3,5%	1000, 25	87,23	(Obot, Onyeachu, et al., 2017)
<i>Trifolium repens</i>	5L X60	PDP	NaCl al 3,5%	20, 25	98	(Nour El Houda et al., 2024b)
Semilla de aguacate	5L X65	WL	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1 M	5000, 25	88	(Popoola et al., 2023)
Cáscara de <i>Arachis hypogaea</i>	5L X65	WL	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1 M	4000, 25	98,42	(Alao et al., 2024)
Ghars Date Extract	5L X70	PDP	HCl 0,5 M	2000, 20	94	(Kherief et al., 2023)
Hojas <i>dalbergia odorifera</i>	5L X70	PDP	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,5 M	400, 25	95,90	(Tan et al., 2023)
ADN de salmón	5L X80	PDP	HCl 1 M	20, 30	91,90	(K. Hu et al., 2017)
Nanocompuesto de cáscara de cebolla roja	5L X80	WL	HCl 1 M	1000 CS-EX, 30	94,80	(Ituen et al., 2020)
Caprilamidopropil betaína	5L X120	EIS	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1 M	33.25, 20	98	(Fouda et al., 2020)

*Nota:* En esta tabla se muestra los datos que corresponden a la mayor eficiencia.

De igual manera, otro factor relevante considerado por Djermoune et al. (2025) fue la variación de las concentraciones, que se analizó mediante las mediciones de impedancia electroquímica (EIS). Los resultados indicaron que la concentración óptima fue de 3400 ppm, alcanzando una eficiencia del 94%. Este valor se comparó con concentraciones más bajas (340 ppm) y más altas (8500 ppm) obteniendo eficiencias de 84,93% y 95,2% respectivamente. Estos datos indican que, al aumentar la concentración, la eficiencia mejora hasta estabilizarse, sugiriendo que después de cierto valor no se muestran mejoras significativas ya que se alcanza el equilibrio entre la protección contra la corrosión y la viabilidad práctica.

Adicionalmente, no existe una relación lineal entre la concentración y la eficiencia de inhibición incluso a largos períodos de exposición. Según Popoola et al. (2023), al utilizar extracto de semilla de aguacate desperdiciado como inhibidor ecológico para el acero API 5L X65 a temperatura ambiente, se logró una disminución en la velocidad de corrosión al retardar las reacciones electroquímicas catódica y anódica, y una eficiencia máxima del 88% a 5000 ppm, en un tiempo de inmersión de 98 horas.

Por su parte, Cruz-Zabalegui et al. (2019) usaron el surfactante Gemini no iónico a partir de ácidos grasos de aceite de aguacate de desecho, que se evaluó en acero API 5L X52 a 50°C con una concentración óptima de 10 ppm y un tiempo de exposición de 24 horas obteniendo una eficiencia máxima de 94%, simultáneamente, este artículo presenta la particularidad de que al aumentar la concentración en 50 ppm la eficiencia de inhibición disminuyó al 80%, evidenciando que concentraciones elevadas y largos períodos de exposición no siempre son efectivos, ya que, lo relevante es encontrar la concentración óptima y el tiempo adecuado de exposición.

Shang & Zhu, (2021) han reportado que los medios corrosivos más comunes en la industria del petróleo y gas son HCl,  $H_2SO_4$ , NaCl, NaOH. El aumento de la agresividad del medio ya sea

por acidez o basicidad, reduce la eficacia de los inhibidores, ya que las reacciones de descomposición y reconfiguración molecular se aceleran con el incremento la temperatura, lo que compromete su capacidad para prevenir la corrosión (Verma et al., 2018).

Un caso representativo es el uso de HCl a 0,1 M, donde el bioinhibidor *Eucheuma* (algas marinas) mostró una eficiencia de 96,4% (Nikitasari et al., 2022). En concentraciones más altas, como 0,5 M de HCl, el extracto de fruta de palma datilera reportó una inhibición del 94% (Kherief et al., 2023), mientras que a una concentración de HCl a 1M, la mayor reportada entre los estudios, alcanzó una eficiencia de inhibición del 91,9%, utilizando un bioinhibidor proveniente de ADN de salmón (K. Hu et al., 2017).

Por otra parte, los métodos de medición electroquímica utilizados para determinar el porcentaje de inhibición de corrosión varían en función de la naturaleza del estudio, la información que se desea obtener y la facilidad de interpretación de los resultados. Nour El Houda et al. (2024), seleccionaron curvas de polarización para estudiar la corrosión del acero API 5L X60 en NaCl 3,5% en presencia de diferentes concentraciones del extracto vegetal *Trifolium repens*. Este método permitió evaluar los parámetros de polarización potenciodinámica ( $i_{corr}$ ,  $E_{corr}$ ,  $\beta_a$ ,  $\beta_c$ ). Los resultados mostraron que, al aumentar la concentración del extracto a 20 ppm, disminuyó la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), alcanzando una eficiencia máxima de inhibición del 98%.

Este mismo valor de eficiencia fue obtenido por (Fouda et al., 2020) mediante Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), al evaluar la acción inhibidora de la Caprilamidopropil Betaína sobre el acero API 5L X120 en medio ácido ( $H_2SO_4$  1M) a distintas temperaturas. Este método proporciona una visión integral de la interacción del inhibidor con la superficie metálica, a través de parámetros como transferencia de carga ( $R_{ct}$ ) y la capacitancia de

doble capa ( $C_{dl}$ ). El aumento de ( $R_{ct}$ ) y la disminución de ( $C_{dl}$ ) sugieren una mejora la protección superficial y la formación de la capa pasiva más densa y estable.

Asimismo, cuando el objetivo es obtener una evaluación global de la protección del material se usa el método de pérdida de peso Weight Loss Method (WL), tal como sucede con (Ituen et al., 2020), que para evaluar el Nanocompuesto sintetizado a partir de cascara de cebolla (EX) y sal de cobre (CS) utiliza muestras de acero API 5L X80 previamente pesadas, con dimensiones de (3 x 3 x 0,5 cm) sumergidas por suspensión en 100 ml de soluciones de prueba de inhibidor y en blanco, a 30°C durante 6 horas. Posteriormente, se midió la pérdida de peso de cada muestra para calcular su eficiencia, obteniendo un valor de 94,8%.

Además, es importante considerar el uso de técnicas de caracterización superficial, ya que permiten evaluar la formación de películas protectoras sobre el metal. Entre las más utilizadas se encuentran SEM, AFM, XRD y FTIR. Por otro lado, EDX y XPS permiten observar en análisis morfológico y estructural, complementando así las técnicas electroquímicas y ampliando la comprensión del mecanismo de protección (Dwivedi et al., 2017).

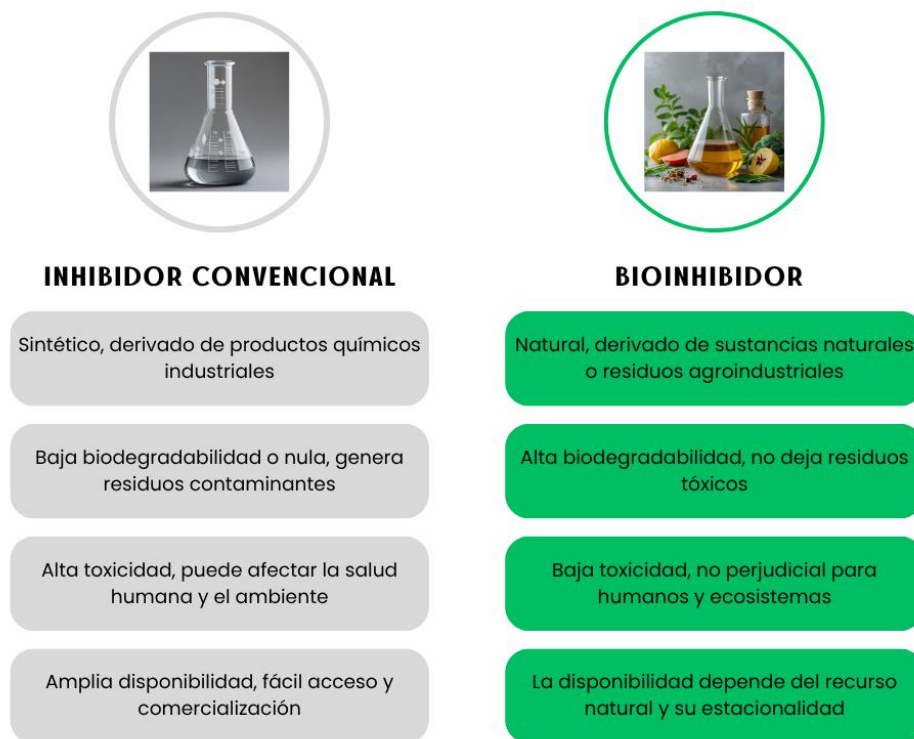
En este sentido, la investigación realizada por Alao et al., (2024) demostró la eficacia del extracto de concha de *Arachis hypogaea* como inhibidor en acero API 5L X65. A través del análisis FTIR se identificaron componentes activos y grupos funcionales responsables de su adsorción sobre la superficie metálica. Igualmente, las observaciones morfológicas SEM y EDX revelaron que la superficie del acero tratada con el bioinhibidor presentaba una textura más lisa con pocas áreas corroídas. Estos resultados fueron con la prueba gravimétrica, que arrojó una eficiencia de inhibición del 98,42%.

#### 4.7 Inhibidores químicos convencionales frente a bioinhibidores: desempeño, impacto ambiental y desafíos

Se identificaron las principales diferencias entre inhibidores convencionales y bioinhibidores, contrastando aspectos como el origen, la biodegradabilidad, toxicidad y disponibilidad (figura 6, tabla 6).

#### Figura 7.

*Comparación entre inhibidor convencional y bioinhibidor*



Tradicionalmente, los inhibidores de corrosión sintéticos se dividen en dos grandes grupos: orgánicos e inorgánicos, según su naturaleza química (Kahkesh & Zargar, 2023). Mientras que los inhibidores convencionales implican riesgos ambientales y toxicológicos, los bioinhibidores

destacan por su sostenibilidad y seguridad ecológica, aunque su producción depende de la estacionalidad y disponibilidad del recurso vegetal.

Los inhibidores orgánicos contienen átomos como (-N,-S,-O,-P,-Si), presentes en compuestos como imidazolinas, amidas, ésteres de fosfato, surfactantes. Entre estos, las imidazolinas, aminas y amidas reportaron eficiencias de inhibición superiores al 80% a temperaturas entre 90 y 150 °C, por esta razón sido ampliamente estudiadas, sin embargo, estos no cumplen con las regulaciones ambientales (Alamri, 2020).

Sin embargo, los inhibidores orgánicos presentan desventajas importantes: alta toxicidad, baja biodegradabilidad y altos costos de síntesis (Chauhan et al., 2021). De hecho, se ha reportado como los inhibidores orgánicos pueden generar daños severos en organismos vivos, afectando órganos vitales como los riñones y el hígado, hasta alterar incluso sistemas enzimáticos del cuerpo (Soudani et al., 2018).

Por otra parte, los inhibidores de corrosión inorgánicos contienen sales de cobre, zinc, arsénico, níquel y otros metales. Su uso es ventajoso a altas temperaturas en períodos de tiempo más largos y son menos costosos que los inhibidores orgánicos. No obstante, tienden a perder eficacia en soluciones altamente ácidas (como HCl >17%) y pueden liberar gases tóxicos como arsina (Tamalmani & Husin, 2020).

Cabe resaltar que el HCl es uno de los agentes corrosivos más agresivos en la industria del petróleo y gas, que, al mezclarse con agua, causa corrosión general y localizada (Al-Moubaraki & Obot, 2021). Por tal motivo, se realizó una comparativa de inhibidores convencionales a diferentes concentraciones de HCl, como se muestra en la Tabla 6.

**Tabla 5.***Rendimiento de inhibidores convencionales sobre aceros API*

<b>Inhibidor</b>	<b>Concentración de HCl (M)</b>	<b>Concentración de inhibidor (ppm)</b>	<b>T, (°C)</b>	<b>IE %</b>	<b>Referencia</b>
EO,12	1,8	628	25	94,3 por EIS	(El Basiony et al., 2020)
SAPDA	0,5	41.2	20	99 por PDP	(Bahgat Radwan et al., 2017)
HZ-OH	1	1750	25	94 por PDP	(Oday Mohammad Ahmad et al., 2021)

*Nota:* EO,12 corresponde a un derivado de Aminotiazol etoxilado y HZ-OH a un derivado de hidrazona

El inhibidor convencional SAPDA presentó una efectividad del 99% empleando el método de polarización potenciodinámica (PDP) en un medio ácido HCl 0,5M, utilizando la menor concentración reportada. En comparación, el inhibidor EO,12, fue evaluado en un medio más agresivo (1,8 M HCl) y una concentración de 628 ppm, alcanzando una eficiencia de 94,3% mediante espectroscopía de impedancia (EIS). Sin embargo, ambos inhibidores mostraron disminución significativa de su eficiencia al aumentar la temperatura en 30 °C: SAPDA redujo su eficiencia al 71% y EO,12 al 81,4% (Bahgat Radwan et al., 2017; El Basiony et al., 2020).

De manera adicional, se comparó un derivado de hidrazona (HZ-OH) con goma arábiga (GA), un bioinhibidor. Ambos se aplicaron sobre aceros API 5L en HCl 1M a 25°C, evaluados con la misma prueba electroquímica (PDP). HZ-OH alcanzó una eficiencia del 94% a 1750 ppm, en cambio la (GA) obtuvo 93% a una concentración mayor de 2000 ppm, lo que sugiere una ligera ventaja de los inhibidores convencionales en términos de eficiencia y menor dosis requerida (Bentrah et al., 2014; Oday Mohammad Ahmad et al., 2021).

Los inhibidores convencionales cuentan con una amplia trayectoria investigativa, especialmente en condiciones de flujo. Una de las técnicas más utilizadas es el electrodo de cilindro giratorio (RCE), que permite simular flujos turbulentos y evaluar fenómenos de corrosión en condiciones controladas (Onyeachu et al., 2019). Tal como ocurre con el 2-(2-piridil) benzimidazol (2PB) que alcanzó una eficiencia del 88,3% tras 12 horas de inmersión a 4000 rpm en acero API 5L X60 expuesto a salmuera sintética (Onyeachu et al., 2020).

En este contexto, los inhibidores verdes presentan una solución prometedora al utilizar materias primas naturales de baja toxicidad (hojas, flores, frutos, semillas, etc), generar menos residuos y requerir procesos de síntesis más seguros, como el remojo, el reflujo de térmico o la hidrólisis enzimática (Chauhan et al., 2021 y Shang & Zhu, 2021).

#### **4.8 Cítricos como inhibidores de corrosión**

Los cítricos contienen una alta concentración de compuestos bioactivos como flavonoides, pectinas y terpenos, los cuales poseen heteroátomos funcionales, principalmente oxígeno y nitrógeno, esenciales en procesos de inhibición de la corrosión. Además, se ha demostrado que las cáscaras de los cítricos presentan mayor capacidad antioxidante que otras partes del fruto, lo que, sumado a su abundante generación como residuo agroindustrial, las posiciona como una opción sostenible y funcional para el desarrollo de inhibidores verdes (Sowmyashree et al., 2023). Un ejemplo de ello es el caso de Marruecos, donde se ha valorizado la cáscara de mandarina (*Citrus reticulata*), buscando recuperar sus compuestos volátiles y reducir el impacto ambiental generado por los residuos de la industria de zumos, ya que estos no son reciclables y su descomposición puede causar lixiviación y contaminación del suelo (Najem et al., 2022).

Sowmyashree et al. (2023) realizaron un estudio sobre la especie cítrica *Citrus limetta* (CL) perteneciente a la familia Rutaceae, como potencial inhibidor. En su investigación, destacaron que su composición incluye un 95% de terpenos y D-limoneno/cicloterpeno, junto con otros compuestos oxigenados. Por su parte, Bui et al. (2019) emplearon la técnica de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) en un extracto esencial de naranja (OPEO) proveniente de Vietnam, identificando 30 compuestos, siendo el D-limoneno predominante con un contenido del 92,85% y oxigenados menores que refuerzan la adsorción.

Los cítricos requieren distintos métodos de preparación según la especie y el objetivo de estudio. En el caso de la naranja (*Citrus sinensis*), las cáscaras se liofilizaron a  $-50^{\circ}\text{C}$  durante 72 horas, se molieron finamente ( $\sim 0,315\text{mm}$ ) y se realizó la extracción empleando 5 gramos de polvo en 150 ml de una mezcla etanol/agua (80/20 % vol), bajo agitación a  $35^{\circ}\text{C}$ . Posteriormente, el extracto fue filtrado ( $0,2\mu\text{m}$ ) y almacenado a  $4^{\circ}\text{C}$  (M'hiri et al., 2016). En contraste, la preparación del extracto de lima dulce (SLP) fue más sencilla: las cáscaras se cortaron, lavaron para eliminar impurezas superficiales y 10 g del material limpio se mezclaron con 150 ml de agua bidestilada. Esta mezcla se hirvió durante 15 minutos a  $100^{\circ}\text{C}$ ; el extracto resultante fue filtrado con papel Whatman n°40 y almacenado a  $4^{\circ}\text{C}$  (Sowmyashree et al., 2023).

**Tabla 6.**

*Comparativa de extractos cítricos como bioinhibidores en medios ácidos*

Extracto	C (ppm)	Medio	Superficie	Modelo de adsorción	IE %	Referencia
Citrus aurantifolia (Lima)	200	$\text{H}_2\text{SO}_4$	API 5L Grado B	Langmuir	99	(Pradityana, 2024)
Citrus reticulata (Mandarina)	900	HCl	Acero dulce (MS)	Langmuir	90	(Najem et al., 2022)

Extracto	C (ppm)	Medio	Superficie	Modelo de adsorción	IE %	Referencia
Citrus limonum (Limón)	4000	$H_2SO_4$	Acero dulce A36	Langmuir	94	(Ayoola et al., 2022)

La Tabla 7 resume estudios relevantes que evidencian la eficiencia de inhibidora de diferentes especies cítricas aplicadas sobre superficies metálicas en medios ácidos. En todos los casos, el modelo de adsorción que mejor ajustó los datos fue el modelo de Langmuir, lo cual sugiere la formación de una monocapa uniforme sobre la superficie del acero con sitios de adsorción equivalentes y sin interacción entre la molécula adsorbida (Ayoola et al., 2022). Se destaca particularmente el extracto de *Citrus aurantifolia* (Lima), utilizado en acero API 5L grado B en el medio  $H_2SO_4$ , el cual alcanzó una eficiencia del 99% con una concentración de apenas 200 ppm, indicando un comportamiento altamente efectivo incluso a bajas concentraciones (Pradityana, 2024). En contraste, el extracto de *Citrus limonum* (Limón) requirió una mayor concentración (4000 ppm) para alcanzar una eficiencia de 94% (Ayoola et al., 2022). Mientras que el *Citrus reticulata* (Mandarina) alcanzó una eficacia del 90% en HCl, reflejando la influencia de la especie, el medio corrosivo y el tipo de acero (Najem et al., 2022).

**Tabla 7.**

*Efecto de temperatura y adsorción en inhibidores cítricos*

Extracto	Tiempo (h)	T (°C)	$R^2$	$\Delta G_{ads}$ (kJ/mol)	IE %	Referencia
Citrus limetta (Lima)	5	30	0,994	-34,01	87,79	(Sowmyashree et al., 2023)
		60	0,995	-37,11	80,39	
Citrus reticulata (Mandarina)	6	25	0,9945	---	90,3	(Najem et al., 2022).
		55	---	---	44,6	
Citrus limonum (Limón)	5	28	0,9965	-16,94	94	(Ayoola et al., 2022)
		45	0,9946	-15,37	92	

Adicionalmente, los estudios analizados coinciden en que la eficiencia inhibidora disminuye a medida que aumenta la temperatura, presentándose una adsorción menos estable debido al incremento de energía térmica. Este comportamiento infiere un mecanismo de fisisorción, espontáneo y reversible, asociado a fuerzas débiles como la de Van der Waals. De la misma manera, los ajustes del modelo de adsorción muestran valores cercanos a 1 en los coeficientes de determinación ( $R^2$ ), y junto con los valores negativos del cambio de la energía libre de Gibbs ( $\Delta G_{ads}$ ), permiten identificar la naturaleza del proceso de adsorción. En el estudio con extracto de limón, los valores de delta de Gibbs están en el rango de -20 y 0 kJ/mol, indicando un mecanismo predominantemente de fisisorción. Por el contrario, en la investigación con *Citrus limetta*, los valores oscilaron entre -34,01 y -37,11 kJ/mol, evidenciándose una combinación de fisisorción y quimisorción asociada a la interacción entre los compuestos del extracto y la superficie metálica (Ayoola et al., 2022 y Sowmyashree et al., 2023).

Aunque los extractos cítricos muestran buen potencial como bioinhibidores, su aplicación en aceros API 5LX sigue siendo limitada por la falta de estudios específicos y condiciones industriales reales. Además, la variabilidad en su composición y la ausencia de métodos estandarizados dificultan su reproducibilidad. Aun así, su bajo costo, biodegradabilidad y simplicidad de extracción los posicionan como una opción prometedora frente a otros inhibidores verdes. (Sheydaei, 2024).

## 5. Conclusiones

Se identificaron seis clases principales de bioinhibidores aplicables a aceros API 5LX: extractos vegetales, nanopartículas verdes, biopolímeros, biosurfactantes y moléculas orgánicas. En particular, los extractos vegetales destacan como la categoría con mayor número de investigaciones disponibles, lo que indica su potencial industrial y bajo impacto ambiental.

Las variables como concentración, temperatura, medio corrosivo y tipo de acero influyen significativamente en la eficiencia inhibidora. La adsorción sobre la superficie metálica puede ocurrir mediante fisisorción, quimisorción o mecanismos combinados, determinando así el comportamiento inhibidor. Las técnicas empleadas para evaluar estos fenómenos, como la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS); las curvas de polarización (PDP) y la pérdida de peso (WL), fueron fundamentales para comparar los distintos comportamientos inhibitorios.

Los inhibidores convencionales, aunque pueden alcanzar eficiencias similares o incluso superiores a los bioinhibidores, tienen importantes desventajas relacionadas con su toxicidad, baja biodegradabilidad y altos costos. Frente a esto, los bioinhibidores se presentan como una alternativa ecológica y sostenible en el tiempo. Sin embargo, su uso no está exento de desafíos, especialmente en lo relacionado con su estabilidad y la variabilidad natural de las materias primas.

Finalmente, se evidenció que extractos derivados de cítricos, como el limón, la mandarina y la lima dulce, han mostrado eficiencia inhibitoria que oscilan entre 87% y 99% en medios ácidos, debido a sus compuestos bioactivos. No obstante, la mayoría de los estudios disponibles se han centrado en aceros comerciales diferentes al acero API 5LX, lo que limita la extrapolación de

resultados, razón por la cual se requiere profundizar en investigaciones bajo condiciones más representativas en la industria.

## **6. Recomendaciones**

Se recomienda fortalecer la investigación en bioinhibidores aplicados en aceros API 5LX, bajo condiciones industriales reales. Además, es necesario estandarizar los métodos de extracción y caracterización para facilitar su aplicación y validación comercial.

Por último, en Colombia solo se identificó un estudio, es fundamental impulsar investigaciones locales aprovechando residuos agroindustriales y biodiversidad nacional. También se sugiere incluir análisis económico y ambientales, junto con ensayos de flujo dinámico que permitan evaluar su desempeño en condiciones reales del sector petrolero.

**Referencias Bibliográficas**

- Alamri, A. H. (2020). Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines – An overview. *Engineering Failure Analysis*, 116, 104735. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104735>
- Alao, A. O., Popoola, A. P., Sanni, O., & Dada, M. (2024). Novel high-performance and cost-effective green inhibitor based on fundamental theoretical evaluations combined with electrochemical/surface examinations of *Arachis hypogaea* shell extract for pipeline steel corrosion in 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution. *Materials Research Express*, 11(4), 045502. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad3718>
- Al-Moubaraki, A. H., & Obot, I. B. (2021a). Corrosion challenges in petroleum refinery operations: Sources, mechanisms, mitigation, and future outlook. *Journal of Saudi Chemical Society*, 25(12), 101370. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101370>
- Al-Moubaraki, A. H., & Obot, I. B. (2021b). Corrosion challenges in petroleum refinery operations: Sources, mechanisms, mitigation, and future outlook. *Journal of Saudi Chemical Society*, 25(12), 101370. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101370>
- Al-Otaibi, M. S., Al-Mayouf, A. M., Khan, M., Mousa, A. A., Al-Mazroa, S. A., & Alkathlan, H. Z. (2014). Corrosion inhibitory action of some plant extracts on the corrosion of mild steel in acidic media. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(3), 340-346. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.01.015>
- Ansari, K. R., Chauhan, D. S., Quraishi, M. A., Mazumder, M. A. J., & Singh, A. (2020). Chitosan Schiff base: An environmentally benign biological macromolecule as a new corrosion

- inhibitor for oil & gas industries. *International Journal of Biological Macromolecules*, *144*, 305-315. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.106>
- Ayoola, A. A., Babalola, R., Durodola, B. M., Alagbe, E. E., Agboola, O., & Adegbile, E. O. (2022). Corrosion inhibition of A36 mild steel in 0.5 M acid medium using waste citrus limonum peels. *Results in Engineering*, *15*, 100490. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100490>
- Bahgat Radwan, A., Sliem, M. H., Okonkwo, P. C., Shibl, M. F., & Abdullah, A. M. (2017). Corrosion inhibition of API X120 steel in a highly aggressive medium using stearamidopropyl dimethylamine. *Journal of Molecular Liquids*, *236*, 220-231. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.03.116>
- Bammou, L., Belkhaouda, M., Salghi, R., Benali, O., Zarrouk, A., Zarrok, H., & Hammouti, B. (2014). Inhibición de la corrosión del acero en solución de ácido sulfúrico mediante extractos de *Chenopodium Ambrosioides*. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, *16*, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.jaubas.2013.11.001>
- Bentrah, H., Rahali, Y., & Chala, A. (2014a). Gum Arabic as an eco-friendly inhibitor for API 5L X42 pipeline steel in HCl medium. *Corrosion Science*, *82*, 426-431. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.12.018>
- Bentrah, H., Rahali, Y., & Chala, A. (2014b). Gum Arabic as an eco-friendly inhibitor for API 5L X42 pipeline steel in HCl medium. *Corrosion Science*, *82*, 426-431. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.12.018>
- Bui, H. T. T., Dang, T.-D., Le, H. T. T., & Hoang, T. T. B. (2019). Comparative study on Corrosion Inhibition of Vietnam Orange Peel Essential Oil with Urotropine and Insight of Corrosion

- Inhibition Mechanism for Mild Steel in Hydrochloric Solution. *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 10(1), 69-81. <https://doi.org/10.5229/JECST.2019.10.1.69>
- Cao, Y., Zou, C., Wang, C., Chen, W., Liang, H., & Lin, S. (2021). Green corrosion inhibitor of  $\beta$ -cyclodextrin modified xanthan gum for X80 steel in 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> at different temperature. *Journal of Molecular Liquids*, 341, 117391. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117391>
- Capelle, J., Furtado, J., Azari, Z., Jallais, S., & Pluvinage, G. (2013). Diseño basado en la temperatura de transición dúctil-frágil para acero API 5L X65 utilizado para transporte de CO<sub>2</sub> denso. *Engineering Fracture Mechanics*, 110, 270-280. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.08.009>
- Chauhan, D. S., Quraishi, M. A., & Qurashi, A. (2021a). Recent trends in environmentally sustainable Sweet corrosion inhibitors. *Journal of Molecular Liquids*, 326, 115117. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115117>
- Chauhan, D. S., Quraishi, M. A., & Qurashi, A. (2021b). Recent trends in environmentally sustainable Sweet corrosion inhibitors. *Journal of Molecular Liquids*, 326, 115117. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115117>
- (CIAD), C. de I. en A. y D. (s. f.). *Biopolímeros*. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD). Recuperado 18 de junio de 2025, de <https://www.ciad.mx/posgrados/opcionesterminales/biopolimeros/>
- Cruz-Zabalegui, A., Vazquez-Velez, E., Galicia-Aguilar, G., Casales-Diaz, M., Lopez-Sesenes, R., Gonzalez-Rodriguez, J. G., & Martinez-Gomez, L. (2019a). Use of a non-ionic gemini-surfactant synthesized from the wasted avocado oil as a CO<sub>2</sub>- corrosion inhibitor for X-52 steel. *Industrial Crops and Products*, 133, 203-211. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.011>

- Cruz-Zabalegui, A., Vazquez-Velez, E., Galicia-Aguilar, G., Casales-Diaz, M., Lopez-Sesenes, R., Gonzalez-Rodriguez, J. G., & Martinez-Gomez, L. (2019b). Uso de un surfactante gemini no iónico sintetizado a partir del aceite de aguacate de desecho como inhibidor de corrosión por CO<sub>2</sub> para acero X-52. *Industrial Crops and Products*, *133*, 203-211. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.011>
- Cruz-Zabalegui, A., Vazquez-Velez, E., Galicia-Aguilar, G., Casales-Diaz, M., Lopez-Sesenes, R., Gonzalez-Rodriguez, J. G., & Martinez-Gomez, L. (2019c). Uso de un surfactante gemini no iónico sintetizado a partir del aceite de aguacate de desecho como inhibidor de corrosión por CO<sub>2</sub> para acero X-52. *Industrial Crops and Products*, *133*, 203-211. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.011>
- Díaz-Jiménez, V., Gómez-Sánchez, G., Likhanova, N. V., Arellanes-Lozada, P., Olivares-Xometl, O., Lijanova, I. V., & Arriola-Morales, J. (2024). Current Overview of Corrosion Inhibition of API Steel in Different Environments. *ACS Omega*, *9*(26), 27798-27831. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01999>
- Didouh, H., Buyuksagis, A., Meliani, M. hadj, Dilek, M., Kayali, Y., Suleiman, R. K., & Saleh, T. A. (2023). Investigating the use of *Moringa Oleifera* leaf extract as an environment-friendly corrosion inhibitor for API 5L X52 steel in 1 M HCl. *Journal of Molecular Liquids*, *390*, 122910. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122910>
- Djermoune, A., Maizia, R., Zahzouh, M., & Khelfaoui, Y. (2025a). Aloysia triphylla plant extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for API 5L X42 steel in hydrochloric acid medium: A combined experimental and DFT study. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *709*, 136068. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.136068>

- Djermoune, A., Maizia, R., Zahzouh, M., & Khelfaoui, Y. (2025b). Aloysia triphylla plant extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for API 5L X42 steel in hydrochloric acid medium: A combined experimental and DFT study. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 709, 136068. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.136068>
- Dwivedi, D., Lepková, K., & Becker, T. (2017). Carbon steel corrosion: A review of key surface properties and characterization methods. *RSC Advances*, 7(8), 4580-4610. <https://doi.org/10.1039/C6RA25094G>
- Eduok, U., Ohaeri, E., & Szpunar, J. (2021). Anticorrosion allyl sulfonate graft chitosan/graphene oxide nanocomposite material. *Materials Advances*, 2(5), 1621-1634. <https://doi.org/10.1039/D0MA00613K>
- El Basiony, N. M., Elgendy, Amr., El-Tabey, A. E., Al-Sabagh, A. M., Abd El-Hafez, Gh. M., El-raouf, M. A., & Migahed, M. A. (2020). Synthesis, characterization, experimental and theoretical calculations (DFT and MC) of ethoxylated aminothiazole as inhibitor for X65 steel corrosion in highly aggressive acidic media. *Journal of Molecular Liquids*, 297, 111940. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111940>
- Finšgar, M., & Jackson, J. (2014). Application of corrosion inhibitors for steels in acidic media for the oil and gas industry: A review. *Corrosion Science*, 86, 17-41. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.04.044>
- Fouda, A. E., Abd El-Aal, A., Sliem, M., & Abdullah, A. (2020). Caprylamidopropyl Betaine as a Highly Efficient eco-friendly Corrosion Inhibitor for API X120 Steel in 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Egyptian Journal of Chemistry*, 63(3), 759-776. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2019.13652.1844>

- Foudaa, A. E.-A. S., El Aalb, A. A., Sliem, M. H., & Abdullah, A. M. (2020). Caprylamidopropyl betaine as a highly efficient eco-friendly corrosion inhibitor for API X120 steel in 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Egyptian Journal of Chemistry*, 63(3), 759-766. Scopus. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2019.13652.1844>
- Gerengi, H., Uygur, I., Solomon, M., Yildiz, M., & Goksu, H. (2016). Evaluación del efecto inhibidor del extracto de hojas de *Diospyros kaki* (caqui) sobre la corrosión del acero St37 en medio ácido. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 4, 57-66. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2016.10.003>
- Ghareba, S., & Omanovic, S. (2010). Interaction of 12-aminododecanoic acid with a carbon steel surface: Towards the development of 'green' corrosion inhibitors. *Corrosion Science*, 52(6), 2104-2113. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.02.019>
- Gobara, M., Baraka, A., & Zaghloul, B. (2015). Green corrosion inhibitor for carbon steel in sulfuric acid medium from "Calotropis Gigantia" latex. *Research on Chemical Intermediates*, 41(12), 9885-9901. <https://doi.org/10.1007/s11164-015-1996-3>
- Golchinvafo, A., Mousavi Anijdan, S. H., Sabzi, M., & Sadeghi, M. (2020). The effect of natural inhibitor concentration of *Fumaria officinalis* and temperature on corrosion protection mechanism in API X80 pipeline steel in 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 188, 104241. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104241>
- Gomez-Guzman, N. B., Canto, J., Martinez-de-la-Escalera, L. M., Neri, A., & Porcayo-Calderon, J. (2023). Inhibition of X52 Corrosion in CO<sub>2</sub>-Saturated Brine by a Dialkyl-Diamide from Coffee Bagasse Oil. *Molecules*, 28(2). Scopus. <https://doi.org/10.3390/molecules28020763>

- Han, P., Cheng, P., Yuan, S., & Bai, Y. (2021). Characterization of ductile fracture criterion for API X80 pipeline steel based on a phenomenological approach. *Thin-Walled Structures*, *164*, 107254. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107254>
- Hu, K., Gu, H., Zhuang, J., Zeng, X., Yan, L., Jiang, Y., Guo, Q., & Ding, J. (2015). Synthesis and anti-corrosion performance of adenine-lalanine ramification. *Journal of Adhesion Science and Technology*, *30*(8), 851-865. Scopus. <https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1127089>
- Hu, K., Zhuang, J., Ding, J., Ma, Z., Wang, F., & Zeng, X. (2017a). Influence of biomacromolecule DNA corrosion inhibitor on carbon steel. *Corrosion Science*, *125*, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.06.004>
- Hu, K., Zhuang, J., Ding, J., Ma, Z., Wang, F., & Zeng, X. (2017b). Influence of biomacromolecule DNA corrosion inhibitor on carbon steel. *Corrosion Science*, *125*, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.06.004>
- Hu, T., Shi, H., Wei, T., Liu, F., Fan, S., & Han, E.-H. (2015). Cerium tartrate as a corrosion inhibitor for AA 2024-T3. *Corrosion Science*, *95*, 152-161. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.03.010>
- Ituen, E., Singh, A., Li, R., Yuanhua, L., & Guo, C. (2020a). Nanostructure, surface and anticorrosion properties of phyto-fabricated copper nanocomposite in simulated oilfield descaling fluid. *Surfaces and Interfaces*, *19*, 100514. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100514>
- Ituen, E., Singh, A., Li, R., Yuanhua, L., & Guo, C. (2020b). Nanostructure, surface and anticorrosion properties of phyto-fabricated copper nanocomposite in simulated oilfield descaling fluid. *Surfaces and Interfaces*, *19*, 100514. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100514>

- Ituen, E., Singh, A., Yuanhua, L., & Akaranta, O. (2021). Biomass-mediated synthesis of silver nanoparticles composite and application as green corrosion inhibitor in oilfield acidic cleaning fluid. *Cleaner Engineering and Technology*, 3, 100119. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100119>
- Kahkesh, H., & Zargar, B. (2023). Estimating the anti-corrosive potency of 3-nitrophthalic acid as a novel and natural organic inhibitor on corrosion monitoring of mild steel in 1 M HCl solution. *Inorganic Chemistry Communications*, 158, 111533. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111533>
- Kherief, S., Djellab, M., Bentrach, H., Chala, A., Bouamra, B., & Taoui, H. (2023). Corrosion Inhibition Efficiency of Ghars Date Extract on API 5L X70 Pipeline Steel in Hydrochloric Acid. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 59(6), 1306-1314. <https://doi.org/10.1134/S2070205123701162>
- Km, S., Praveen, B. M., & Devendra, B. K. (2024). A review on corrosion inhibitors: Types, mechanisms, electrochemical analysis, corrosion rate and efficiency of corrosion inhibitors on mild steel in an acidic environment. *Results in Surfaces and Interfaces*, 16, 100258. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100258>
- Kolawole, F., Kolawole, S. K., Agunsoye, J., ADEBISI, J., Bello, S., & Hassan, S. (2018). *Mitigation of Corrosion Problems in API 5L Steel Pipeline – A Review*.
- Li, Z., Yuan, X., Sun, M., Li, Z., Zhang, D., Lei, Y., Zhang, M., Fan, Y., Xu, D., & Wang, F. (2022). Rhamnolipid as an eco-friendly corrosion inhibitor for microbiologically influenced corrosion. *Corrosion Science*, 204, 110390. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110390>

- M'hiri, N., Veys-Renaux, D., Rocca, E., Ioannou, I., Boudhrioua, N. M., & Ghoul, M. (2016). Corrosion inhibition of carbon steel in acidic medium by orange peel extract and its main antioxidant compounds. *Corrosion Science*, *102*, 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.09.017>
- Microsoft Excel LTSC 2021* (Versión 2108 (compilación 14332.20358)). (2021). [Software]. Microsoft Corporation.
- Mobin, M., Basik, M., & Shoeb, Mohd. (2019). A novel organic-inorganic hybrid complex based on *Cissus quadrangularis* plant extract and zirconium acetate as a green inhibitor for mild steel in 1 M HCl solution. *Applied Surface Science*, *469*, 387-403. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.008>
- Najem, A., Sabiha, M., Laourayed, M., Belfhaili, A., Benhiba, F., Boudalia, M., Warad, I., Bellaouchou, A., Guenbour, A., & Zarrouk, A. (2022). New Green Anti-corrosion Inhibitor of Citrus Peels for Mild Steel in 1 M HCl: Experimental and Theoretical Approaches. *Chemistry Africa*, *5*(4), 969-986. <https://doi.org/10.1007/s42250-022-00366-9>
- Nikitasari, A., Priyotomo, G., Royani, A., & Sundjono, S. (2022). Exploration of Eucheuma Seaweed Algae Extract as a Novel Green Corrosion Inhibitor for API 5L Carbon Steel in Hydrochlorid Acid Medium. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, *35*(3), 596-603. Scopus. <https://doi.org/10.5829/IJE.2022.35.03C.13>
- Nour El Houda, S., Amel, B., & Malika, F. (2024a). *Trifolium repens* extracts as a green corrosion inhibitor for carbon steel in a 3.5% NaCl solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *165*, 105771. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105771>

- Nour El Houda, S., Amel, B., & Malika, F. (2024b). Trifolium repens extracts as a green corrosion inhibitor for carbon steel in a 3.5% NaCl solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *165*, 105771. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105771>
- Nour El Houda, S., Amel, B., & Malika, F. (2024c). Trifolium repens extracts as a green corrosion inhibitor for carbon steel in a 3.5% NaCl solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *165*, 105771. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105771>
- Obot, I. B., Ankah, N. K., Sorour, A. A., Gasem, Z. M., & Haruna, K. (2017). 8-Hydroxyquinoline as an alternative green and sustainable acidizing oilfield corrosion inhibitor. *Sustainable Materials and Technologies*, *14*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.09.001>
- Obot, I. B., Onyechu, I. B., & Kumar, A. M. (2017a). Sodium alginate: A promising biopolymer for corrosion protection of API X60 high strength carbon steel in saline medium. *Carbohydrate Polymers*, *178*, 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.049>
- Obot, I. B., Onyechu, I. B., & Kumar, A. M. (2017b). Sodium alginate: A promising biopolymer for corrosion protection of API X60 high strength carbon steel in saline medium. *Carbohydrate Polymers*, *178*, 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.049>
- Oday Mohammad Ahmad, Selatnia, I., & Lgaz, H. (2021). Hydrazone-based green corrosion inhibitors for API grade carbon steel in HCl: Insights from electrochemical, XPS, and computational studies. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *626*, 127047. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127047>
- Olanrewaju, O. F., & Olaseinde, O. A. (2025). Biosíntesis de nanopartículas de plata y zinc y sus propiedades inhibidoras de la corrosión en aceros API 5L, 316 ASS y 2101 DSS en 0,5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y 1 M HCl. *Progress in Engineering Science*, *2*(1), 100049. <https://doi.org/10.1016/j.pes.2025.100049>

- Onyeachu, I. B., Abdel-Azeim, S., Chauhan, D. S., & Quraishi, M. A. (2021). Electrochemical and Computational Insights on the Application of Expired Metformin Drug as a Novel Inhibitor for the Sweet Corrosion of C1018 Steel. *ACS Omega*, 6(1), 65-76. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03364>
- Onyeachu, I. B., Obot, I. B., & Adesina, A. Y. (2020). Green corrosion inhibitor for oilfield application II: The time–evolution effect on the sweet corrosion of API X60 steel in synthetic brine and the inhibition performance of 2-(2-pyridyl) benzimidazole under turbulent hydrodynamics. *Corrosion Science*, 168, 108589. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108589>
- Onyeachu, I. B., Obot, I. B., Sorour, A. A., & Abdul-Rashid, M. I. (2019). Green corrosion inhibitor for oilfield application I: Electrochemical assessment of 2-(2-pyridyl) benzimidazole for API X60 steel under sweet environment in NACE brine ID196. *Corrosion Science*, 150, 183-193. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.02.010>
- Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., & Elmagarmid, A. (2016). Rayyan—A web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, 5(1), 210. <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., & Bossuyt, P. M. (2021, septiembre). *Declaración PRISMA 2020: Una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas—ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300893221002748>
- Parthipan, P., Elumalai, P., Narenkumar, J., Machuca, L. L., Murugan, K., Karthikeyan, O. P., & Rajasekar, A. (2018). *Allium sativum* (garlic extract) as a green corrosion inhibitor with biocidal properties for the control of MIC in carbon steel and stainless steel in oilfield

- environments. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 132, 66-73.  
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.05.005>
- Parthipan, P., Narenkumar, J., Elumalai, P., Preethi, P. S., Usha Raja Nanthini, A., Agrawal, A., & Rajasekar, A. (2017). Neem extract as a green inhibitor for microbiologically influenced corrosion of carbon steel API 5LX in a hypersaline environments. *Journal of Molecular Liquids*, 240, 121-127. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.05.059>
- Pérez, T. (2013, marzo). *Corrosion in the Oil and Gas Industry: An Increasing Challenge for Materials | JOM*. [https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-013-0675-3?utm\\_source=getftr&utm\\_medium=getftr&utm\\_campaign=getftr\\_pilot&getft\\_integrator=sciedirect\\_contenthosting](https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-013-0675-3?utm_source=getftr&utm_medium=getftr&utm_campaign=getftr_pilot&getft_integrator=sciedirect_contenthosting)
- Popoola, A. P., Alao, A. O., & Sanni, O. (2023a). Sustainable and Green Approach for Api 5L Pipeline Steel Acidic Corrosion Inhibition Using Agro-Industrial Waste: Experimental and Theoretical. *Metals*, 13(7), 1155. <https://doi.org/10.3390/met13071155>
- Popoola, A. P., Alao, A. O., & Sanni, O. (2023b). Sustainable and Green Approach for Api 5L Pipeline Steel Acidic Corrosion Inhibition Using Agro-Industrial Waste: Experimental and Theoretical. *Metals*, 13(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/met13071155>
- Prabakaran, M., Kim, S.-H., Hemapriya, V., & Chung, I.-M. (2016). *Tragia plukenetii* extract as an eco-friendly inhibitor for mild steel corrosion in HCl 1 M acidic medium. *Research on Chemical Intermediates*, 42(4), 3703-3719. <https://doi.org/10.1007/s11164-015-2240-x>
- Pradityana, A. (2024). Corrosion analysis of renewable inhibitor *Citrus aurantifolia* peels extract for API 5L Grade B steel in acid solution. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2024-13-1-20>

- Recloux, I., Andreatta, F., Druart, M.-E., Coelho, L. B., Cepek, C., Cossement, D., Fedrizzi, L., & Olivier, M.-G. (2018). Stability of benzotriazole-based films against AA2024 aluminium alloy corrosion process in neutral chloride electrolyte. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 2512-2522. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.346>
- Riastuti, R., Mashanafie, G., Rizkia, V., Maksum, A., Prifiharni, S., Kaban, A., Priyotomo, G., & Soedarsono, J. (2022). Effect of syzygium cumini leaf extract as a green corrosion inhibitor on API 5l carbon steel in 1M HCL. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(6 (120)), Article 6 (120). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.267232>
- Royani, A., Hanafi, M., Haldhar, R., & Manaf, A. (2024). Evaluation of *Morinda citrifolia* extract as sustainable inhibitor for mild steel in saline environment. *Journal of Engineering Research*, 12(3), 321-327. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.01.013>
- Shang, Z., & Zhu, J. (2021). Overview on plant extracts as green corrosion inhibitors in the oil and gas fields. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 5078-5094. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.095>
- Sheydaei, M. (2024). The Use of Plant Extracts as Green Corrosion Inhibitors: A Review. *Surfaces*, 7(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/surfaces7020024>
- Silva, E. F., Wysard, J. S., Bandeira, M. C. E., Andrade, M. J. M., Almeida, T. C., & Mattos, O. R. (2024). An Electrochemical and Raman Investigation of Guanine as an Environmentally Friendly Corrosion Inhibitor for API 5L X65 Steel in HCl Solutions. *Materials Research*, 27. Scopus. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2024-0078>
- Smitha, M., Mary, Y. S., Hossain, M., Resmi, K. S., Armaković, S., Armaković, S. J., Pavithran, R., Nanda, A. K., & Van Alsenoy, C. (2018). Two novel imidazole derivatives – Combined

- experimental and computational study. *Journal of Molecular Structure*, 1173, 221-239.  
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.06.110>
- Soudani, M., Hadj Meliani, M., El-Miloudi, K., Azari, Z., Sorour, A. A., Merah, N., & Pluvinage, G. (2018a). Reduction of hydrogen embrittlement of API 5l X65 steel pipe using a green inhibitor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(24), 11150-11159.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.236>
- Soudani, M., Hadj Meliani, M., El-Miloudi, K., Azari, Z., Sorour, A. A., Merah, N., & Pluvinage, G. (2018b). Reduction of hydrogen embrittlement of API 5l X65 steel pipe using a green inhibitor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(24), 11150-11159.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.236>
- Sowmyashree, A. S., Somya, A., Rao, S., Kumar, C. B. P., Al-Romaizan, A. N., Hussein, M. A., Khan, A., Marwani, H. M., & Asiri, A. M. (2023). Estudio de la posible inhibición sostenible de la corrosión electroquímica de *Citrus limetta* sobre superficies de acero dulce en medios ácidos agresivos. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 984-994.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.039>
- Tamalmani, K., & Husin, H. (2020). Review on Corrosion Inhibitors for Oil and Gas Corrosion Issues. *Applied Sciences*, 10(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/app10103389>
- Tan, B., Fu, A., Guo, L., Ran, Y., Xiong, J., Marzouki, R., & Li, W. (2023). Insight into anti-corrosion mechanism of *Dalbergia odorifera* leaves extract as a biodegradable inhibitor for X70 steel in sulfuric acid medium. *Industrial Crops and Products*, 194, 116106.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116106>
- Tang, Y., Zhang, F., Hu, S., Cao, Z., Wu, Z., & Jing, W. (2013). Novel benzimidazole derivatives as corrosion inhibitors of mild steel in the acidic media. Part I: Gravimetric,

- electrochemical, SEM and XPS studies. *Corrosion Science*, 74, 271-282.  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.04.053>
- Tantawy, A. H., Soliman, K. A., & Abd El-Lateef, H. M. (2020). Novel synthesized cationic surfactants based on natural piper nigrum as sustainable-green inhibitors for steel pipeline corrosion in CO<sub>2</sub>-3.5%NaCl: DFT, Monte Carlo simulations and experimental approaches. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119510.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119510>
- Umoren, S. (2020). *Corrosion Inhibitors in the Oil and Gas Industry* | Wiley. Wiley.Com.  
<https://www.wiley.com/en-ie/Corrosion+Inhibitors+in+the+Oil+and+Gas+Industry-p-9783527346189>
- Umoren, S. A., Obot, I. B., Madhankumar, A., & Gasem, Z. M. (2015). Performance evaluation of pectin as ecofriendly corrosion inhibitor for X60 pipeline steel in acid medium: Experimental and theoretical approaches. *Carbohydrate Polymers*, 124, 280-291.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.02.036>
- Usman, B. J., Gasem, Z. M., Umoren, S. A., & Solomon, M. M. (2019). Eco-friendly 2-Thiobarbituric acid as a corrosion inhibitor for API 5L X60 steel in simulated sweet oilfield environment: Electrochemical and surface analysis studies. *Scientific Reports*, 9(1), 830.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-37049-w>
- van Eck, Ness Jan & Waltman, & Ludo. (2025, abril). *VOSviewer—Visualizing scientific landscapes*. VOSviewer. <https://www.vosviewer.com//>
- Verma, C., Quraishi, M. A., & Ebenso, E. E. (2018a). Microwave and ultrasound irradiations for the synthesis of environmentally sustainable corrosion inhibitors: An overview.

- Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 10, 134-147.  
<https://doi.org/10.1016/j.scp.2018.11.001>
- Verma, C., Quraishi, M. A., & Ebenso, E. E. (2018b). Microwave and ultrasound irradiations for the synthesis of environmentally sustainable corrosion inhibitors: An overview. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 10, 134-147.  
<https://doi.org/10.1016/j.scp.2018.11.001>
- Wang, C., Zou, C., & Cao, Y. (2021). Electrochemical and isothermal adsorption studies on corrosion inhibition performance of  $\beta$ -cyclodextrin grafted polyacrylamide for X80 steel in oil and gas production. *Journal of Molecular Structure*, 1228, 129737.  
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129737>
- Yadav, S., Raman, A. P. S., Singh, M. B., Massey, I., Singh, P., Verma, C., & AlFantazi, A. (2024). Green nanoparticles for advanced corrosion protection: Current perspectives and future prospects. *Applied Surface Science Advances*, 21, 100605.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2024.100605>
- Yeganeh, M., Heydarie, Y., Shahryari, Z., Asadi, N., Kahkesh, H., & Ramezanalizadeh, H. (2025). Corrosion Inhibitor of API Pipeline Steels: A Review. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 11(2), 44. <https://doi.org/10.1007/s40735-025-00965-2>
- Zaher, A., Lgaz, H., Boukhraz, A., Aldalbahi, A., Lee, H., Bourkhiss, B., & Ouhssine, M. (2024). Bio-Based Corrosion Inhibition of Carbon Steel Using Ammi visnaga L. Essential Oil in Acidic Mediums: Experimental Analysis and Molecular Modeling. *Coatings*, 14(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/coatings14121556>

Zakeri, A., Bahmani, E., & Aghdam, A. S. R. (2022). Plant extracts as sustainable and green corrosion inhibitors for protection of ferrous metals in corrosive media: A mini review.

*Corrosion Communications*, 5, 25-38. <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2022.03.002>

Zhao, F., Cui, C., Dong, S., Xu, X., & Liu, H. (2023). An overview on the corrosion mechanisms and inhibition techniques for amine-based post-combustion carbon capture process.

*Separation and Purification Technology*, 304, 122091.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122091>

Zotero. (s. f.). Zotero | Tu asistente personal de investigación. de <https://www.zotero.org>