

**Estudio conceptual de los polímeros naturales como inhibidores verdes de la corrosión en
aceros al carbono para aplicaciones en medios ácidos**

Julián Andrés Medrano Camacho y Camilo Andrés Romero Rodríguez

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Director:

Darío Yesid Peña Ballesteros

PhD. en corrosión

Codirector:

Juan Carlos Orozco Agamez

MSc. en Ingeniería Química

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Físicoquímicas

Escuela De Ingeniería Metalúrgica y Ciencia De Materiales

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Primero que todo a Dios, por darme la oportunidad de estudiar la carrera que más me gusta, así como también la fortaleza de poder terminarla.

A mi padre Juan Alberto Romero Navarro y a mi abuelo Orlando Rodríguez Pallares, quienes partieron al cielo, hoy cumpla sus sueños de verme convertido en un profesional con principios, capacidades y valores.

A las mujeres que más quiero, mi madre Yaneth Patricia Rodríguez Herrera, mi abuela Isabel Herrera de Rodríguez y mi novia María Alexandra Ortiz Solano, por estar siempre a mi lado, acompañándome incondicionalmente y demostrándome siempre su amor en todo momento y circunstancia.

A mi familia que siempre está conmigo, apoyándome y motivándome en el logro de todas mis metas.

A los amigos y compañeros con quienes compartí un sinnúmero de experiencias a lo largo de mi carrera como estudiante de ingeniería, por ayudarme cuando más lo necesitaba y por brindarme su amistad incondicional.

Camilo Andrés Romero Rodríguez

Dedicatoria

A mis amados padres, Isabel Camacho Vega y Alfonso Medrano Echeverría, por el constante esfuerzo y la dedicación que han invertido en mi desarrollo profesional y personal, por una crianza llena de amor y apoyo para cada sueño que he deseado cumplir.

A mi hermano, Michael Alfonso Medrano Camacho, por ser un gran ejemplo y mi amigo desde pequeño, por apoyarme durante cada etapa de mi vida y enseñarme a trabajar fuerte por lo que anhelo.

A mi familia, por enseñarme a ser resiliente, humilde y trabajador; por motivarme a cumplir mi proyecto de vida de la mano de los que amo.

A mi prometida, Valeri José Rodríguez Trillos, por ser mi compañera de vida y llenarme de paz en los momentos difíciles.

A mis amigos y compañeros, quienes hicieron de mi paso por la universidad una gran etapa, llena de anécdotas, aprendizaje y buenos momentos.

Julián Andrés Medrano Camacho

Agradecimientos

A mi director y codirector, por apoyarme, brindarme sus conocimientos y orientaciones durante todo el proceso del trabajo de tesis.

A mi compañero de tesis Julián Andrés Medrano Camacho, amigo incondicional, con quien construimos grandes aprendizajes a lo largo de esta gran experiencia.

A mis padres por permitirme estudiar en una de las mejores universidades que tiene el país, por motivarme y apoyarme en cada uno de mis sueños, mis logros son la motivación que hace que cada esfuerzo valga la pena.

A mi familia y amigos, por brindarme su ayuda en este camino, por estar ahí cuando más lo necesitaba, por compartir cada experiencia vivida.

Camilo Andrés Romero Rodríguez

Agradecimientos

En primera instancia a Dios, por brindarme todas las oportunidades para llegar a este punto, por permitirme el privilegio de ingresar a tan buena universidad y tener el apoyo de mi familia, por darme fuerza cuando el camino se hacía difícil y poner en mi vida a las personas indicadas.

A mi director, codirector y profesores, por ser fuente conocimientos y orientación en este arduo camino, por formarme y prepararme para un mundo laboral, y aún más, para la vida.

A mi compañero de tesis y amigo Camilo Andrés Romero Rodríguez, que, a pesar de los momentos difíciles, fue constante y tuvo fuerza para culminar de la mejor forma esta etapa de nuestras vidas.

A mis padres, por creer en mí y no abandonarme en ninguna etapa de mi proceso académico, por darme el privilegio tener educación y llenarme de valores.

A mi prometida, familia y amigos, por hacer más ameno para mí este proceso e impulsarme a sacar adelante mi proyecto de vida.

Julián Andrés Medrano Camacho

Tabla De Contenido

Introducción.....	12
1 Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2 Tipos De Inhibidores.....	15
2.1 Inhibidor Catódico.....	15
2.2 Inhibidor Anódico.....	16
2.3 Inhibidor Orgánico.....	17
2.4 Inhibidor Inorgánico.....	18
3 Mecanismos De Adsorción De Los Inhibidores Verdes.....	19
3.1 Isotermas.....	20
3.1.1 Langmuir.....	21
3.1.2 Freundlich.....	21
3.1.3 Temkin.....	22
3.1.4 Frumkin.....	22
3.2 Tipos De Adsorción.....	23
3.2.1 Adsorción Física.....	24
3.2.2 Adsorción Química.....	24
4 Discusión De Resultados.....	25
4.1 Temperatura.....	25
4.2 Concentración y Estructura Del Polímero Con Respecto Al Proceso De Adsorción y Eficiencia De La Inhibición.....	27
4.3 Tiempo De Inmersión Con Respecto A La Morfología Del Acero y La Eficiencia De Inhibición.....	30
5 Polímeros Naturales.....	34
5.1 Gomas.....	36
5.1.1 Goma Xantana.....	36
5.1.2 Moringa Oleifera.....	37
5.1.3 Goma Serrada De Boswellia.....	37
5.1.4 Exuado Terminaliamentaly (Getm).....	37
5.1.5 Goma De Acacia (Ga).....	38
5.1.6 Biomasa De Pennisetum Purpureum.....	38
5.1.7 Goma De Fenogreco.....	38
5.1.8 Goma Árábica.....	39
5.1.9 Goma Guar.....	39
5.1.10 Azadirachta Indica.....	39
5.1.11 Goma Árábica Plata.....	40

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

5.1.12 Locust Bean Gum O Algarrobo	40
5.2 Lignina	40
5.2.1 Quitosano	41
5.2.2 Combinación De Celulosa Y Lignina Extraída De La Cáscara Del Pistacho.....	41
5.2.3 Alanina.....	41
5.2.4 Glicina.....	42
5.2.5 Ácido Acíclico	42
5.2.6 Lignina De Soda	42
5.2.7 Lignina De Organos olv.....	42
5.2.8 Lignina De Kraft.....	43
6 Conclusiones.	44
Referencias Bibliográficas.....	46

Lista De Tablas

Tabla 1. Estructura De La Floxacina Con Respecto A La Eficiencia De Inhibición..... 29
Tabla 2. Concentración De La Moringa Con Respecto Al Tiempo De Inmersión..... 31
Tabla 3. Especificaciones De Los Distintos Tipos De Polímeros Naturales.....34

Lista De Figuras

Figura 1. Isoterma De Langmuir Y Freundlich Para La Adsorción De Pb^{2+} En XS.....	20
Figura 2. Comportamiento De La Dextrina Con Respecto A La Concentración, Porcentaje De Eficiencia Y Tasa De Corrosión..	29
Figura 3. Micrografía Del Acero Al Carbono N80 Con Proceso De Inhibición..	32
Figura 4. Micrografía Del Acero Al Carbono N80 Sin Proceso De Inhibición.....	32
Figura 5. Micrografía Del Acero Al Carbono N80 Con La Presencia De La Goma Exudada.....	33

Resumen

Título: Estudio conceptual de los polímeros naturales como inhibidores verdes de corrosión en aceros al carbono para aplicaciones en medios ácidos*

Autores: Julián Andrés Medrano Camacho, Camilo Andrés Romero Rodríguez**

Palabras claves: Corrosión, conciencia ecológica, polímero natural, gomas, ligninas.

Descripción: La corrosión representa uno de los mayores problemas en el uso de los materiales. Es por esto que la búsqueda de métodos para controlarlo(a) se ha convertido en una tarea permanente y compleja para las industrias; el empleo de técnicas tóxicas y peligrosas afectan al medio ambiente, generando grandes y graves problemas a la humanidad.

Estas razones han conllevado a la búsqueda de alternativas que de forma precisa y adecuada permitan mitigar la corrosión a través del uso de materiales biodegradables, no tóxicos, económicos y efectivos, siendo los polímeros naturales una de las alternativas más promisorias.

En este estudio, se recopiló y analizó múltiples investigaciones asociadas a la eficiencia de inhibición de las gomas y las ligninas como inhibidores naturales de corrosión, teniendo en cuenta como eje de estudio evitar el impacto ambiental generado por los inhibidores tradicionales de corrosión en aceros al carbono para aplicaciones en medios ácidos.

Dentro de los resultados se identificaron eficiencias de inhibición en las gomas de 74% a 97% y las ligninas de 79.9% a 92%, demostrando que, en general, la eficiencia aumenta a mayor concentración del inhibidor, no obstante, cuando la temperatura aumenta, tiende a disminuir la eficiencia de adsorción física, a diferencia de la adsorción química que tiende a incrementar.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros, PhD. en corrosión. Codirector: Juan Carlos Orozco Agamez, MSc. en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Conceptual study of natural polymers as green corrosion inhibitors in carbon steels for applications in acidic media*

Authors: Julián Andrés Medrano Camacho, Camilo Andrés Romero Rodríguez**

Keywords: Corrosion, ecological awareness, natural polymer, gums, lignins.

Description: Corrosion represents one of the major problems in using materials. Therefore, the search for methods to control it (a) has become a permanent and complex task for industries; using toxic and dangerous techniques to the environment, generating great and serious problems for humanity.

These reasons have led to a search for alternatives that accurately and adequately mitigate corrosion through the use of biodegradable, non-toxic, inexpensive and effective materials, with natural polymers being one of the most promising alternatives.

In this study, multiple investigations associated with the inhibition efficiency of gums and lignins as natural corrosion inhibitors were compiled and analyzed, considering the avoidance of the environmental impact generated by traditional corrosion inhibitors in carbon steels as the focus of study for applications in acidic media.

Within the results, inhibition efficiencies were identified in gums from 74% to 97% and lignins from 79.9% to 92%, showing that, in general, the efficiency increases with a higher concentration of the inhibitor, however, when the temperature increases, tends to decrease the efficiency of physical adsorption, unlike chemical adsorption that tends to increase.

* Bachelor Thesis.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros, PhD. en corrosión. Codirector: Juan Carlos Orozco Agamez, MSc. en Ingeniería Química.

Introducción

Los materiales son elementos fundamentales en el desarrollo de trabajos que contribuyen al mejoramiento y avance progresivo de los distintos proyectos que buscan generar una mejor calidad de vida. Sin embargo, la labor que se viene ejecutando en este ámbito, ha tenido que enfrentar varios tropiezos.

Una de las grandes problemáticas que se tiene actualmente y que se ha tenido por muchos años en el uso de los materiales es la corrosión. Este problema ha generado gran preocupación por parte de los entes investigadores y de las empresas alrededor del mundo; quienes, han empezado a optar por medidas que logren limitar, mitigar y controlar este proceso. Muchos de los métodos utilizados no han sido los más adecuados, ya que sus procesos no van de la mano con el medio ambiente, e incluso se vuelven tóxicos para los seres humanos; lo que ha generado que las investigaciones se centren en encontrar medidas que ataquen a la corrosión, y que a su vez, beneficien la ecología y la economía, por lo que los polímeros naturales representan una alternativa atractiva que se ajusta a lo que se requiere desde el desarrollo sostenible en la lucha contra la corrosión, gracias a su fácil biodegradación, no toxicidad, costo reducido, disponibilidad, estructura molecular y el efecto de su cobertura en la superficie del metal.

Los polímeros naturales hacen referencia a sustancias macromoleculares compuestas por unidades estructurales relativamente simples, de bajo peso molecular, generalmente presentes en las plantas y los animales; especialmente, en gomas naturales o en la lignina que es extraída de la madera. Las gomas tienen como especificaciones principales que son moléculas de alto peso molecular constituidas por polímeros de unidades monosacáridos y derivados, unidos por enlaces glucosídicos logrando la formación de largas cadenas, localizándose específicamente en las

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

paredes celulares de las plantas y microorganismos; mientras, que la lignina se destaca por ser un tipo de polímero natural formado por una diversidad de organización de monómeros que se depositan en las paredes celulares de las plantas, en la madera o corteza, debido a su excelente rigidez). Además, estos componentes incluyen alcaloides, pigmentos, aminoácidos y taninos orgánicos que exhiben propiedades inhibitorias (Gooch, 2011).

Para lograr un destacado estudio conceptual, inicialmente se buscó profundizar sobre las distintas problemáticas que se presentan en la ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales; logrando identificar que la corrosión es uno de los mayores obstáculos que afectan actualmente el uso de los materiales. El problema va más allá de esto, debido a que los métodos tradicionales usados para combatir dicho proceso son poco efectivos y tóxicos, generando que la corrosión se convierta en una problemática difícil de controlar. El propósito del estudio conceptual es ejecutar una revisión bibliográfica que genere comprimir y explicar de una manera crítica los estudios que se han llevado a cabo en los últimos años, a través de artículos y libros como lo son los recursos de Scienedirect, Springer, Elsevier, entre otros. Posteriormente, se definió algunos objetivos que van ligados con los distintos interrogantes que se tienen a cabo con el implemento de polímeros naturales; tales como: ¿cuál es el efecto de la temperatura, la concentración, el tiempo de inmersión y la estructura con respecto a la eficiencia de inhibición? Finalmente, se procedió a responder cada una de las preguntas establecidas con el fin de definir cuáles tipos de polímeros naturales, principalmente gomas naturales y lignina, se pueden utilizar para suplir los retos actuales desde la perspectiva de desarrollo sostenible para inhibidores de corrosión.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Estudiar de manera conceptual la eficiencia de los polímeros naturales de gomas y lignina como inhibidores verdes de la corrosión en aceros al carbono para aplicaciones en medios ácidos, teniendo en cuenta las variables de la temperatura, concentración, estructura del polímero e incidencia del tiempo de inmersión.

1.2 Objetivos Específicos

- Estudiar el efecto que tiene la temperatura en la eficiencia de inhibición de polímeros naturales en medios ácidos por revisión bibliográfica.
- Analizar la influencia de la concentración y estructura de los polímeros naturales sobre el proceso de adsorción y eficiencia de la inhibición.
- Describir el efecto de incidencia del tiempo de inmersión sobre la morfología de los aceros al carbono y su relación con la eficiencia de la inhibición.

2 Tipos De Inhibidores

Los inhibidores de corrosión son el tipo de recubrimiento por el cual buscamos prevenir la corrosión de los materiales, teniendo como objetivo principal interrumpir el proceso electroquímico mediante la formación de una película, logrando obtener costos bajos y excelentes resultados. Los inhibidores se pueden clasificar según la composición química en orgánicos e inorgánicos, según los mecanismos de actuación pueden ser anódicos, catódicos y mixtos, siendo estos últimos capaces de inhibir o dificultar las reacciones anódicas y catódicas de forma simultánea (Patricia et al., 2014).

También es necesario tener en cuenta que los inhibidores dependen de otros factores según la composición química, a través de productos inorgánicos y orgánicos (tales como se requieren en este proyecto de investigación, a través de gomas naturales y la lignina como inhibidores verdes de la corrosión). Otra clasificación está determinada dependiendo de la aplicación que se necesite, tales como inhibidores en fase vapor, decapado, para pinturas, grasas, aceites y líquidos, como en el caso de las soluciones alcalinas (Gómez de León Hijes & Alcaraz Lorente, 2004).

Los tipos de inhibidores necesarios para la investigación de este estudio conceptual, se centran a los mecanismos de adsorción en los que pueden actuar los polímeros naturales en los aceros al carbono, para ello también se vuelve explícito definir conceptos a través de métodos anódicos o catódicos, y de la composición química.

2.1 Inhibidor Catódico

Los tipos de inhibidores catódicos son los más eficientes, ya que logra detener con valores altos de eficiencia y permanencia la corrosión de la superficie de un determinado material. Las aplicaciones de dichos inhibidores abarcan una gran cantidad de áreas laborales, tales como

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

industrias químicas, metalmecánicas, arquitectónicas, entre otras; esto debido a que la corrosión se comporta electroquímicamente como el ánodo de una pila de corrosión, por lo que la función principal es conseguir que dicho componente se pueda portar catódicamente. El método por el cual se lleva a cabo dicha protección catódica es que a través del proceso de oxidación es necesario aportar la cantidad suficiente de carga para que ocurra un desplazamiento, generando de esa manera un equilibrio en la reacción, por lo tanto, por medio de una fuente exterior se suministra corriente eléctrica a través de un ánodo auxiliar, logrando polarizar catódicamente el metal que se requiere proteger (Gómez de León Hijes & Alcaraz Lorente, 2004). Finalmente, el propósito principal del inhibidor catódico con respecto a su efectividad, se centra en que al momento de suministrar la corriente, se logra polarizar las áreas catódicas hasta alcanzar el valor del potencial en circuito abierto de las áreas anódicas, provocando mantener una superficie equipotencial en todo el metal, lo que ayuda a controlar la corrosión (Gómez de León Hijes & Alcaraz Lorente, 2004)(Cicek & Al-Numan, 2017).

2.2 Inhibidor Anódico.

Los tipos de inhibidores anódicos tienen como mecanismo principal la pasivación, cuando se varía el potencial hasta alcanzar una zona pasiva en la curva de polarización (Gómez de León Hijes & Alcaraz Lorente, 2004), esto se debe a que dichos inhibidores tienden a aumentar la polarización del ánodo, gracias a la formación de una capa pasiva de corrosión, teniendo como valor agregado la dependencia de la naturaleza y las condiciones termodinámicas del proceso, por lo que genera que algunos determinados tipos de inhibidores anódicos logren oxidarse con mayor facilidad, convirtiéndolos en peligrosos cuando se encuentran en condiciones deterioradas, ya que se produce el proceso corrosivo sin que llegue a formar la capa pasiva (Gómez de León Hijes & Alcaraz Lorente, 2004), lo que la convierte en el tipo de inhibidor con menor eficiencia y así como

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

una disminuida aplicabilidad a procesos industriales, y sobre todo inservible para soluciones ambientales que es el propósito principal del estudio conceptual.

En los inhibidores anódicos hay que tener en cuenta que el recurso que más se necesita para lograr la protección anódica como se mencionaba anteriormente es la pasivación, para ello se requiere de varios métodos, dentro de los que cuales se encuentra la adición al metal de elementos aleantes que aumenten directamente la capacidad de pasivación y el área catódica, teniendo como ejemplos principales la plata, el oro, el cobre, el paladio, entre otros (Gómez de León Hijes & Alcaraz Lorente, 2004), logrando de esa manera la aceleración de la pasivación del proceso corrosivo, mejorando y aumentando la posibilidad de inhibición (Cicek & Al-Numan, 2017).

2.3 Inhibidor Orgánico

Los inhibidores orgánicos tienen como función principal la adsorción física o química sobre la superficie de un determinado metal, para ello, dicha adsorción física ocurre por la atracción electrostática entre los compuestos orgánicos de inhibición y los dipolos que se encuentran en las cargas eléctricas de la superficie del metal; mientras, que la adsorción química o quimisorción tiene como desventaja que es un proceso más lento que se divide generalmente en dos etapas, en la primera los compuestos orgánicos se fijan a través de los polos de la superficie del metal, de forma similar a lo ocurrido en la adsorción física; para que finalmente en la segunda etapa se logre la formación de iones complejos o formación de precipitados sobre la superficie (Bilurbina Alter & Liesa Mestres, 2003).

En cuanto al estudio conceptual es necesario tener en cuenta que los polímeros naturales en forma de gomas naturales y de lignina, son compuestos orgánicos; por lo que la definición de inhibidores orgánicos empieza a fundamentarse a la aplicación del desarrollo de inhibidores verdes

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

que nos ayude a cumplir con los propósitos del proyecto que va más allá de generar ganancias, ya que busca ayudar el medio ambiente, ser sostenible y principalmente contribuir con el mejoramiento de las condiciones de la humanidad.

2.4 Inhibidor Inorgánico

Los inhibidores inorgánicos son sustancias que protegen los materiales por medio de la pasivación, teniendo como objetivo principal recubrir un metal para tratar de disminuir la reactividad química de una superficie, por eso, se conocen como inhibidores inorgánicos pasivantes a los agentes que requieren de la presencia de oxígeno disuelto para facilitar la adsorción sobre la superficie de un material, para ello, aplicativamente es necesario tener en cuenta la concentración crítica que está ligada a altas temperaturas de nitratos o cromatos (Bilurbina Alter & Liesa Mestres, 2003).

Los inhibidores inorgánicos son los menos recomendables para el control de la corrosión si tomamos en cuenta la finalidad del proyecto, ya que generalmente son tóxicos y caros, e incluso en algunos tipos de metales como aceros inoxidable o aleaciones de níquel para que ocurra la pasivación es necesario la humedad, lo que generarían cantidades de hidróxidos (Bilurbina Alter & Liesa Mestres, 2003).

El estudio de inhibidores inorgánicos ha generado que el campo de la corrosión y control de dicha problemática, se convierta en un punto de partida para mejorar los métodos de inhibición, por eso, los inhibidores orgánicos, así como su utilidad, se muestran como la solución más aceptable y alternativa a los inconvenientes que sufren diariamente las empresas o fábricas que exponen constantemente sus materiales en el desarrollo de la humanidad, por lo que para llevar a cabo la práctica es necesario tener en cuenta todos los conceptos relacionados: tipos de inhibidores,

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

mecanismos de adsorción, isotermas, entre otros, que ayuden a elegir el tipo de inhibidor más eficiente.

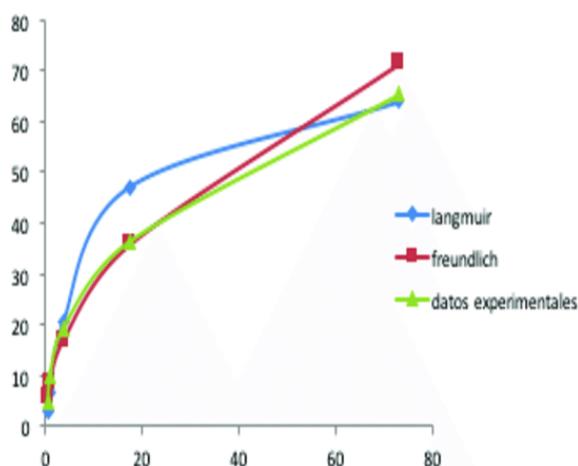
3 Mecanismos De Adsorción De Los Inhibidores Verdes

La adsorción es un fenómeno que da lugar a la inhibición de la corrosión en el acero, debido a que esta consiste en la adhesión de iones o átomos sobre la superficie a proteger, formando una película sobre ésta. La cantidad, distribución y demás parámetros dependen del mecanismo que se da entre el adsorbente y el adsorbato. Determinar dicho mecanismo de adsorción, dependerá de parámetros termodinámicos como la entalpía (ΔH°), energía libre de Gibbs (ΔG°) y entropía ΔS° , permitiendo identificar con la siguiente fórmula la energía de adsorción sobre la superficie del metal: $\Delta G_{ads}^0 = -RT \ln(55,5k_{ads})(I)$

Para entender mejor esta ecuación se definirán sus parámetros, R es la constante de gas (por lo general, $8,314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$), T es la temperatura absoluta (en Kelvin), la constante 55,5 representa la concentración molar de agua en la solución ácida, hallando finalmente el k_{ads} con la isoterma que se cumpla mejor para cada caso. El siguiente ejemplo fue tomado de un estudio titulado “Exploitation of waste woody for obtaining ion exchange resins” donde se observa en el eje x la concentración y en el eje y la cantidad adsorbida, a dicha gráfica se le hallará un coeficiente de correlación de Pearson (r), el cual dará un valor más cercano a ‘1’ (siendo 1 la misma gráfica) cuanto más similitud tenga una gráfica con respecto a otra. Para identificar que isoterma es la indicada basta con seleccionar el ‘r’ más cercano a 1.

Figura 1.

Isoterma de Langmuir y Freundlich para la adsorción de Pb^{2+} en XS.



Nota: Adaptado de (Nuñez et al., 2017).

En dicha gráfica, la isoterma de Freundlich es la más acertada, comprobándose visualmente y con el factor $r=0,98$, siendo mayor que el $r=0,93$ de Langmuir.

La eficiencia de un inhibidor de corrosión se ve afectado por distintos factores, uno de los principales es el grado de cobertura que se logra sobre la superficie (Jmial et al., 2017), del modo de acción del adsorbato y de su capacidad para adsorberse sobre la superficie metálica, por tanto, es fundamental conocer qué isoterma dará mejor y más acertada información acerca de la interacción entre el metal y el inhibidor, ya que identificar la isoterma correcta no solo nos dará la variable desconocida (k_{ads}), sino que también facilitará la comprensión del mecanismo de adsorción (Azzaoui et al., 2017).

3.1 Isotermas

Las isotermas, como ya se mencionó anteriormente, ayudan a determinar la variable k_{ads} , ayudando a comprender el mecanismo de adsorción predominante, esto se hace por medio de modelos matemáticos que ayudan a predecir este comportamiento; estos modelos estiman la

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

cantidad de adsorbato existente en el adsorbente y su interacción a una temperatura y pH constante (Ray et al., 2020). Hay varias isothermas que cumplen con distintos parámetros de adsorción, a continuación, se citarán algunas de las más representativas para nuestros casos en particular:

3.1.1 *Langmuir*

Es el modelo más estudiado, la mayoría de los inhibidores obedecen a esta función y por lo general se asocia a un tipo de adsorción física. Se representa por la siguiente fórmula:

$$\log\left(\frac{C}{\theta}\right) = \log C - \log k_{ads} \quad (2) \quad \text{o} \quad \frac{C}{\theta} = \frac{1}{k_{ads}} + C \quad (2)$$

Siendo C la concentración del inhibidor, θ la cobertura en la superficie y k_{ads} la constante de equilibrio de adsorción. A menor k_{ads} , implicará una capacidad de adsorción más débil (Wei et al., 2020).

Esta isoterma se basa en que la superficie adsorbida será una monocapa homogénea, por tanto, hay un número limitado de sitios activos disponibles para interactuar con el adsorbato y, por ende, cuando los sitios disponibles se agotan no se producirá más adsorción en la superficie (Ray et al., 2020).

3.1.2 *Freundlich:*

Este modelo se aplica a procesos de adsorción ocurridos en superficies no homogéneas, por tanto, su estructura será multicapa (Ayawei et al., 2017), se representa con la siguiente formula:

$$\log\left(\frac{\theta}{C}\right) = \log K_{ads} + n \log(1 - \theta) \quad (3) \quad \text{o} \quad \left(\frac{\theta}{1-\theta}\right)^{\frac{1}{n}} = k_{ads} C \quad (4)$$

Donde C la concentración del inhibidor, θ la cobertura en la superficie, k_{ads} la constante de equilibrio de adsorción y n intensidad de adsorción.

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

Cuando el n es mayor que 1, habrá una adsorción favorable en el inhibidor sobre la superficie del metal, además, un mayor K_{ads} implicará una fuerte capacidad de adsorción (Wei et al., 2020).

3.1.3 Temkin:

En este modelo, el calor de adsorción de las moléculas en la capa disminuirá linealmente cuando se aumenta la cobertura en la superficie, además, se asocia a un tipo de adsorción química (Ayawei et al., 2017) y se representa mediante la siguiente formula:

$$\theta = \left(\frac{1}{f}\right) \ln k_{ads} C \quad (5) \quad \text{o} \quad \exp(f\theta) = k_{ads} C \quad (6)$$

Siendo C la concentración del inhibidor, θ la cobertura en la superficie, k_{ads} la constante de equilibrio de adsorción y f un parámetro de adsorción del inhibidor.

En general, si $f = 0$ no habrá interacción, si es mayor a 0 habrá atracción y si es menor a 0, habrá repulsión entre las moléculas del inhibidor y la superficie del metal (Wei et al., 2020).

3.1.4 Frumkin:

Este modelo se representa mediante la siguiente formula:

$$\log\left(\frac{\theta}{1-\theta}\right) = \log k_{ads} + y \log C \quad (7) \quad \text{o} \quad \frac{\theta}{1-\theta} \exp(-2f\theta) = K_{ads} C \quad (8)$$

Donde C la concentración del inhibidor, θ la cobertura en la superficie, k_{ads} la constante de equilibrio de adsorción y ' y ' un parámetro de adsorción del inhibidor.

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

En resumen, si 'y' es igual a 0 no habrá interacción, si es mayor a 0 habrá atracción y si por el contrario es menor a 0 habrá repulsión entre las moléculas del inhibidor y la superficie del metal (Wei et al., 2020).

3.2 Tipos de adsorción

Como ya se ha reiterado, en el proceso de inhibición de la corrosión, el primer mecanismo y, por ende, el principal, será el de la adsorción de éste sobre el metal, viéndose afectado en su totalidad por parámetros como la temperatura y concentración, haciendo indispensable identificar qué tipo de adsorción se presenta en cada caso particular entre el adsorbato con la superficie (Ameh & Eddy, 2014).

Hay tres tipos de adsorción sobre la superficie, que son adsorción física, química y mixta. Esta interacción dependerá de la carga superficial del sustrato, por ejemplo, la interacción de un inhibidor cargado opuestamente a una superficie dará una adsorción física. Otro ejemplo, es el caso de una superficie metálica sin carga, cationes ni aniones adsorbiéndose en la superficie, requiriéndose una reacción química entre estas (Wei et al., 2020).

Para identificar estos parámetros se hace necesario un análisis como la Espectroscopía Fotoelectrónica de Rayos X (XPS), ya que nos proporcionará parámetros termodinámicos de adsorción con los cuales se sabrá si el inhibidor se absorbe en la superficie por mecanismos físicos, químicos o mixtos (Azzaoui et al., 2017).

Para identificar si se trata de fisorción, quimisorción o adsorción mixta, se centran esfuerzos en identificar la entalpía absoluta hallada, esto debido a que la fisorción presentará valores de entalpía de adsorción menores a $\pm 20\text{KJ mol}^{-1}$ hasta $\pm 40\text{KJ mol}^{-1}$, la quimisorción

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

valores menores a ± 80 KJ mol⁻¹ hasta ± 240 KJ mol⁻¹ (Devi et al., 2020) (Ameh & Eddy, 2014). (Wei et al., 2020).

La adsorción se clasifica según la naturaleza que mantiene las moléculas unidas de la superficie adsorbente y el adsorbato, siendo éstas afectadas cuando se supera el límite de la energía de activación del producto, por tanto, se verá afectada cuando se añade temperatura superando dicho umbral, ya que el sistema compensa este exceso de calor mediante la desorción de las partículas, bajando así la cobertura, las partículas adsorbidas y por ende la eficiencia del inhibidor. Los tipos de adsorción explicados a detalle son:

3.2.1 Adsorción Física

En este tipo de adsorción, las partículas del adsorbato se mantienen en la superficie del adsorbente por fuerzas como la de van der Waals, las cuales no presentan transferencia ni intercambio de electrones, lo que en otras palabras resulta ser una unión con fuerzas muy débiles; teniendo como gran desventaja la temperatura, ya que, si esta aumenta, la eficiencia de la adsorción disminuirá, debido a su baja energía de activación, logrando alcanzar dicha energía muy rápido y por ende presentando una desorción de partículas posterior (Huang et al., 2013).

3.2.2 Adsorción Química

También llamada quimisorción, es un tipo de adsorción que presenta una reacción química en la cual existe transferencia o intercambio de electrones, esto produce una fuerte unión entre el adsorbato y adsorbente. Debido a la naturaleza de esta reacción, solo se presenta entre la monocapa principal y la superficie, completando con enlaces físicos entre las moléculas de los adsorbentes subsiguientes.

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

Este tipo de adsorción presenta un aumento de efectividad en cuanto incrementa la temperatura hasta cierto punto, dicho punto se limita por la energía de activación, ya que después de superar este límite, la eficiencia decaerá gradualmente a causa de la desorción; esta propiedad también la exhiben algunos casos de adsorción mixta (Mobin et al., 2020)(Azzaoui et al., 2017).

La entalpía para esta adsorción siempre será mayor que la entalpía en una adsorción física, siendo esta de 80 a 240 KJ mol⁻¹ (Patricia et al., 2014).

4 Discusión De Resultados

4.1 Temperatura

Como se evidenció en el apartado anterior, la temperatura incide directamente en la eficiencia que logran los polímeros naturales sobre la superficie metálica, esto debido a la codependencia que tiene el tipo de inhibidor orgánico con su mecanismo de adsorción, variando si es de tipo físico o de tipo químico.

La codependencia se basa en que el inhibidor tendrá un proceso de desorción cuando la temperatura asciende y supera el umbral de la energía de activación. Dicha energía es posible determinarla a partir de la ecuación de Arrhenius:

$$C_R = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (10)$$

Donde T es la temperatura, A un factor pre-exponencial de Arrhenius, R es la constante de universal de los gases y E_a la energía de activación. Los valores de E_a son considerablemente altos en presencia de los inhibidores (Chauhan et al., 2018). Además, el aumento de temperatura, por lo general, incrementa la disolución del metal en medio ácido, en otras palabras, este aumento incrementaría la tasa de corrosión (Material Technology Institute, 2012).

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

Todo esto es soportado por diversos artículos, tal es el caso del estudio titulado “Recent advances in biopolymers/carbohydrate polymers as effective corrosion inhibitive macromolecules: A review study from experimental and theoretical views” donde se presentan variadas ligninas como inhibidores verdes, que a manera general atribuyen una mayor pérdida de peso a un aumento de temperatura, lo que puede indicar una menor eficiencia del inhibidor, causada por la desorción del adsorbente (Shahini et al., 2021).

El tipo de adsorción importa y es evidenciado en la energía de activación requerida para cada caso, puesto que para un tipo de adsorción química habrá, por lo general, una energía de activación o barrera mucho más alta, mientras que en una reacción de adsorción física esta variable de energía de activación será relativamente baja. Dicha energía de activación es la cantidad mínima de energía para que una reacción tenga lugar, tanto como pasar de reactivos a productos, como de productos a reactivos (energía de activación inversa) (Upadhyay, 2006).

Un ejemplo de esta ineficiencia contra el aumento de la temperatura se refleja en un estudio titulado “Eco friendly green inhibitor Gum Arabic (GA) for the corrosion control of mild steel in hydrochloric acid medium” donde se observa un tipo de adsorción mixto en el que sus resultados muestran una caída de 95% de eficiencia a 30°C a un 83% a 60°C bajo los mismos parámetros de inhibidor y medios (Azzaoui et al., 2017).

No obstante, para algunos casos de adsorción química o mixta, se presenta un leve aumento de la capacidad de adsorción y por ende de la eficiencia de inhibición mientras se incrementa la temperatura, esto hasta que se llega a el límite de la energía de activación anteriormente explicado, después del cual se presenta desorción de las partículas adheridas. Un ejemplo de esto se muestra en el estudio titulado “Experimental and theoretical assessment of almond gum as an economically and environmentally viable corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl” donde la goma estudiada,

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

en este caso la almendra, tiene un tipo de adsorción mixto, en el cuál la temperatura aumenta el porcentaje de inhibición llegando de un 85,5% a 30°C hasta un 96,37% a 60°C, porcentaje que decae al aumentar más la temperatura (Mobin et al., 2020). Una manera de contrarrestar un poco esta barrera tan cercana es mediante el aumento de la concentración, que hasta cierto punto mitiga esta falencia, esta relación se estudiará mejor en el siguiente apartado.

4.2 Concentración Y Estructura Del Polímero Con Respecto Al Proceso De Adsorción Y Eficiencia De La Inhibición

La concentración y la estructura del polímero natural son variables a tener en cuenta al momento de estudiar el proceso de inhibición de los materiales, en este caso específicamente de los aceros al carbono, para ello, es necesario encontrar la información necesaria para analizar y determinar el efecto que tiene dichas variables al momento de querer tener excelentes porcentajes de eficiencia de inhibición, así como el tipo de adsorción adecuada.

Cada uno de los estudios correspondientes al tema estudiado, tiene factores comunes y diferencias enmarcadas, ya que cada artículo tiene su aporte significativo de inhibidores verdes de la corrosión, específicamente en la goma natural, así como en la lignina que son utilizadas para demostrar o comprobar la eficacia que tiene en cada uno de los factores o variables necesarias para llevar a cabo un estudio más amplio y conciso para lograr resolver los objetivos, en este caso, dichos estudios analizados y evaluados dependen de lo complejo de su contenido; como es el caso de artículos que tiene el estudio de varios polímeros naturales en distintos materiales (incluido el acero al carbono), que ayuda a resolver el efecto de la concentración con respecto al porcentaje de la eficacia de inhibición y a su vez el efecto del tipo de adsorción, incluso si el tipo de estructura polimérica afecta dichos factores.

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

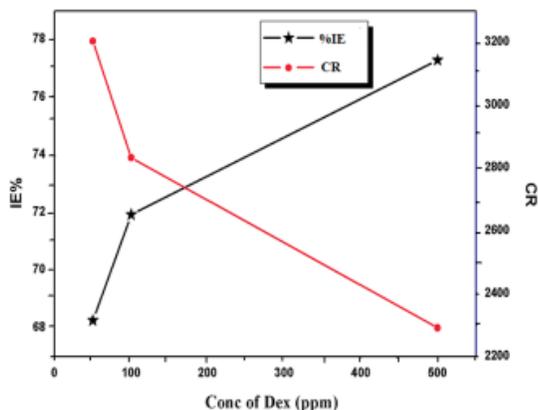
Varios estudios bibliográficos como es el caso de “A review on the assessment of polymeric materials used as corrosion inhibitor of metals and alloys”, hace referencia que el polímero natural polietilenglicol estudiado en la corrosión de un acero en medio de ácido sulfúrico, y con el análisis de técnicas como Microscopía Electrónica de Barrido, se determinó que a medida que se aumentó la concentración de dicho polímero, el porcentaje de inhibición tiende a aumentar. Otro de los estudios encontrados en este artículo, comprueba que cuando se estudia la goma *Raphia Hookeri*, la eficacia de inhibición aumenta cuando la concentración de dicho polímero es mayor, pero disminuye al momento de que la temperatura tiende a crecer, teniendo en cuenta de igual modo, que el modelo de adsorción que más se ajustó fue a través de la isoterma de Langmuir, lo que implica que dicho proceso de adsorción esté implicado directamente con la concentración del polímero natural (Arthur et al., 2013).

El estudio de “Floxacin: as Mediators in Enhancing the Corrosion Inhibition Efficiency of Natural Polymer Dextrin”, tiene como punto de partida las Floxacinas siendo medidores para mejorar la eficiencia de inhibición de la corrosión del polímero natural Dextrina, a partir de esto, las distintas técnicas y mediciones electroquímicas del artículo, permiten entender a través de comportamientos cómo la concentración y el tipo de la estructura del polímero, ayudan al mejoramiento o deficiencia del porcentaje de inhibición, por eso a través de la figura número 2, se muestra el comportamiento de la Dextrina con respecto a la concentración ubicada en el eje X de la figura y el porcentaje de eficiencia, así como la tasa de corrosión encontradas en el eje Y, por ello, se demuestra que a medida de un aumento de la concentración de dicho polímero, crece proporcionalmente la eficiencia de inhibición, así como la disminución de la tasa de corrosión, que es el objetivo primordial para cumplir con las expectativas de un inhibidor natural (Devi et al., 2020).

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

Figura 2.

Comportamiento de la Dextrina con respecto a la concentración, porcentaje de eficiencia y tasa de corrosión.



Nota: Adaptado de (Devi et al., 2020).

En la tabla número uno se puede referenciar la influencia de la estructura del polímero con respecto a la eficacia del inhibición; en este caso se puede analizar que dependiendo de la estructura molecular del polímero natural, mostrada en la figura número dos, el porcentaje de eficiencia tiende a variar, para ello, la composición química demuestra que es un factor clave a tener en cuenta, para que el control de la corrosión por parte de un inhibidor sea lo más adecuado al momento de seleccionarlo. (Devi et al., 2020).

Tabla 1.

Estructura de la Floxacina con respecto a la eficiencia de inhibición.

Conc de Dex [ppm]	Sin FQ		Con FQ 25 [ppm]					
			Ciprofloxacina		Levofloxacina		Norfloxacina	
	% IE	CR	% IE	CR	% IE	CR	% IE	CR
50	68,26	3203,78	85,31	1482,41	83,86	1628,71	85,31	1482,41
100	71,93	2833,17	86,04	1409,27	84,25	1589,69	86,43	1370,26
500	77,29	2291,89	86,47	1365,38	85,70	1443,40	89,98	1014,29
1000	79,61	2057,83	83,09	1706,73	82,90	1726,24	81,79	1838,39

Nota: Adaptado de (Devi et al., 2020).

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

Cada uno de los artículos demuestra que la influencia de la concentración de un polímero natural como las gomas y ligninas impacta de forma directamente proporcional a la eficiencia de un inhibidor, teniendo además en cuenta las variables de estructura de los polímeros y el tipo de adsorción, por lo que este objetivo presenta gran importancia al momento de cumplir las expectativas de un inhibidor de corrosión que cumpla con características de sostenibilidad, económico y de uso proporcionado en el mejoramiento y avance constante que tiene la humanidad.

4.3 Tiempo De Inmersión Con Respecto A La Morfología Del Acero Y La Eficiencia De Inhibición

El tiempo de inmersión es una variable fundamental para una adecuada selección del inhibidor con el objetivo de lograr altas eficiencias de inhibición, la cual al igual que la concentración del polímero, o la temperatura se convierten en variables críticas, varios artículos o estudios destacan la técnica de pérdida de peso como un procedimiento fundamental para la determinación o afectación de dicha variable a estudiar a través de fórmulas que relacionan la velocidad de corrosión, el porcentaje de inhibición, además de, por medio de técnicas microscópicas como es el caso de la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), se logra establecer la morfología de los aceros.

El estudio “Moringa oleifera gum exudate as corrosion inhibitor on mild steel in acidic medium”, establece la moringa como medio de inhibición sobre el acero al carbono en medios ácidos, a través de técnicas no electroquímicas como la pérdida de peso, teniendo en cuenta distintos valores de concentración de dicha goma sumergida en ácido clorhídrico, con un tiempo de ocho horas, obteniendo resultados mostrados en la tabla número dos, donde establece y toma muestras cada 2 horas, en las que se puede observar que a medida que aumenta la concentración y

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

el tiempo de inmersión crece la eficiencia de inhibición, aunque esto sucede al cabo de 6 horas, debido a que al momento de contabilizar la octava hora de dicho tiempo de inmersión, la eficacia de inhibición cae drásticamente. Como ejemplo de lo anterior, en una concentración de 8 (g/L) de esta goma, se obtuvieron al cabo de 6 horas un porcentaje de eficiencia de 92.24%, al aumentar el tiempo de exposición la eficiencia disminuye a un 66.21%; esto se debe a que la inhibición llega un límite de tiempo adecuado y después de un intervalo largo de exposición, se puede biodegradar debido al reposo en el que se encuentra la moringa, afectando de esa manera la eficiencia de inhibición (Jalajaa et al., 2019).

Tabla 2.

Concentración de la moringa con respecto al tiempo de inmersión.

Concentración Goma Moringa (g/L)	1 hora		2 horas		4 horas		6 horas		8 horas	
	CR (mpy)	IE (%)								
2	0,01668	63,33	0,02199	63,46	0,01621	66,27	0,02066	75,61	0,03878	29,48
4	0,01596	64,89	0,02000	66,77	0,01362	71,65	0,00670	92,10	0,03100	43,62
6	0,01251	72,50	0,01200	80,06	0,00931	80,63	0,00518	93,89	0,02280	58,53
8	0,01195	73,75	0,00749	87,56	0,00554	88,46	0,00489	94,24	0,01858	66,21
10	0,00906	80,08	0,00711	88,35	0,00536	88,86	0,00386	95,46	0,01891	65,60

Nota: Adaptado de (Jalajaa et al., 2019).

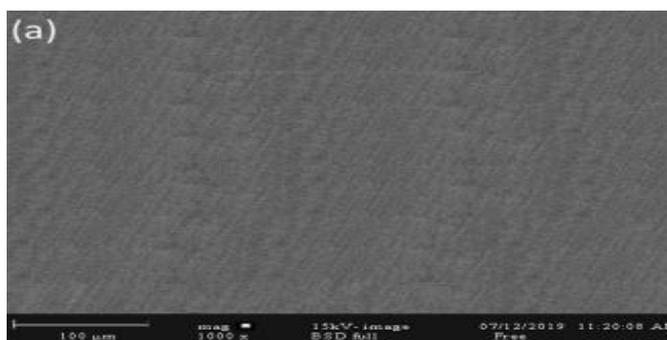
El estudio “Experimental and surface morphological study of corrosion inhibition of N80 carbon steel in HCl stimulated acidizing solution using gum exudate from Terminalia Mentaly” establece la goma natural exudada Terminaliamentaly como un inhibidor verde de la corrosión del acero al carbono N80 en ácido clorhídrico a través de estudios SEM se puede determinar y analizar la variación de la morfología del acero. Para ello, el estudio indica que, dependiendo del tipo de inhibición, del mecanismo de adsorción y el tiempo de inmersión, la morfología puede cambiar y mejorar dependiendo de la aplicación que se requiere, por eso, las imágenes número tres, cuatro y cinco, muestran cómo la superficie de un acero al carbono cambia dependiendo de la utilización.

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

La figura 3 muestra una superficie lisa y limpia, ya que la eficiencia de inhibición es alta después de un tiempo de cuatro horas de inmersión; no obstante, la figura 4 muestra el proceso corrosivo de la superficie del acero formando grietas, incluso con el intervalo de la solución, esto se debe a que no hay inhibidor de material, mientras que, en la figura 5 disminuye la corrosión debido a la presencia de la goma exudada en un tiempo de exposición mayor a las cuatro horas, mejorando de esa manera la morfología de la pieza (Iroha & Akaranta, 2020).

Figura 3.

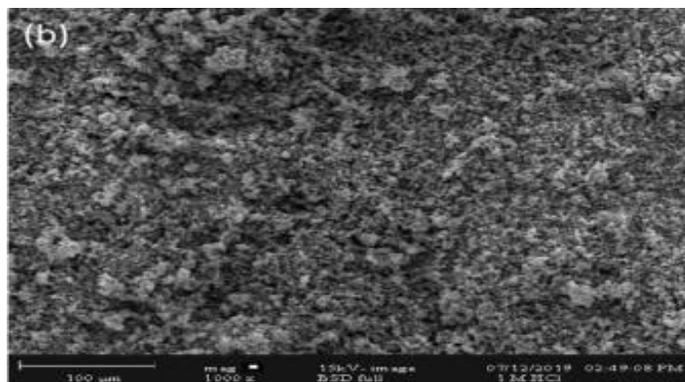
Micrografía del acero al carbono N80 con proceso de inhibición.



Nota: Adaptado de (Iroha & Akaranta, 2020).

Figura 4.

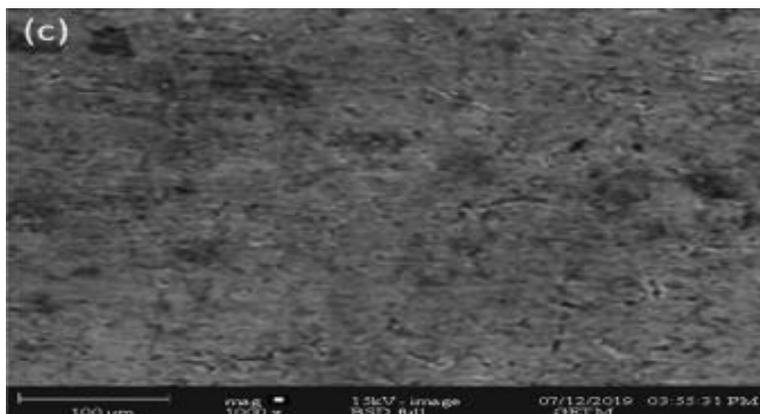
Micrografía del acero al carbono N80 sin proceso de inhibición.



Nota: Adaptado de (Iroha & Akaranta, 2020).

Figura 5.

Micrografía del acero al carbono N80 con la presencia de la goma exudada.



Nota: Adaptado de (Iroha & Akaranta, 2020).

Según cada uno de los estudios mostrados con respecto al objetivo, se puede comprobar que el tiempo de inmersión es una variable importante que se relaciona directamente con la eficiencia de inhibición y la morfología de los materiales. El análisis final tiene como propiedad principal que las gomas y las ligninas muestran un ritmo ascendente de eficiencia de inhibición cuando se aumenta el tiempo de inmersión, pero con la condición de que se puede llegar a un límite, ya que los polímeros naturales pueden sufrir una gran biodegradación en intervalos de exposición demasiados largos, lo que afectarían las propiedades de inhibición, por ello se vuelve fundamental controlar los tiempos en los que serán utilizados; otro factor fundamental es que la morfología de los aceros al carbono pueden variar de acuerdo al periodo de inmersión, ya que esto puede mostrar la eficacia en las que se está realizando la protección por medio de los inhibidores, donde a través de técnicas como la Microscopía Electrónica de Barrido más conocida como SEM, ayuda a entender el comportamiento de la superficie donde generalmente se encuentra libre de corrosión al momento de realizado la inhibición después de un tiempo de inmersión adecuado según la goma o la lignina utilizada.

5 Polímeros Naturales

Tabla 3.

Especificaciones de los distintos tipos de polímeros naturales, con sus respectivos datos.

Polímero	Solución	Acero	Mediciones	Tipo de inhibidor	Resultado	Referencia
Goma xantana	1.1M HCL 2. HCl al 15%	1. Acero 2. Acero dulce	1.Mediciones electroquímicas, de pérdida de peso, PDP, EIS, DFT, SEM	1.Mixto, predomina fisisorción.	1. 74,24% 2. 86% a 500 ppm 2.1 74.24% a 1000 ppm	1.(Wei et al., 2020) 2. (Mobin et al., 2020)
Goma de Almendra	1M HCl	Acero dulce (MS)	Estudios gravimétricos, RMN, FTIR, EIS, PDP, SEM / EDAX, UV - simulaciones visibles, DFT	Mixto, predomina fisisorción	96,3% a 500 ppm a 60°C	(Mobin et al., 2020)
Goma serrada de Boswellia	1 M HCl	Acero con bajo contenido de carbono	Mediciones gravimétricas, SEM, EDX, AFM, FTIR, UV-Vis, DFT	Mixto, predomina fisisorción.	91,9% a 500 ppm.	(Wei et al., 2020)
Goma de acacia (GA)	1. 15% HCl 2. 1g/L	1y2.Acero dulce	1,Análisis electroquímico, SEM, PDP, SEM, EDX, AFM EIS, 2. Métodos electroquímicos, AFM, FTIR, XPS	1.Fisisorción 2. Mixto	1. 94,08% 2, 96% cuando la concentración es de 1g/L con respecto al ácido	1,(Wei et al., 2020) 2.(Azzaoui et al., 2017)
Biomasa de Pennisetum Purpureum	3,5% HCl	Acero dulce	-----	Fisisorción	94,08%	(Wei et al., 2020)
Goma de Fenogreco	1M HCl	Acero dulce	EIS, XPS, DFT, MD SEM	-----	87%	(Wei et al., 2020)
Goma arábica	1M HCl	Acero dulce	WLM, EIS, PDP, AFM, XPS	1. Mixto	97%	(Azzaoui et al., 2017). 2. (Peter et al., 2015)
Goma guar	1.2M H3PO4 3. 1 M H2SO4	1.3.Acero al carbono	1.WLM, EIS, SEM, FTIR, XRD, DFT, MD 2.Perdida de peso y técnicas de polarización de Tafel	2.Mixto	1.95,8% 2. 93,8% a 1500 ppm	1.(Wei et al., 2020) 2. (Abdallah, 2004)
Azadirachta Indica	1M HCl	1. Acero dulce	WLM, PDP, EIS, FTIR FTIR, EIS, DFT	-----	1.93,2% 2. a la derecha, tabla	1. (Wei et al., 2020) 2.(Oguzie, 2008)
Goma arábica plata	15% HCl/H2SO4	-----	UV-Vis, EIS, EFM, SEM, AFM, XPS	-----	92,65%	(Wei et al., 2020)
Goma de algarrobo	0,5M H2SO4	Acero Q235	OCP, PDP, EIS, AFM y SEM	Mixto	89,80%	(Guo et al., 2020)

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

Goma Moringa Oleifera	1M HCl	Acero dulce	Perdida de peso	Fisisorción	80,08% 10ppm 1 hora - 95,46% durante 6 horas a 10g/L	(Jalajaa et al., 2019)
Exuado Terminalia Mentaly (GETM)	1M HCl	Acero al carbono N80	Mediciones electroquímicas y gravimétricas, (EIS), (SEM), estudios de polarización gravimétrica y potenciodinámica	Mixto	eficiencias de inhibición máximas de 92,4%, 95,5% y 92,5% a 2g/L el inhibidor	(Iroha & Akaranta, 2020)
Dextrina	1M HCl	Acero dulce	EIS, estudios de polarización, SEM, EDS y AFM	Fisisorción	89,98%	(Devi et al., 2020)
Quitosano (1. Vanillin-modificado)	1.HCl 2.1M HCl	1.Acero 2. Acero dulce Q235	1.Perdida de peso, EIS 2.EIS, OCP	2. mixto	1.98,3% 2.98%	1.(Shahini et al., 2021) 2.(Zhang et al., 2020)
Combinación de celulosa y lignina extraída de la cáscara del pistacho	-----	-----	-----	Mixto	92%	(Shahini et al., 2021)
Modification de Organosolv con AHN y AHD	0,5M HCl	Acero dulce	FTIR,P NMR y GPC, EIS, SEM,XRD,PZC	Fisisorción	89.14% for AHN and 93.42% for AHD, unmodified rganosolv Lignin (81.07%)	(Hussin, Rahim, et al., 2015)
Alanina	0,1M HCl	Acero	Medidas de pérdida de peso y extrapolación de Tafel catódico y anódico	Fisisorción	80%	(Ashassi-Sorkhabi et al., 2004)
Glicina	0,1M HCl	Acero	Medidas de pérdida de peso y extrapolación de Tafel catódico y anódico	Fisisorción	79,90%	(Ashassi-Sorkhabi et al., 2004)
Lignina-Ácido acíclico	1M HCl	Acero al carbono	AFM,SEM	-----	82,16%	(Gao et al., 2021)
Lignina de Soda	0,5 M HCl	Acero dulce	EIS	Fisisorción	a 500PPM. IEP.Soda: 87.76%	(Hussin et al., 2016)
Lignina de Organosolv	0,5 M HCl	Acero dulce	EIS	Fisisorción	a 500PPM (IEP.Organosolv: 83.94%)	(Hussin et al., 2016)
Lignina de Kraft	0,5 M HCl	Acero dulce	EIS	Fisisorción	a 500PPM (IEP.Kraft: 81.11%)	(Hussin et al., 2016)

5.1 Gomas

Las gomas vegetales son ecológicas, económicas, fácilmente disponibles, no peligrosas y renovables (Arthur et al., 2013)(Peter et al., 2015)(Mobin et al., 2020), teniendo usos muy variados como materiales farmacéuticos, en industrias alimentarias y muchas más, siendo de especial interés a la hora de buscar buenos inhibidores de la corrosión, y lo son gracias a que sus largas estructuras poliméricas, con sus grupos funcionales (OH, COOH, NH₂, etc.) que forman complejos con los iones metálicos, cubriendo la superficie, y a su vez previniendo la corrosión del metal. Esto debido a que su composición tiene altas cantidades de oligosacáridos, polisacáridos, glucoproteína, arabinogalactano y sacarosa, y que contienen átomos de nitrógeno y oxígeno funcionando como centros de adsorción (Peter et al., 2015)(Mobin et al., 2020)(Wei et al., 2020).

La eficiencia de las gomas probadas depende principalmente de la temperatura y concentración, ya que son los factores que afectan el proceso de adsorción del inhibidor sobre la superficie; algunas gomas estudiadas fueron las siguientes:

5.1.1 Goma Xantana

Se estudió el efecto de inhibición sobre acero en un medio ácido de 1M HCL usando medidas electroquímicas, de pérdida de peso, PDP, EIS, DFT y SEM, teniendo mayor afinidad con la isoterma de Langmuir, revelando un tipo de inhibición mixto, donde predomina el mecanismo de fisisorción; se formaron iones inhibidores a 30 °C con una eficiencia de 74,24%, disminuyendo en cuanto aumentaba la temperatura y aumentando ligeramente al añadir tensioactivos como DS (Dodecilsulfato sódico), TX (Triton X-100) y CPC (cetyl pyridinium chloride) en cantidades de 5 ppm (Wei et al., 2020).

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

Además, se estudió en un medio ácido de HCl al 15% sobre acero dulce, observando una eficiencia de hasta 86% con una concentración de 500ppm a 24,85°C (Mobin et al., 2020).

5.1.2 *Moringa Oleifera*

Se estudió su eficiencia sobre un acero dulce bajo una concentración ácida de 1M HCl con medidas de pérdida de peso; dichas medidas coinciden con la isoterma de langmuir y revelan un tipo de adsorción físico, además, su eficiencia varía de 80,08% a 10ppm durante una hora a 95,46% durante 6 horas a 10g/L de la goma, siendo este el valor máximo, ya que aumentarlo solo disminuirá la eficiencia por la biodegradación en reposo de la goma (Jalajaa et al., 2019).

5.1.3 *Goma Serrada De Boswellia*

Se estudió sobre un acero con bajo contenido de carbono en un medio con 1M de HCl con mediciones gravimétricas, SEM, EDX, AFM, FTIR, UV-Vis y DFT, observándose un tipo de inhibición mixto donde predomina la fisisorción; tuvo una eficiencia del 91,9% a 30°C con una concentración de 500ppm, teniendo estabilidad durante un periodo prolongado en el medio ácido (Wei et al., 2020).

5.1.4 *Exuado TerminaliaMentaly (GETM)*

Se estudió el efecto de esta goma sobre la inhibición de la corrosión de un acero al carbono N80 en un medio ácido de 1M HCl mediante mediciones electroquímicas, gravimétricas, EIS y SEM; dichas mediciones muestran una afinidad con la isoterma de langmuir y temkin, presentando una inhibición catódica y anódica, predominando esta última. Sus eficiencias máximas son de 92,4%, 95,5% y 92,5% a 2g/L del inhibidor (Iroha & Akaranta, 2020).

5.1.5 *Goma De Acacia (GA)*

Se estudió su poder inhibitorio sobre un acero dulce en un medio ácido con 15% de HCl con análisis electroquímico, SEM, PDP, EDX, AFM y EIS, mostrando mayor afinidad con la isoterma de Langmuir, la cual apunta a un tipo de adsorción físico; tiene una eficiencia de poco más de 94% (Wei et al., 2020).

Además, se realizó otro estudio sobre acero dulce en un medio ácido de HCl con concentración de 1g/L con métodos electroquímicos, AFM, FTIR y XPS, que mostraban igualmente que su isoterma más certera era la de Langmuir, apuntando está a un tipo de inhibición mixta; este estudio revela una eficacia de hasta el 96% cuando la concentración es 1g/L (Azzaoui et al., 2017).

5.1.6 *Biomasa De Pennisetum Purpureum*

Se estudió sobre un acero dulce en un medio ácido con concentración de 3,5% en HCl con WLM, EIS y PDP, sus estudios determinaron que la isoterma de Langmuir lo representaba de mejor manera y a su vez que su tipo de adsorción es la física; su eficiencia es de 94,9% (Wei et al., 2020).(Wei et al., 2020).

5.1.7 *Goma De Fenogreco*

Se estudió esta goma sobre un acero dulce en un medio ácido de 1M HCl con EIS, XPS, DFT, MD y SEM, mostrando una mejor descripción con la isoterma de Langmuir y un tipo de adsorción física; obteniéndose eficiencias de hasta el 87% (Lgaz et al., 2019).

5.1.8 Goma Arábica

Se estudió su potencial de inhibición sobre un acero dulce a un medio ácido de 0,5g/L H₂SO₄ con medidas de pérdidas de peso y termométricas, la isoterma de temkin la describió mejor, y su tipo de adsorción fue la química; se obtuvieron porcentajes de inhibición de hasta 37,88% a 60°C (Umoren, 2008).

Otro estudio más reciente sobre un acero dulce a 1g/L de HCl con ELM, EIS, PDP, AFM y XPS dio como mejor isoterma la de Langmuir y un tipo de adsorción mixto; su porcentaje de eficiencia es del 97% (Azzaoui et al., 2017).

5.1.9 Goma Guar

Se reportó un estudio de esta goma sobre un acero al carbono en medio ácido de 2M H₃PO₄ con WLM, EIS, SEM, FTIR, XRD, DFT y MD teniendo como isoterma descriptora la de Langmuir; su eficiencia es de 95,8% (Wei et al., 2020).

Otro estudio sobre un acero al carbono en un medio ácido de 1M H₂SO₄ con pruebas de pérdida de peso y técnicas de polarización de Tafel reportaron la isoterma de Langmuir como mejor descriptora del proceso de adsorción, que fue de tipo mixto; se obtuvo una eficiencia del 93,88% a una concentración de 1500ppm (Abdallah, 2004).

5.1.10 Azadirachta Indica

Se estudió sobre un acero dulce a 1M HCl por WLM, PDP, EIS, FTIR FTIR, EIS y DFT dando una eficiencia de hasta el 93,2% (Wei et al., 2020).

Otro estudio reportó una eficiencia de hasta el 96,2% a 60°C en un medio HCl 2M (Oguzie, 2008).

5.1.11 *Goma Arábica Plata*

Se reportó un estudio en un medio 15% HCl con UV-Vis, EIS, EFM, SEM, AFM y XPS arrojando una eficiencia del 92,65% (Wei et al., 2020).

5.1.12 *Locust Bean Gum O Algarrobo*

Se reportó un estudio sobre un acero Q235 en medio ácido 0,5M de H₂SO₄ dando como isoterma asociada a la de Langmuir con un tipo de adsorción mixta; su eficiencia es del 89,8%, aumentando cuando aumenta la temperatura (Guo et al., 2020).

5.2 Lignina

Es un biopolímero aromático amorfo que proviene en mayor parte de la parte seca de las plantas, teniendo de un 15 a 40% en peso, variando según la especie (Shahini et al., 2021), esto debido a que funciona como un aglutinante que mantiene las fibras unidas, asegurando la rigidez en las plantas (Hussin, Shah, et al., 2015). Su principal medio de obtención es mediante la producción del papel y demás procesos, dejando este material como un subproducto o desecho en grandes cantidades. Muy a pesar de esto, se han encontrado ciertos usos para este material tales como baterías, cerámica, farmacéutica, entre otros. Además, para nuestro interés particular, se ha informado una eficiencia suficientemente alta como inhibidor de la corrosión, previniendo el riesgo de picaduras en los materiales probados (Shahini et al., 2021). Estas pruebas se realizaron debido al alto y diverso contenido de grupos funcionales y estructura fenilpropanoide, haciendo actuar a la lignina como un neutralizador de procesos de oxidación gracias a las reacciones por radicales de oxígeno y sus especies respectivas (Hussin et al., 2016). Estas macromoléculas están entre los recursos renovables más abundantes en la naturaleza y sus aplicaciones no se han

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

aprovechado al máximo debido a la complejidad y heterogeneidad en sus estructuras y sus distribuciones de alto peso molecular (Gao et al., 2021).

Es, además, el segundo biopolímero más abundante después de la celulosa (Shahini et al., 2021).

5.2.1 *Quitosano*

Un estudio de esta lignina obtuvo un resultado de eficiencia del 87% (Shahini et al., 2021), otro estudio arrojó eficiencias de hasta el 90% actuando como copolímero (Gao et al., 2021).

5.2.2 *Combinación De Celulosa Y Lignina Extraída De La Cáscara Del Pistacho*

Un estudio realizado sobre este material como inhibidor dio como resultado que se comporta de acuerdo con la isoterma de Langmuir, teniendo un tipo de inhibición mixto y teniendo eficiencias de inhibición del 92% (Shahini et al., 2021).

5.2.3 *Alanina*

Se informó en un estudio de esta sobre un acero en un medio ácido de 0,1M HCl por medio de medidas de pérdida de peso y extrapolación de Tafel tanto catódica como anódica, mostrando afinidad con la isoterma de Langmuir y revelando un tipo de adsorción física; obtuvo un porcentaje de eficiencia de inhibición del 80% (Gao et al., 2021).

5.2.4 *Glicina*

Se recopilaron resultados de un estudio de la glicina sobre un acero en un medio ácido de 0,1M de HCl mediante medidas de pérdida de peso y extrapolación de Tafel anódica y catódica,

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

mostrando mayor compatibilidad con la isoterma de Langmuir, teniendo un tipo de adsorción física; obtuvo un 79,9% de eficiencia de inhibición (Gao et al., 2021).

5.2.5 *Ácido Acíclico*

Se estudió este material como copolímero sobre un acero al carbono en un medio de 1M HCl mediante AFM y SEM, dando eficiencias de hasta el 82,16% (Gao et al., 2021).

5.2.6 *Lignina De Soda*

Un estudio realizado sobre esta lignina en un acero dulce en un medio 0,5M HCl con mediciones EIS mostró su compatibilidad con la isoterma de Langmuir, mostrando un tipo de adsorción física y llegando a un 87,76% de eficiencia cuando su concentración era de 500 ppm. (Hussin et al., 2016).

5.2.7 *Lignina De Organosolv*

Se realizó un estudio de este material sobre un medio ácido de 0,5M HCl sobre un acero dulce por medio de FTIR, GPC, EIS, SEM, XRD y PZC, dando como isoterma asociada la de Langmuir, mostrando un tipo de adsorción física; obtuvo eficiencias del 81,07%, además, al modificarlo con AHN se llegó hasta un 89,14% y con AHD hasta 93,42% (Hussin, Rahim, et al., 2015).

En un estudio posterior, se reportaron resultados de eficiencia del 83,94% cuando su concentración era de 500 ppm sobre un acero dulce en un medio ácido de 0,5 M HCl. Se asemejó con la isoterma de Langmuir, mostrando una adsorción física y se hicieron mediciones EIS (Hussin et al., 2016).

5.2.8 *Lignina De Kraft*

Un estudio realizado sobre esta lignina en un acero dulce a 0,5M HCl por medio de EIS, determinó que la isoterma asociada a esta era la de langmuir, mostrando además un tipo de adsorción física y una eficiencia de hasta 81,11% con una concentración de 500 ppm (Hussin et al., 2016).

6 Conclusiones.

El presente trabajo de estudio conceptual contribuye a la comprensión de las variables (temperatura, concentración, estructura del polímero e incidencia del tiempo de inmersión) y su influencia para aplicar acertadamente un inhibidor verde por medio de gomas y ligninas en aceros al carbono que están expuestos a medios ácidos, y de esa manera obtener resultados de eficiencia de inhibición.

Uno de los factores a tener en cuenta respecto a la eficiencia de inhibición es que en la mayor parte de los procesos, la temperatura es inversamente proporcional al porcentaje necesario para lograr controlar la corrosión, y a su vez, el análisis del tipo de adsorción puede beneficiar o dificultar dicho proceso, contando con ciertas excepciones como lo serían algunos inhibidores que se ajustan a un tipo de adsorción mixto o químico, los cuales presentan una mejora en el porcentaje de inhibición hasta cierto aumento de temperatura, luego de superar el umbral de la energía de activación actuarán igual que los demás inhibidores, disminuyendo su eficacia cuanto mayor es la temperatura.

La concentración del polímero es directamente proporcional a la eficiencia de inhibición, por lo cual, los mejores resultados se presentan al aumentar la concentración, de igual manera, mejora aún más con el tipo de estructura molecular del polímero a través del tipo de adsorción, como es el caso de la Floxacina mostrada en la discusión de resultados, donde se comprueba que los tipos de estructura que no tengan muchas ramificaciones tiende a ser más efectiva.

El tiempo de inmersión es directamente proporcional a la eficiencia de inhibición de un polímero natural y la morfología del acero, teniendo como condición de que según lo establecido en la discusión de resultados, se recomienda que el intervalo de exposición no sea mayor de 6

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

horas, ya que las gomas o las ligninas pueden sufrir biodegradación que afecten las propiedades de inhibición, mientras que la morfología de los aceros al carbono, a través de técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) , demuestra que a medida de un aumento significativo del intervalo de exposición del polímero, ayuda a que la morfología de dicho acero se encuentre superficialmente limpia y libre de corrosión. Corroborando, además que, al exceder el tiempo de exposición estipulado, la morfología sufrirá graves consecuencias.

Referencias Bibliográficas.

- Abdallah, M. (2004). Guar Gum as Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Sulfuric Acid Solutions. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 22, 161–175.
- Ameh, P. O., & Eddy, N. O. (2014). Commiphora pedunculata gum as a green inhibitor for the corrosion of aluminium alloy in 0.1 M HCl. *Research on Chemical Intermediates*, 40(8), 2641–2649. <https://doi.org/10.1007/s11164-013-1117-0>
- Arthur, D. E., Jonathan, A., Ameh, P. O., & Anya, C. (2013). A review on the assessment of polymeric materials used as corrosion inhibitor of metals and alloys. *International Journal of Industrial Chemistry*, 4(1), 2. <https://doi.org/10.1186/2228-5547-4-2>
- Ayawei, N., Ebelegi, A. N., & Wankasi, D. (2017). Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms. *Journal of Chemistry*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>
- Azzaoui, K., Mejdoubi, E., Jodeh, S., Lamhamdi, A., Rodriguez-Castellón, E., Algarra, M., Zarrouk, A., Errich, A., Salghi, R., & Lgaz, H. (2017). Eco friendly green inhibitor Gum Arabic (GA) for the corrosion control of mild steel in hydrochloric acid medium. *Corrosion Science*, 129(October), 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.09.027>
- Gooch, J. W. (2011). Natural Polymers. In *Encyclopedic Dictionary of Polymers*. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6247-8_7797
- Bilurbina Alter, L., & Liesa Mestres, F. (2003). *Corrosión y protección - Lluís Bilurbina Alter, Francisco Liesa Mestres - Google Libros*. <https://books.google.com.co/books?id=jMzAenR2UHkC&pg=PA137&dq=inhibidores+organicos&hl=es->

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

419&sa=X&ved=2ahUKEwiLqYjRsbyAhVxmmoFHW3XDcsQ6AEwAnoECAyQAg#v=onepage&q=inhibidores organicos&f=false

Chauhan, D. S., Ansari, K. R., Sorour, A. A., Quraishi, M. A., Lgaz, H., & Salghi, R. (2018).

Thiosemicarbazide and thiocarbohydrazide functionalized chitosan as ecofriendly corrosion inhibitors for carbon steel in hydrochloric acid solution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 1747–1757. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.050>

Cicek, V., & Al-Numan, B. (2017). *Corrosion Engineering and Cathodic Protection Handbook : With Extensive Question and Answer Section*. John Wiley & Sons, Incorporated.

<https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliouis-ebooks/reader.action?docID=4816198>

Devi, G. N., Unnisa, C. B. N., Roopan, S. M., Hemapriya, V., Chitra, S., Chung, I. M., Kim, S.

H., & Prabakaran, M. (2020). Floxacins: as Mediators in Enhancing the Corrosion Inhibition Efficiency of Natural Polymer Dextrin. *Macromolecular Research*, 28(6), 558–566. <https://doi.org/10.1007/s13233-020-8071-7>

Gao, C., Zhao, X., Fatehi, P., Dong, X., Liu, K., Chen, S., Wang, S., & Kong, F. (2021). Lignin

copolymers as corrosion inhibitor for carbon steel. *Industrial Crops and Products*, 168(November 2020), 113585. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113585>

Gómez de León Hijes, F. C., & Alcaraz Lorente, D. J. (2004). *Manual básico de corrosión para ingenieros - Félix Cesáreo Gómez de León Hijes, Diego J. Alcaraz Lorente - Google Books*.

https://books.google.com.co/books?id=B6tV_j4ofmQC&pg=PA95&dq=tipos+de+inhibidores+de+corrosión&hl=es419&sa=X&ved=2ahUKEwi6w5SMqerxAhUOFVkfHT_WC5oQ6AEwA3oECAQQAg#v=onepage&q=tipos de inhibidores de corrosión&f=false

Guo, L., Zhang, R., Tan, B., Li, W., Liu, H., & Wu, S. (2020). Locust Bean Gum as a green and

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

novel corrosion inhibitor for Q235 steel in 0.5 M H₂SO₄ medium. *Journal of Molecular Liquids*, 310, 113239. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113239>

Huang, H.-J., Ramarao, B. V., & Ramaswamy, S. (2013). *Separation and Purification Technologies in Biorefineries*. John Wiley & Sons, Incorporated.

<https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliouis-ebooks/reader.action?docID=1117317>

Hussin, M. H., Rahim, A. A., Mohamad Ibrahim, M. N., & Brosse, N. (2015). Improved corrosion inhibition of mild steel by chemically modified lignin polymers from *Elaeis guineensis* agricultural waste. *Materials Chemistry and Physics*, 163, 201–212.

<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.07.030>

Hussin, M. H., Rahim, A. A., Mohamad Ibrahim, M. N., & Brosse, N. (2016). The capability of ultrafiltrated alkaline and organosolv oil palm (*Elaeis guineensis*) fronds lignin as green corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M HCl solution. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 78, 90–103.

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.10.007>

Hussin, M. H., Shah, A. M., Rahim, A. A., Ibrahim, M. N. M., Perrin, D., & Brosse, N. (2015). Antioxidant and anticorrosive properties of oil palm frond lignins extracted with different techniques. *Annals of Forest Science*, 72(1), 17–26. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0405-1>

Iroha, N. B., & Akaranta, O. (2020). Experimental and surface morphological study of corrosion inhibition of N80 carbon steel in HCl stimulated acidizing solution using gum exudate from *Terminalia Mentaly*. *SN Applied Sciences*, 2(9), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03296-8>

CORROSIÓN EN ACEROS AL CARBONO EN MEDIOS ÁCIDOS

- Jalajaa, D., Jyothi, S., Muruganatham, V. R., & Mallika, J. (2019). Moringa oleifera gum exudate as corrosion inhibitor on mild steel in acidic medium. *Rasayan Journal of Chemistry*, 12(2), 545–548. <https://doi.org/10.31788/RJC.2019.1224096>
- Jmiai, A., El Ibrahimy, B., Tara, A., Oukhrib, R., El Issami, S., Jbara, O., Bazzi, L., & Hilali, M. (2017). Chitosan as an eco-friendly inhibitor for copper corrosion in acidic medium: protocol and characterization. *Cellulose*, 24(9), 3843–3867. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1381-z>
- Lgaz, H., Chung, I. M., Salghi, R., Ali, I. H., Chaouiki, A., El Aoufir, Y., & Khan, M. I. (2019). On the understanding of the adsorption of Fenugreek gum on mild steel in an acidic medium: Insights from experimental and computational studies. *Applied Surface Science*, 463, 647–658. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.09.001>
- Material Technology Institute. (2012). *Temperatura y velocidad de corrosión Correlación más compleja de lo que uno piensa | No . 13. 13.*
- Mobin, M., Ahmad, I., Basik, M., Murmu, M., & Banerjee, P. (2020). Experimental and theoretical assessment of almond gum as an economically and environmentally viable corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 18(October), 100337. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100337>
- Nuñez, J. E., Colpas, F., & Taron, A. (2017). *Exploitation of waste woody for obtaining ion exchange resins Aprovechamiento de residuos maderosos para la obtencion de resinas de intercambio iónico Exploitation of waste woody for obtaining ion exchange resins. January.*
- Oguzie, E. E. (2008). Evaluation of the inhibitive effect of some plant extracts on the acid corrosion of mild steel. *Corrosion Science*, 50(11), 2993–2998.

<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.08.004>

Patricia, L., Benítez, T., Javier, P., Castellar, M., David, E., & Percy, A. (2014). *Uso de extractos de plantas como inhibidores de corrosión*. 155–165.

Peter, A., Obot, I. B., & Sharma, S. K. (2015). Use of natural gums as green corrosion inhibitors: an overview. In *International Journal of Industrial Chemistry* (Vol. 6, Issue 3, pp. 153–164). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s40090-015-0040-1>

Ray, S. S., Gusain, R., & Kumar, N. (2020). Adsorption equilibrium isotherms, kinetics and thermodynamics. *Carbon Nanomaterial-Based Adsorbents for Water Purification*, 101–118. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821959-1.00005-2>

Shahini, M. H., Ramezanzadeh, B., & Mohammadloo, H. E. (2021). Recent advances in biopolymers/carbohydrate polymers as effective corrosion inhibitive macro-molecules: A review study from experimental and theoretical views. *Journal of Molecular Liquids*, 325, 115110. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115110>

Umoren, S. A. (2008). Inhibition of aluminium and mild steel corrosion in acidic medium using Gum Arabic. *Cellulose*, 15(5), 751–761. <https://doi.org/10.1007/s10570-008-9226-4>

Upadhyay, S. K. (2006). *Chemical Kinetics and Reaction Dynamics* (Vol. 148).

Wei, H., Heidarshenas, B., Zhou, L., Hussain, G., Li, Q., & Ostrikov, K. (Ken). (2020). Green inhibitors for steel corrosion in acidic environment: state of art. In *Materials Today Sustainability* (Vol. 10). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2020.100044>