



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
COLEGIO DE MATERIALES**

**USO DEL ACEITE DE SEMILLA DE CHÍA COMO
INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN VERDE**

**“TESIS PRESENTADA PARA
OBTENER EL TÍTULO DE: LICENCIATURA EN INGENIERIA
EN MATERIALES”**

**PRESENTA:
GUADALUPE MORALES CHAMORRO**

**ASESOR:
DR. OCTAVIO OLIVARES, XOMETL**

**COASESOR:
DR. ALEJANDRO ALONSO CALDERON**

PUEBLA, PUEBLA

NOVIEMBRE/2016

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, David y Rosa ya que me han brindado todo su apoyo, comprensión y amor y me han demostrado que puedo contar con ellos en todo momento sobre todo en los momentos más difíciles. A mis hermanas, por brindarme su apoyo y comprensión en todo momento.

A mis hijos Misael, Osvaldo y Carlos que han sido mi mayor motivación y han estado en los momentos más difíciles brindándome su amor, ternura y comprensión.

A mi asesor de Tesis, Dr. Octavio Olivares por compartir conmigo sus conocimientos y su experiencia. Por ser un excelente guía y un buen amigo, y sobre todo por tener la paciencia necesaria.

A mi coasesor de Tesis, DR. Alejandro Alonso Calderón por su apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. José Antonio Rivera Márquez por las asesorías brindadas y por resolver mis dudas por pequeñas que fuera.

A los miembros del comité de revisión de tesis, Dra. Natalya Likhanova, DR. Mirna López Fuentes, por el tiempo dedicado y por las sugerencias aportadas para enriquecer el trabajo realizado.

A la VIEP (Vicerrectoría de Estudios de Posgrado) por el apoyo económico otorgado y hacer posible esta etapa de mi desarrollo profesional.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
RESUMEN	vi
INTRODUCCIÓN	vii
OBJETIVOS	ixX
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	1
1.1 Corrosión	1
1.2 Física y Química de la corrosión.....	3
1.3 Fundamentos de electroquímica de corrosión	4
1.4 Aplicación de inhibidores de la corrosión.	5
1.5 Inhibidores de corrosión verdes.	6
1.6 Aceite de semilla de chía como inhibidor de corrosión.....	10
1.7 Estructura anatómica y composición química de la semilla.....	11
1.7.1 Sustancias extraíbles	11
1.7.2 Acidos grasos esenciales (AGE).....	11
1.7.3 Acido α -linolénico (omega-3).....	11
1.7.4 Vitamina E (gamma tocoferol)	12
1.7.5 Fitoesteroles.....	13
CAPITULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	14
2.1 Extracción del aceite de semilla de chía	14
2.4 Medio corrosivo	17
2.5 Preparación de los testigos de acero sae 1018.....	17
2.6 Evaluación de los inhibidores de la corrosión.....	18
2.7 Métodos Electroquímicos	18
2.8 Caracterización por técnicas de análisis superficial SEM	18
CAPÍTULO 3. DISCUSION DE RESULTADOS.....	19
3.1 Polarización de Tafel	19
3.1 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).....	24

3.2 Pérdida de peso	32
3.3 Isotermas de adsorción	34
3.4 Microscopía electrónica de Barrido	40
CONCLUSIONES	42
REFERENCIAS	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación del tipo de corrosión.....	1
Figura 2. Corrosión uniforme.....	2
Figura 3. Corrosión localizada.....	2
Figura 4. Corrosión por picadura.....	3
Figura 5. Proceso de ionización de un metal M.....	4
Figura 6. Celda electroquímica natural del proceso de corrosión.....	5
Figura 7. Cultivo de Chía.....	11
Figura 8. Estructura química Omega-3.....	12
Figura 9. Estructura de la vitamina E.....	12
Figura 10. Estructuras de los principales Esteroles.....	13
Figura 11. Diagrama de flujo del proceso.....	15
Figura 12. Extracción de aceite de Chía.....	16
Figura 13. Espectro FTIR del aceite de chía.....	17
Figura 14. Probetas de acero SAE (electrodos de trabajo)	18
Figura 15. Gráficas de Tafel para la polarización del acero SAE 1018 con y sin inhibidor..	20
Figura 16. Eficiencia de inhibición del aceite de chía sobre el acero SAE 1018 a diferentes concentraciones.....	23
Figura 17. Representación esquemática de las diferentes rutas de la disolución del hierro.	24
Figura 18. Modelo propuesto de la interfase metal-CPC-solución para las pruebas EIS sin inhibidor en H ₂ SO ₄ 1.0 M.....	25
Figura 19. Modelo del proceso de inhibición en la interfase metal-película-solución en H ₂ SO ₄ 1.0 M.....	26
Figura 20. Representación esquemática del circuito equivalente sobre la superficie del acero.....	26
Figura 21. Gráfico de Nyquist del acero SAE 1018 en H ₂ SO ₄ 1 M en presencia y ausencia de IC.....	28
Figura 22. Estructuras de los principales compuestos presentes en el extracto de chía.....	30

Figura 23. Eficiencia de inhibición de los testigos cúbicos de acero SAE 1018 con aceite de chía en un tiempo de 2 y 8 horas de inmersión.....	33
Figura 24. Ajuste del comportamiento de adsorción del aceite de chía en el metal a través de la isoterma de Langmuir.....	35
Figura 25. Ajuste del comportamiento de adsorción del aceite de chía en el metal a través de la isoterma de Temkin.....	36
Figura 26. Ajuste del comportamiento de adsorción del aceite de chía en el metal a través de la isoterma de Frumkin.....	37
Figura 27. Ajuste del comportamiento de adsorción del aceite de chía en el metal a través de la isoterma de Flory-Huggins.....	38
Figura 28. Concentración de inhibidor en una superficie metálica.....	39
Figura 29. Análisis de MEB de la superficie del acero SAE 1018 después de 2h de inmersión en H ₂ SO ₄ 1.0 M.....	41
Figura 30. Análisis de MEB de la superficie del acero SAE 1018 después de 2h de inmersión en H ₂ SO ₄ 1M a 10 ppm de aceite de chía.....	41
Figura 31. Análisis de MEB de la superficie del acero SAE 1018 después de 2h de inmersión en H ₂ SO ₄ 1.0M a 100ppm.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros electroquímicos (β_c , β_a , E_{corr} , i_{corr}) asociados con las medidas de polarización del electrodo de acero SAE 1018 en ausencia y presencia de inhibidor.....	21
Tabla 2. Resultados electroquímicos obtenidos por EIS.....	29
Tabla 3. Compuestos identificados por CG-MS presentes en el aceite de chía.....	30
Tabla 4. Eficiencia de inhibición de Aceite de Chía como IC en los testigos cúbicos de acero SAE 1018.....	34
Tabla 5. Valores de la energía libre de adsorción estándar para la adsorción del aceite de chía evaluado sobre el acero SAE 1018.....	40

RESUMEN

En la industria las aleaciones de acero están expuestas a factores que influyen en su integridad y propiedades mecánicas de diseño, propiciando condiciones inseguras de operación. Los análisis cualitativos y cuantitativos de las zonas que presentaron las fallas, frecuentemente confirman que la causa principal es daños por corrosión. La problemática en la industria se debe a que el daño es irreversible a la zona afectada. La presencia de medios acuosos corrosivos, sales, partículas sólidas, metales, etc., son los principales promotores del daño por corrosión en las aleaciones de acero. Estas variables en conjunto dificultan la protección de las aleaciones, así como la determinación del mecanismo de su deterioro y proceso de protección. Los factores que influyen en la magnitud del daño por corrosión pueden ser: la geometría del material, existencia de partículas sólidas en el fluido, ángulo de impacto del fluido, gasto volumétrico, propiedades químicas de los fluidos, temperatura, entre otros. De todos estos, el medio acuoso es considerado un parámetro importante porque cataliza el mecanismo de la corrosión del acero.

Existen a la fecha técnicas de protección en la industria para el acero bien definidas, pero la búsqueda de nuevas alternativas es constante. Dentro de estas, el estudio de extractos de plantas “inhibidores verdes” está siendo ampliamente estudiado, por su bajo impacto al medio ambiente y buena eficiencia de protección de aleaciones en medios corrosivos.

En el presente trabajo se determinó la eficiencia de inhibición del aceite de semilla de chía como IC (inhibidor de corrosión) del acero al carbono SAE 1018 en solución de H_2SO_4 1M. Sus propiedades de inhibición se determinaron por técnicas electroquímicas. Se realizaron pruebas de Polarización potenciodinámica y de Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), a las concentraciones de IC en el rango de 10 a 500 ppm. Adicionalmente, se utilizó la técnica de pérdida de peso, Microscopía electrónica de barrido (SEM) para caracterizar la superficie del acero expuesto al medio ácido en presencia y ausencia de IC. Los resultados obtenidos por las técnicas empleadas confirmaron una baja eficiencia de inhibición a la corrosión del aceite de chía en el rango de 55-87%.

INTRODUCCIÓN

El petróleo se ha convertido en el pilar económico de nuestro país y su extracción es una tarea de vital importancia, debido a que garantiza la generación de diferentes productos derivados de su refinación. Durante la extracción, transporte y refinación es común la formación de agentes corrosivos, los cuales son potenciados por: flujo másico, temperatura, presión, concentración de sales, sólidos suspendidos, compuestos orgánicos e inorgánicos, entre otros.¹ Los daños por medios corrosivos son diferentes, pero su impacto es el mismo en toda industria. Los estudios concuerdan en que “la corrosión es un problema económicamente muy grave”. La corrosión puede definirse como el resultado destructivo de una reacción química entre un metal o aleación metálica y su medio ambiente.²

En la industria este problema se presenta siempre que existe el contacto de un medio acuoso con pH diferente al del agua. El medio acuoso, tiene el rol de un electrolito que facilitar la migración de iones y electrones al entrar en contacto con el metal. En algunos casos la presencia de trazas de agua y sales, acompañada de altas temperaturas favorecen la formación de medios ácidos.^{3,4} Como efecto inmediato se producirá un severo daño estructural en las partes metálicas en contacto con este medio. El daño se manifestará en diferentes formas de corrosión, todos con el mismo efecto “pérdida de masa”.⁵

Existe información que sugiere que la corrosión por medios ácidos, puede ser controlada de manera eficiente, con el uso de inhibidores de la corrosión (IC). Muchos de estos IC son compuestos orgánicos con grupos funcionales (amino, carboxilo, etc) y átomos (nitrógeno, fósforo, azufre y oxígeno) presentes en la estructura química de IC. Estos grupos funcionales y átomos bien orientados en la estructura del IC, influye en propiedades únicas para su adsorción (físico o química) sobre la superficie del metal o aleación.⁶ Sin embargo, algunos de estos IC poseen una desventaja que son tóxicos y bioacumulables.

En la actualidad, el uso de IC en la industria se ha enfocado a la búsqueda de nuevos compuestos no tóxicos, debido a las normas existentes de protección al medio ambiente (EPA, Environmental Protection Agency). Dentro de estas exigencias la industria ha puesto un especial interés en el desarrollo de “inhibidores verdes”, por tratarse de compuestos

obtenidos a partir de extractos de plantas. Hoy en día el uso de IC se ha ampliado en la selección de compuestos orgánicos verdes (hierbas aromáticas, especies y plantas medicinales) porque son ecológicos y amigables para el medio ambiente.⁷

El propósito del presente trabajo fue evaluar como inhibidor de la corrosión extracto de chía, debido a que su composición química indica que aproximadamente el 75% contiene ácidos insaturados, siendo los más abundantes los ácidos oleico (18:1, 6.9 %) linoleico (18:2, 18.8%) y linolénico (18:3, 58.7 %), este último de la serie omega-3.⁸ Composición que posiblemente favorezca la sinergia del mecanismo de anticorrosión del acero SAE 1018 en H₂SO₄ 1 M.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar la eficiencia de inhibición de extracto de aceite de semilla de chía, como inhibidor de corrosión “verde”, para el acero al carbono 1018 en H_2SO_4 1 M, con el uso de técnicas electroquímicas y pérdida de peso.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar extracto de aceite de chía a las concentraciones: 10, 25, 50, 100, 200, 300,400 y 500 ppm en H_2SO_4 1 M como inhibidor de la corrosión del acero SAE 1018.
- Determinar la eficiencia de inhibición y velocidad de corrosión por la técnica de pérdida de peso.
- Determinar eficiencia de inhibición por la técnica potenciodinámicas: polarización de Tafel y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).
- Determinar el mecanismo de adsorción del extracto sobre la superficie del acero SAE 1018 a través de isothermas de adsorción.
- Cuantificar el daño del acero por microscopia electrónica de barrido (SEM) en ausencia y presencia de extracto de aceite de chía.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1 CORROSIÓN

La corrosión se define como el ataque destructivo de un metal por reacciones de óxido-reducción en presencia de un electrolito. La forma y tipo de corrosión ha sido clasificada en diferentes tipos y orden, sin embargo, su importancia de estudio es la misma.⁹ Algunas formas de corrosión pueden ser las siguientes de acuerdo a la Figura 1.

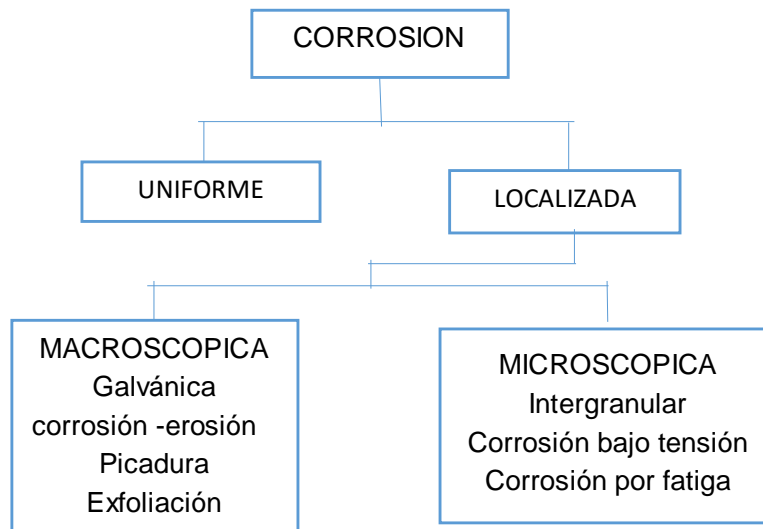


Figura 1. Clasificación del tipo de corrosión

Corrosión uniforme: Es característica cuando un metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie. Este tipo de corrosión es la más común y la vida útil del metal es más fácil de estimar⁹. La Figura 2 presenta de manera esquemática este tipo de daño.

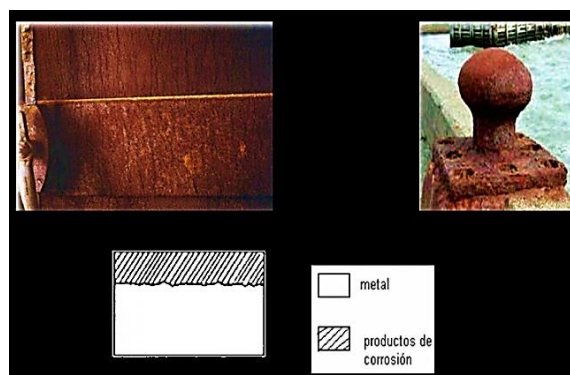


Figura 2. Corrosión uniforme

Corrosión localizada: Este tipo de corrosión (Figura 3) es más difícil de estudiar, debido a que la zona afectada puede presentar diferentes tipos de corrosión: picadura, intergranular, erosión, galvánica, microbiana, etc. De manera general, la superficie del metal y el medio acuoso, juega un papel importante en la presencia del tipo de corrosión; que pudiera presentarse.¹⁰ De manera general solo se describen dos tipos de corrosión, debido a que su clasificación es muy extensa, considerando que los otros tipos de daños también es importante de estudiar.



Figura 3 .Corrosión localizada

Corrosión por picaduras. La corrosión por picadura tiene diferentes formas, se presenta por la formación de orificios sobre la superficie del acero. Generalmente se presenta por diferencia de potencial electroquímico y zonas donde existe acumulación de electrolito. La corrosión por picaduras es un proceso lento en presentarse, por sus características es muy difícil de detectar porque la pérdida de masa es mínima (Figura 4).¹⁰



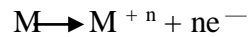
Figura 4. Corrosión por picadura

1.2 FÍSICA Y QUÍMICA DE LA CORROSIÓN

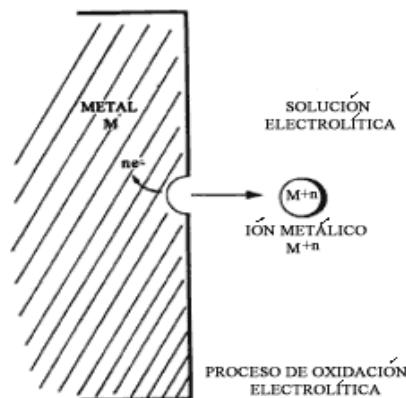
La experiencia ha demostrado que todos los metales que se conocen poseen diferentes tendencias a corroerse. Es decir, unos serán más resistentes que otros a reaccionar frente a un mismo medio. Ejemplo de esto son el oro y el hierro en agua dulce. El primer metal posee una alta inmunidad frente al agua, conservando inalteradas todas sus propiedades físicas y químicas. En cambio, el hierro se degrada y se transforma en otro compuesto.¹¹

La degradación se debe a que los electrones en un átomo ocupan niveles energéticos específicos y de diverso orden. Es decir, de acuerdo a la posición de un electrón en el átomo, este poseerá mayor o menor energía. Dependiendo del tamaño del átomo las capas y orbitales se irán llenando de electrones en diversos niveles y su energía será diferentes de átomo a átomo. Esta estructura está reflejada en el arreglo encontrado en la tabla periódica de los elementos. Las energías de un átomo surgen de energías de correlación debidas principalmente a interacciones entre electrones afectando su campo electrostático. Esto es muy importante en la química de los elementos ya que las energías que se involucran están directamente relacionadas con las reactividades químicas o con las diferentes tendencias para cambiar de un estado libre, como en el caso de un metal, a un estado de ión metálico, en donde el átomo ha cedido uno o más electrones.¹²

La corrosión puede expresarse parcialmente por la ionización de un metal (Figura 5), es decir, el proceso por el cual un átomo metálico pierde electrones y queda cargado con un exceso de cargas positivas (iguales a las cargas negativas de los electrones que se perdieron). Dicha entidad cargada constituye un ion positivo o catión. Así pues:



Siendo M un metal de valencia n, M^{+n} su forma iónica y ne^{-} el número de electrones



cedidos.

Figura 5. Proceso de ionización de un metal M

1.3 FUNDAMENTOS DE ELECTROQUÍMICA DE CORROSIÓN

La electroquímica se dedica al estudio de los cambios químicos que produce la corriente eléctrica y la generación de electricidad mediante reacciones químicas, en otras palabras, las reacciones químicas que se dan en la interface de un conductor eléctrico (llamado electrodo, que puede ser un metal o un semiconductor) y un conductor iónico (el electrolito) pudiendo ser una disolución y en algunos casos especiales, un sólido.

Todas las reacciones electroquímicas comprenden la transferencia de electrones, razón por la cual son reacciones oxido-reducción. Los sitios de oxidación y reducción están separados físicamente, por lo cual la oxidación ocurre en una parte y la reducción en otra. En los procesos electroquímicos requiere algún método para introducir alguna corriente eléctrica

en algún sistema químico de reacción o de algún medio para retirar electrones. En casi todas las aplicaciones, el sistema de reacción se forma en una celda y en una dirección se produce una corriente eléctrica y en otra dirección viajan los electrones del ánodo al cátodo en los electrodos.¹³



Figura 6. Celda electroquímica natural del proceso de corrosión

La corriente eléctrica representa transferencia de carga, y esta se puede conducir a través de metales y de electrolitos líquidos puros (esto es, sales fundidas) o disoluciones que contengan electrolitos. El primer tipo de conducción recibe el nombre de conducción metálica, la cual comprende el flujo de electrones sin que los átomos del metal tengan un movimiento semejante y sin cambios evidentes del metal. La conducción iónica o electrolítica es la conducción de corriente eléctrica por movimiento de iones a través de una disolución o de un líquido puro (electrolito). Los iones con carga positiva viajan hacia el electrodo negativo, en tanto que los iones con carga negativa lo hacen hacia electrodo positivo, y ambos tipos de conducción, iónica y metálica, tienen lugar en las celdas electroquímicas (Figura 6).¹³

1.4 APLICACIÓN DE INHIBIDORES DE LA CORROSIÓN.

Existen diferentes técnicas de protección del acero contra daños por medios corrosivos, como pueden ser: protección catódica, recubrimientos, aleaciones con mejores propiedades, polímeros, entre otros. Sin embargo, lo más económico y de fácil aplicación para medios acuosos es el uso de IC.

Al igual que algunas especies químicas promueven la corrosión, otras especies químicas inhiben la corrosión: aminas orgánicas, aminoácidos, tiadiazoles, imidazolininas, etc. Los mecanismos de inhibición de cada uno pueden ser bastante complejos.

De manera general un inhibidor orgánico se adsorbe en los sitios activos del acero (anódico y catódico) reduciendo el flujo de corriente entre estos sitios activos. De manera general, todos los inhibidores orgánicos son promotores de la formación de películas protectoras sobre la superficie metálica.¹⁴

La aplicación de un inhibidor llámese el tipo de industria (petrolera, química, metalúrgica, etc.) siempre se da en un proceso Bach a muy bajas concentraciones (ppm). Estos son aplicados cuando la velocidad de corrosión se incrementa, debido al desprendimiento de la capa protectora en los sitios activos. La adsorción se presenta porque la estructura del IC cuenta con grupos funcionales (grupo amino, hidroxilo, amida, carboxilo, etc.), que contienen generalmente átomos como son oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre los cuales contienen altas densidades electrónicas.¹⁵ Las propiedades exigidas en un IC son:

- a. Capacidad de reducir la velocidad de corrosión.
- b. Facilidad de formar enlaces de coordinación con el metal.
- c) Ser estable en el medio corrosivo “no disociarse”.
- d) No interferir en el proceso.

Algunas veces, es común suponer que la formulación de dos componentes o más con excelentes propiedades de inhibición incrementarán su eficiencia, pero la regla no siempre se cumple. Debido a que el mecanismo de adsorción es diferente para cada uno. Como resultado la determinación del mecanismo de inhibición se hace complejo y difícil de determinar.^{14,15}

1.5 INHIBIDORES DE CORROSIÓN VERDES.

La mayoría de los inhibidores naturales no son tóxicos, son biodegradables y son abundantes en la naturaleza. A la fecha se han utilizado extractos a partir de semillas, frutas, hojas, flores, etc. como potenciales IC. Se ha encontrado que reducen notablemente la velocidad de corrosión en diferentes medios corrosivos en aleaciones. En los extractos de plantas, están presentes un gran número de compuestos químicos, especialmente

heterocíclicos, que inhiben la corrosión de manera eficiente. El efecto inhibitor se atribuye a la adsorción de estas sustancias orgánicas sobre la superficie del metal, que bloquea los sitios activos o forman una capa protectora. Los resultados obtenidos a la fecha demuestran que la mayoría de inhibidores orgánicos actúan por adsorción en la interface metal/solución; mediante el desplazamiento de las moléculas de agua formando una película compacta que funciona como barrera fílmica.¹⁵ La adsorción de los IC se ve influenciada por la naturaleza y la carga de la superficie del metal, el tipo de electrolito, la temperatura y la estructura química del inhibidor.

La interacción entre los grupos funcionales, la superficie del metal y heteroátomos como el nitrógeno, oxígeno, azufre y fósforo juegan un papel clave en la inhibición, debido a los pares de electrones libres que poseen. La disponibilidad de pares solitarios y electrones π en las moléculas del inhibidor facilitan la transferencia de electrones desde el inhibidor hacia el metal, y forman un enlace covalente coordinado.¹⁶

En general, los principales tipos de interacción entre un inhibidor orgánico y la superficie del metal, son la quimisorción y/o fisisorción. Se ha sugerido que las moléculas adsorbidas físicamente bloquean los sitios catódicos en el metal, retarda la reacción catódica, mientras que las moléculas adsorbidas químicamente protegen las zonas anódicas. Además, el grupo polar de la molécula puede unirse al metal y el extremo no polar estará orientado en una dirección vertical a la superficie metálica y repele las especies corrosivas, estableciendo así una barrera contra el medio corrosivo a la superficie metálica.¹⁶

La estructura electrónica de la molécula del inhibidor orgánico determina la densidad electrónica de los grupos funcionales y son responsables de su adsorción sobre la superficie metálica a proteger. De acuerdo con algunos autores¹⁷ el mecanismo de inhibición de ciertos compuestos orgánicos implica el bloqueo de los sitios activos de la superficie, por la adsorción de estos compuestos. Estos sitios pueden ser catódicos o anódicos dependiendo en gran parte de la naturaleza del inhibidor y su preferencia a un proceso específico (oxidación o reducción) o ambos (inhibidor mixto).¹⁸ Una gran diversidad de compuestos orgánicos derivados de plantas han sido evaluados como se describe a continuación.

Un surfactante preparado a partir del aceite de semilla de *Adenopus breviflorus* fue aplicado como inhibidor de la corrosión del acero al carbono en HCl 0,5 M a través del método de

pérdida de peso. El mecanismo inhibitor se estudió a partir de las propiedades de la superficie y su topografía. Encontrándose que su mecanismo de protección fue por adsorción física.¹⁹

El *zumo de albaricoque* se empleó para inhibir la corrosión de acero al carbono en solución 1M de H₃PO₄ a diferentes temperaturas, por la técnica de pérdida de peso. Los estudios confirmaron la adsorción de este extracto, a través, de la formación de monocapas que fueron confirmadas con el modelo de adsorción de Langmuir. El comportamiento de la energía de activación y la velocidad de corrosión confirmaron la influencia de la temperatura y la concentración del inhibidor.²⁰

El extracto de *Euphorbia falcata L.* se evaluó como inhibidor de la corrosión de acero al carbono en HCl 1 M usando técnicas gravimétricas, espectroscopia de impedancia, polarización y microscopía electrónica de barrido. Los resultados obtenidos a partir de las curvas de polarización indicaron que el extracto es un inhibidor de tipo mixto. El proceso de inhibición fue controlado principalmente por fisisorción.²¹

La inhibición de la corrosión del acero al carbono en HCl 1 M y 1 M de H₂SO₄ por la *microalga Spirulina platensis*, se estudió a diferentes temperaturas por el método de pérdida de peso, polarización potenciodinámica, medidas de espectroscopia de impedancia electroquímica y microscopía electrónica de barrido. La eficiencia de inhibición fue mayor con el aumento de la concentración del inhibidor, tanto en HCl como en H₂SO₄. Los resultados de los estudios de pérdida de peso, tuvieron correlacion con los de estudios de impedancia y polarización. Confirmándose un mecanismo de adsorción de tipo físico.²²

El extracto de hojas de *Olea europea L.*, conocida como olivo, se evaluó como inhibidor de la corrosión en una aleación de acero de bajo carbono en salmuera sintética. Las técnicas empleadas fueron impedancia electroquímica (EIS) y curvas de polarización potenciodinámicas. El mecanismo de inhibición reportado se atribuyó a la formación de incrustaciones, por la formación del complejo de cafeato de calcio, que se adsorbió en la superficie del acero. Las curvas de polarización potenciodinámicas indicaron que el extracto de hoja de olivo puede inhibir la corrosión del acero y la acumulación de incrustaciones de calcio.²³

En la evaluación de *extracto de hojas de Neem* se obtuvieron altas eficiencias de inhibición para el acero al carbono en soluciones de HCl 1 M, alcanzándose eficiencias alrededor de 87% a temperatura ambiente, con una concentración de 3g/L del extracto.²⁴

En el estudio de las propiedades de inhibición y de adsorción del *extracto etanoico de Heinsia crinata* en acero al carbono en soluciones de H₂SO₄, por técnicas anteriormente mencionadas. Se reportó que la eficiencia de inhibición del extracto fue función de la concentración, tiempo de inmersión y temperatura. Las propiedades inhibidoras fueron atribuidas a la presencia de alcaloides, saponinas, taninos, glucósidos cardiacos y antraquinona, confirmadas por IR.²⁵

El efecto de protección del extracto de *Aniba rosaeodora* para el acero C38 en HCl 1 M, también ha sido reportado. Los estudios de polarización mostraron que el extracto es un inhibidor de tipo mixto cuya eficiencia de inhibición fue función de su concentración.²⁶ Así como extractos de hojas de rábano y comino negro, también han sido propuestos como inhibidores para acero expuesto a aguas industriales. Los datos reportados revelaron que el extracto de comino negro presenta mejor resultado como inhibidor, en comparación con el extracto de hojas de rábano. Pero ambas plantas pueden ser empleadas para reducir la velocidad de corrosión en ductos de petróleo o gas con grandes contenidos de agua.²⁷

Extracto de *Aloe vera* también han sido evaluadas y su mecanismo de inhibición se debe principalmente a procesos de quimisorción. Basados en la composición química del aloe, concluyeron que la acción inhibidora del extracto se debe al efecto de sus grupos funcionales con los iones férricos. Esto facilitó una fuerte coordinación sobre la superficie del acero en estudio.²⁸ Además el extracto obtenido de la hoja de sábila fue evaluado como inhibidor para acero y para zinc en una solución de HCl 1M, las eficiencias de inhibición fueron buenas para el acero, pero no inhibió la corrosión del cobre exitosamente, concluyéndose que este extracto actúa principalmente como inhibidor de tipo mixto, con preferencias a lado anódico y catódico. Otro extracto sometido a estudios fue el de algas *Bifurcaria bifurcata*, usado en la inhibición de la corrosión del acero al carbono en presencia de HCl 1 M. El proceso de adsorción de este extracto se debió a la formación de quelatos de hierro y formación de complejos en la superficie.²⁹ Finalmente, el aceite de

Artemisa también fue evaluado para el mismo tipo de acero con el mismo medio. La mayor eficiencia de inhibición fue del 76% a la concentración del inhibidor de 19 g/dm³.³⁰

Como se ha reportado, el estudio de extracto de plantas es amplio en la industria para la protección de diferentes tipos de aleaciones en medios corrosivos. Pero en todos los estudios de extractos de origen vegetal reportados como IC, sobresale su importante potencial como IC, además de tenerse la sinergia de tratarse de compuestos denominados “verdes”.

1.6 ACEITE DE SEMILLA DE CHÍA COMO INHIBIDOR DE CORROSIÓN.

La palabra chía se deriva de “chichaan” que en dialecto Maya significa “fuerte o que da vigor” en dialecto náhuatl la palabra “chiactic” significa aceitoso o grasoso.

En el México precolombino la chía era un alimento básico para las civilizaciones Maya y Azteca, su cultivo era muy importante y probablemente el tercero en importancia económica, superado sólo por el maíz (*Zea maíz*) y el frijol (*Phaseolus vulgaris*).³¹

Existen dos fuentes de material genético: México y Nicaragua, aunque ambos muestran una alta similitud genética, se diferencian principalmente por el fotoperiodo. El material proveniente de Nicaragua tiende a ser más tropical, tiene un periodo de crecimiento más largo.

La semilla proveniente de México (Originada en el Cordón trans-volcánico de Puebla, entre 1.400 a 2.200 msnm), tiene un periodo de crecimiento más corto ya que debe florecer antes de las heladas (Figura 7).³²



Figura 7. Cultivo de Chía

1.7 ESTRUCTURA ANATÓMICA Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA SEMILLA

Es horizontal, albuminosa, sólo una por clase y ocupa todo el volumen del fruto. Su contorno es oblongo-elíptico; superficie opaca, reticulada, de color amarillo-ocráceo y dimensiones de 1.3 a 1.8 mm de longitud por 1 a 1.2 mm de ancho.³³

Su composición varía de acuerdo a su lugar de procedencia,³⁴ sin embargo el análisis básico muestra que tiene en promedio 21.1% de proteínas, 32.2% de grasas, 27.7% de fibra y 4.8% de cenizas.³⁵

1.7.1 SUSTANCIAS EXTRAÍBLES

Las sustancias químicas que contiene la semilla de chía se dividen en hidrofílicas y lipofílicas. La fracción lipofílica está constituida por sustancias solubles en disolventes no polares (hexano, éter etílico, diclorometano, etc.) como grasas y ceras. La fracción hidrofílica está constituida por sustancias extraíbles en agua o por disolventes orgánicos polares (acetona, alcohol etílico, etc.) y contiene gran cantidad de constituyentes fenólicos

1.7.2 ÁCIDOS GRASOS ESENCIALES (AGE)

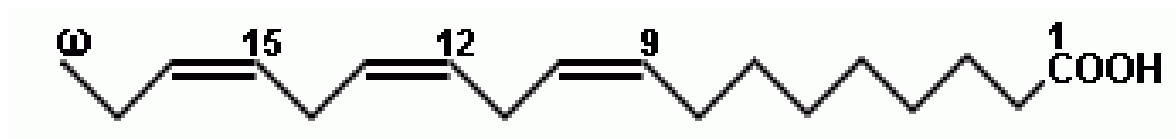
Son un conjunto de ácidos que el cuerpo no puede producir que tienen que ser incorporados al organismo a través de alimentos y suplementos dietarios.

Hay dos ácidos grasos esenciales: El ácido linoleico (Ω -6) y el ácido α -linolénico (Ω -3) y sus derivados de cadena larga tales como el DHA; la relación ideal entre el consumo de estos ácidos tendría que mantener una relación 4:1 (Omega 6: Omega 3 respectivamente), sin embargo, esta relación se rompe hasta 20 a 1, lo que puede generar múltiples problemas de salud.

1.7.3 ÁCIDO α -LINOLÉNICO (OMEGA-3)

Están implicados no sólo en la maduración cerebral y de la retina del niño (por eso la leche materna lleva estos ácidos grasos), sino que intervienen en los procesos de inflamación, coagulación, presión arterial, órganos reproductivos y metabolismo graso.

Por lo que cantidades suficientes de Omega 3(Figura 8) aporta múltiples beneficios para la salud, como una disminución del riesgo cardiovascular, la prevención de enfermedades del sistema nervioso y una disminución de los síntomas de enfermedades inflamatorias, como la artritis reumatoide.



1.7.4 VITAMINA E (GAMMA TOCOFEROL)

La vitamina E (Figura 9) tiene capacidad antioxidante frente a los radicales libres, desempeña actividad protectora para ciertas moléculas lipídicas al impedir su oxidación, retardando el catabolismo celular. Actúan, por tanto, contra el envejecimiento celular, contribuyendo, por extensión, al aumento de la longevidad, también impide que otras vitaminas sean destruidas por el oxígeno.

Esta vitamina mejora la circulación, es necesaria para la reparación de los tejidos, y coadyuva en el tratamiento del síndrome premenstrual y la enfermedad fibroquística de seno.

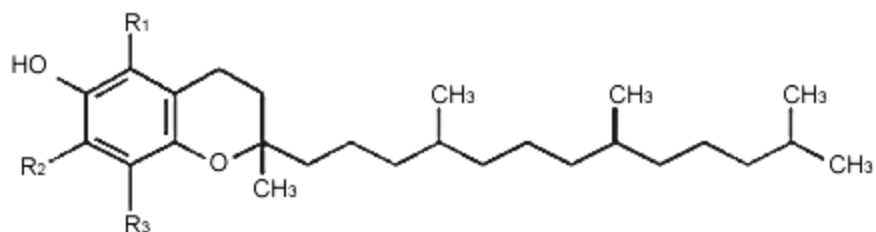


Figura 9. Estructura de la vitamina E

1.7.5 FITOESTEROLES

Son esteroides de origen vegetal cuya estructura química es parecida a la del colesterol. Sin embargo, los fitoesteroides difieren estructuralmente del colesterol, que posee 27 átomos de carbono (C₂₇), por la presencia de sustituyentes de tipo metilo (C₁) o etilo (C₂) en la cadena lateral de la molécula, con lo cual son moléculas de 28 y 29 átomos de carbono. Derivan del ciclopentano perhidrofenantreno, diferenciándose en la cadena hidrocarbonada lateral en C-24. En el colesterol, esta cadena se forma por ocho carbonos saturados. En cambio, los fitosteroides presentan 9 ó 10 carbonos (β -sitosterol y campesterol), algunos presentan doble enlace: stigmasterol.

En la naturaleza, se han descrito más de 200 tipos diferentes de esteroides vegetales en diferentes especies de plantas, siendo los más abundantes: campesterol, stigmasterol y β -sitosterol (Figura 10), constituyendo el 95-98% de los fitoesteroides identificados.³⁶

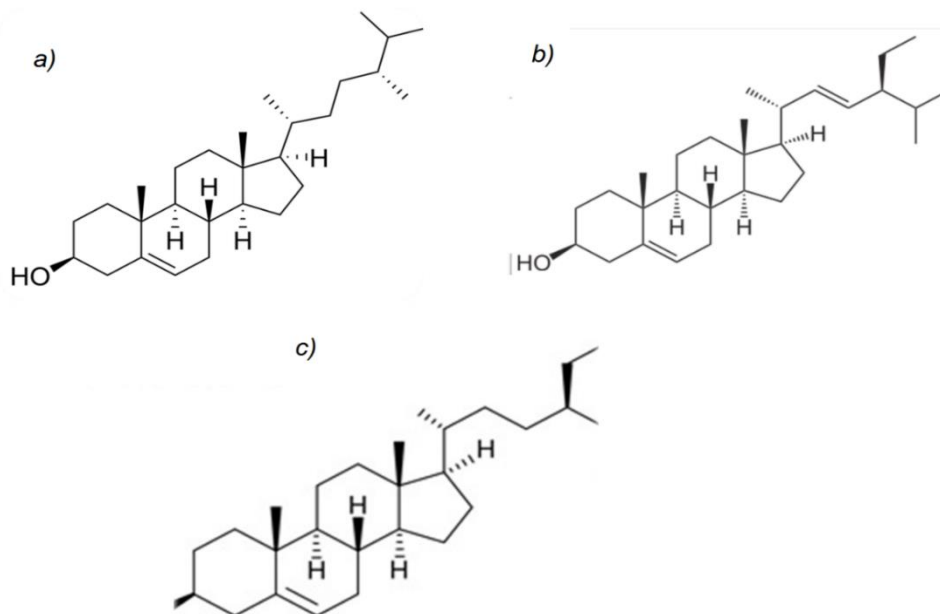


Figura 10. Estructuras de los principales esteroides a) Campesterol, b) Stigmasterol y c) β -sitosterol

Se encuentran en casi todos los tallos, frutos y hojas vegetales. Las principales fuentes son los aceites vegetales, semillas oleaginosas, en cereales, legumbres y frutos secos.

CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 EXTRACCIÓN DEL ACEITE DE SEMILLA DE CHÍA

El método seleccionado para la extracción del aceite chía “EXTRACCIÓN POR SOLVENTE” el mismo que consta de elementos y equipos tales como: hexano grado reactivo analítico, equipo sohxlet y separador.

Una vez elegido el método de extracción a continuación se describe la metodología para llevar a cabo la caracterización del aceite, la cual se ilustra a continuación (Figura 11).

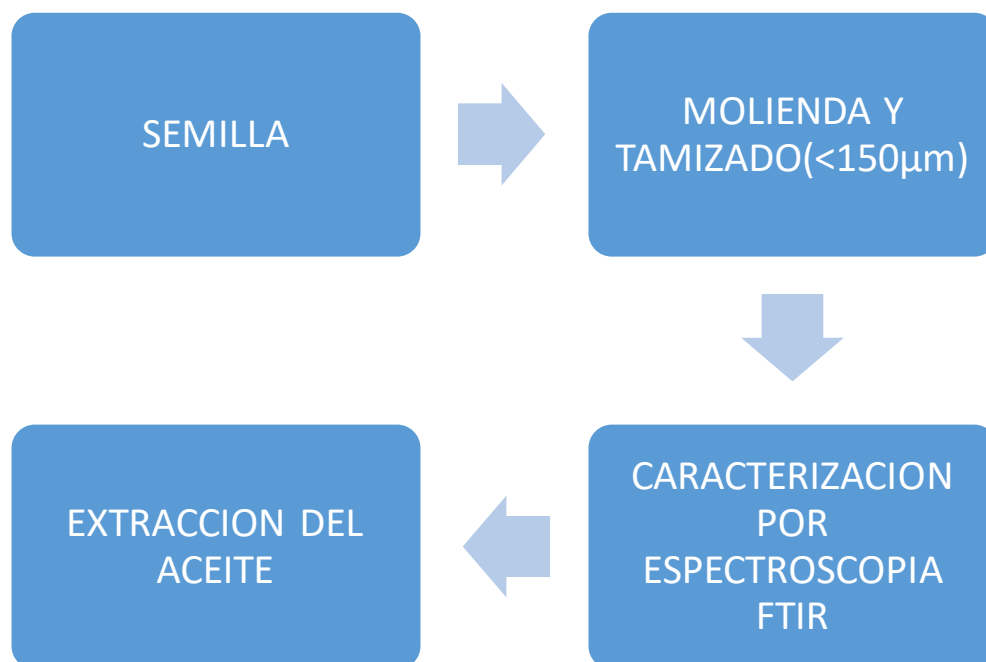


Figura11. Diagrama de flujo del proceso

2.2 OBTENCIÓN DEL ACEITE DE CHÍA.

Se partió de 75 g de chía negra (*Salvia hispánica L*) pulverizada procedente de San Mateo Coatepec Atzitzihuacán Puebla, México y mediante un equipo soxhlet se extrajo el aceite utilizando hexano como disolvente (Figura 12), el cual fue separado utilizando un rotavapor controlando la temperatura a 60 °C durante 40 minutos y mediante una bomba de alto vacío se eliminaron las trazas de hexano.



Figura 12. 1 Extracción de aceite de Chía

2.3 ANÁLISIS DEL EXTRACTO DE CHÍA.

Espectroscopia FT-IR

La espectroscopia de FT-IR (Figura 13) se realizó en la región de 4000 a 400 cm^{-1} utilizando un espectrofotómetro Perkin Elmer FT-IR Spectrum One Spectrometer. Se realizó una línea base y se procedió a analizar las muestras.

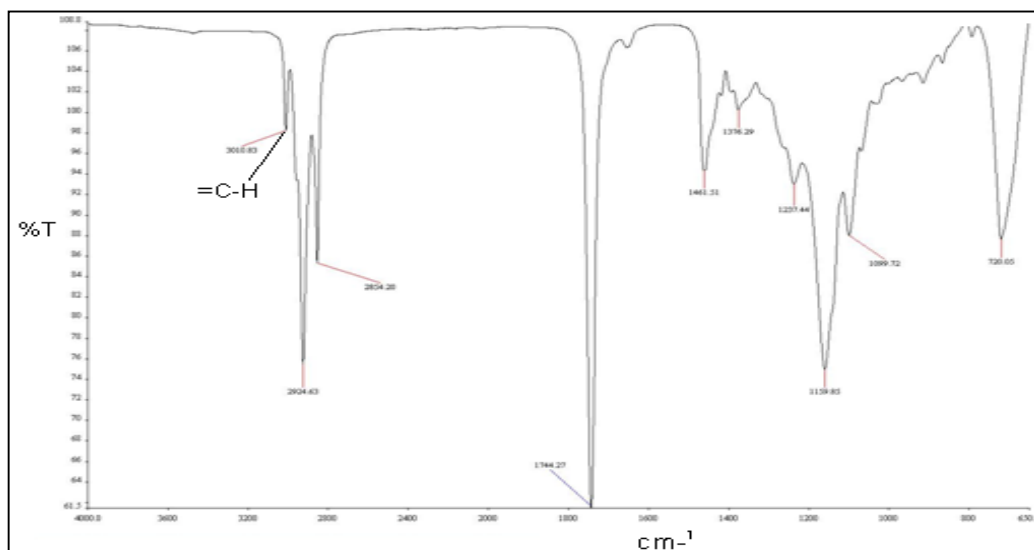


Figura 13. Espectro FTIR del aceite de chía.

2.4 MEDIO CORROSIVO

El medio corrosivo para la evaluación del aceite de chía como inhibidor fue H_2SO_4 grado reactivo con A.C.S. con pureza del 96.0 a 98.0 %, preparado en solución 1.0 M con el uso de agua desionizada. Mientras que el aceite de chía fue disuelto en metanol grado reactivo y fue dosificado a medio corrosivo en concentraciones de 10, 25, 50, 100, 200, 300, 400 y 500 ppm.

2.5 PREPARACIÓN DE LOS TESTIGOS DE ACERO SAE 1018

La evaluación de aceite de chía como posible inhibidor de corrosión se realizó en acero SAE 1018, con la siguiente composición química: 0.10 wt. % C, 0.25 wt. % Si, 0.45 wt. % Mn, 0.03 wt. % P, 0.03 wt. % S, resto de Fe. Antes de la realización de las pruebas electroquímicas; se maquinaron las probetas de acero SAE (electrodos de trabajo) con dimensiones bien establecidas como se muestra en la Figura 14. Estas fueron encapsuladas en resina epoxica (VersonCit-2 Kit) dentro de una barra circular de teflón, asegurando un área de contacto de 0.3117 cm^2 . Antes y después de cada prueba la superficie del electrodo fue desbastada con papel de carburo de sílice No. 600, 1500 y 2000 con el propósito de obtener superficies de trabajo homogéneas. Al final del proceso de desbastado y pulido la superficie fue lavada con agua desionizada y secada con acetona. Las pruebas de pérdida de peso se realizaron con el mismo tipo de acero, sin embargo, las medidas fueron de 0.54 cm x 0.54 cm x 0.025 cm. La preparación y evaluación de los cupones en esta técnica fueron realizadas de acuerdo a la norma ASTM G 1-88³⁷ y ASTM G 31-72.³⁸

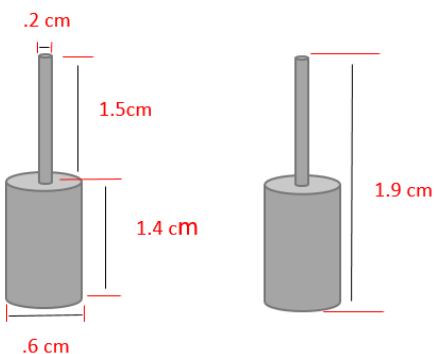


Figura 14. Probetas de acero SAE (electrodos de trabajo)

2.6 EVALUACIÓN DE LOS INHIBIDORES DE LA CORROSIÓN

Para realizar las pruebas de pérdida de peso las testigos fueron inmersos en H_2SO_4 1 M medio ácido, en presencia y ausencia de aceite de chía a las concentraciones anteriormente mencionadas, por un tiempo de 2 y 8 h. Posteriormente los testigos metálicos fueron retirados e inmediatamente inhibidos en agua regia por 15 segundos. Los testigos corrosivos fueron pesados antes y después de la exposición al medio corrosivo para cuantificar los miligramos perdidos.

2.7 MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS

Las mediciones electroquímicas, curvas de polarización Tafel y Espectroscopia de impedancia electroquímica, se realizaron en una celda estándar con tres electrodos. El contra electrodo fue de platino de alta pureza (99.9 %), el electrodo de referencia de Calomel saturado (SCE) y de trabajo de acero SAE 1018. Las mediciones se realizaron a 23 ± 2 °C. Todas las pruebas electroquímicas se realizaron con un potencióstato/galvanostato Autolab modelo PGSTAT302N acoplado a una PC, empleando el software Nova 2.0. Las mediciones de las curvas de Tafel se realizaron en el rango de -250 mV a 250 mV (vs. OCP) a una velocidad de barrido de 2 mV/s. Las pruebas se realizaron por cuadruplicado con la finalidad de confirmar la reproducibilidad de los procesos corrosivos observados. Las pruebas de EIS se realizaron de 100 a 10 KHz a una amplitud de 5 mV/s.

2.8 CARACTERIZACIÓN POR TÉCNICAS DE ANÁLISIS SUPERFICIAL SEM

Los testigos de acero SAE 1018 fueron analizados después de 2 horas de inmersión en 100 ml de H_2SO_4 1.0 M en ausencia y presencia de extracto de chía las concentraciones de 0, 10 y 100 ppm, a la temperatura de 23 ± 2 °C. Las probetas de acero fueron previamente desbastadas con hojas de carburo de sílice No. 600 a 2000 y por último pulidas con alúmina; posteriormente fueron lavadas con agua desionizada por ultrasonido y secadas con isopropanol grado reactivo. Se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido modelo JEOL-JSM-6300 equipado con un módulo de espectroscopia de Energía Dispersa (EDS).

CAPÍTULO 3. DISCUSION DE RESULTADOS

3.1 POLARIZACIÓN DE TAFEL

La Figura 15 muestra el comportamiento de las curvas de polarización para el acero SAE 1018 en H_2SO_4 1.0 M con y sin presencia de extracto de aceite de chía. De las curvas obtenidas fueron obtenidos los parámetros electroquímicos: intensidad de corriente de corrosión (i_{corr}), pendiente de Tafel catódica (β_c) y anódica (β_a) y potencial de corrosión (E_{corr}). Todos los parámetros fueron obtenidos por extrapolación lineal de la rama anódica y catódica de los gráficos de Tafel (Figura 15) al potencial de corrosión.

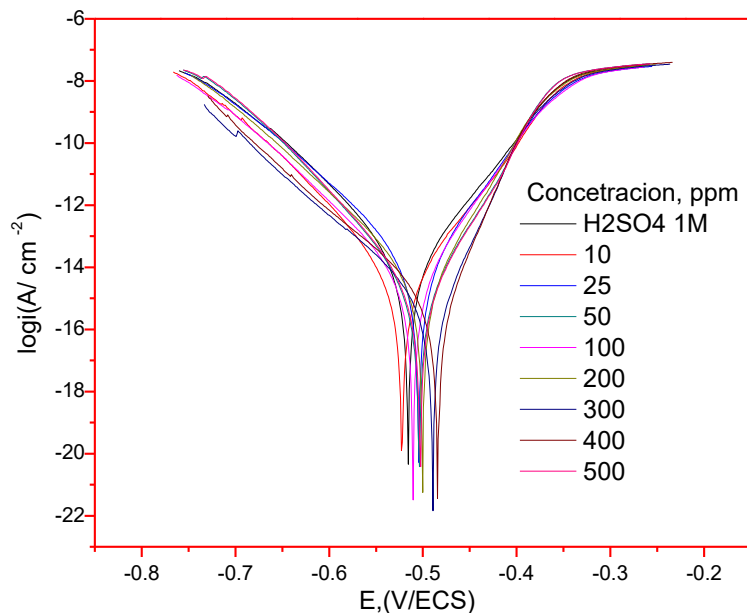


Figura 15. Gráficas de Tafel para la polarización del acero SAE 1018 con y sin inhibidor.

Como se observa en la Figura 15 en presencia de extracto de chía la rama catódica y anódica muestra una disminución en la intensidad de corriente, por lo tanto, la velocidad de corrosión tiende a ser mayor con el incremento de la concentración. Este comportamiento, también ha sido reportado en diferentes estudios; donde fueron evaluados extractos de plantas, cuyo efecto protector se debió a la composición química del extracto y no un compuesto en particular.³⁹

En nuestro caso es difícil asignar un componente químico del extracto de la chía como principal responsable del proceso de inhibición debido a su contenido de ácidos grasos polinsaturados e insaturado. Sin embargo, se presenta un proceso de adsorción que muestra el comportamiento de las curvas de la Figura 15, donde la adsorción de moléculas de chía es inversamente proporcional a la concentración de extracto en el medio corrosivo, debido a la posición que presentan las curvas potenciodinámicas. Es decir, la intensidad de corriente sobre la superficie del acero SAE 1018 es efectuada por la presencia de las moléculas del extracto, donde se tiene una gama de moléculas nucleofílicas e hidrofílicas.

Del análisis de las figuras se observa un fenómeno importante de recalcar “a mayor volumen de extracto de chía” su adsorción a la superficie metálica es menor, por tanto, los compuestos insaturados tienen a bloquear la orientación de los compuestos que son afines en densidad electrónica a la superficie del acero. Adicionalmente, las curvas potencial-corriente en la parte catódica (Figura 15) presentan un comportamiento paralelo entre ellas, indicando que el extracto evaluado no modifica el mecanismo de corrosión del acero, por lo tanto, la reducción sobre la superficie metálica toma lugar a través de un mecanismo de transferencia de carga eléctrica.⁴⁰ Esta observación también ha sido reportada en trabajos previos donde han sido evaluados extractos de plantas que han sido evaluados como inhibidores en diferentes medios corrosivos.³⁹

En la Tabla 1 se observa que los valores de (β_c) y (β_a) no muestran un orden con el incremento de la concentración, esto indica que el proceso de inhibición solo ocurre por un mecanismo de bloqueo físico y depende el grado de superficie cubierta.⁴¹

Tabla 1. Parámetros electroquímicos (β_c , β_a , E_{corr} , i_{corr}) asociados con las medidas de polarización del electrodo de acero SAE 1018 en ausencia y presencia de inhibidor.

C ppm	$-E_{corr}$ (mV)	i_{corr} (μ/cm^2)	β_a (mV dec-1)	$-\beta_c$ (mV dec-1)	η_T (%)
0	453	762	108	81	0
10	515	96	106	79	87
25	506	117	109	70	84

50	495	134	115	57	82
100	509	145	100	78	80
200	462	259	119	48	66
300	454	387	123	65	49
400	462	419	153	54	45
500	446	635	128	67	16

Al analizar los valores de E_{corr} en la Tabla 1 y sus respectivos desplazamientos en la Figura 15 a las concentraciones estudiadas se obtuvo lo siguiente:

a) El desplazamiento de E_{corr} con respecto al blanco fue de 62 mV al lado catódico y de 6 mV hacia el lado anódico.

b) Los desplazamientos de E_{corr} hacia el lado catódico fueron de 62 mv a 10 ppm, mientras que para el lado anódico fue de 6 mV a 500 ppm. Algunos trabajos han tratado de explicar el comportamiento de los extractos de plantas como inhibidores de tipo mixtos con preferencia hacia el lado anódico o catódico⁴², si el desplazamiento de E_{corr} con respecto del blanco es menor a 85 mV.

En nuestro caso de estudio el extracto de aceite chía en H_2SO_4 1 M para el acero SAE 1018 se comportó como inhibidor de corrosión de tipo mixto con preferencia hacia el lado catódico y anódico.

La eficiencia de inhibición, ($\eta_T\%$) a las diferentes concentraciones de extracto de chía fueron calculadas con la siguiente ecuación.

$$\eta_T, \% = \left[1 - \frac{i_{corr}}{i_{corr}^0} \right] \cdot 100 \quad (1)$$

Donde i_{corr} , i_{corr}^0 son la densidad de corriente en ausencia y presencia de inhibidor, respectivamente.

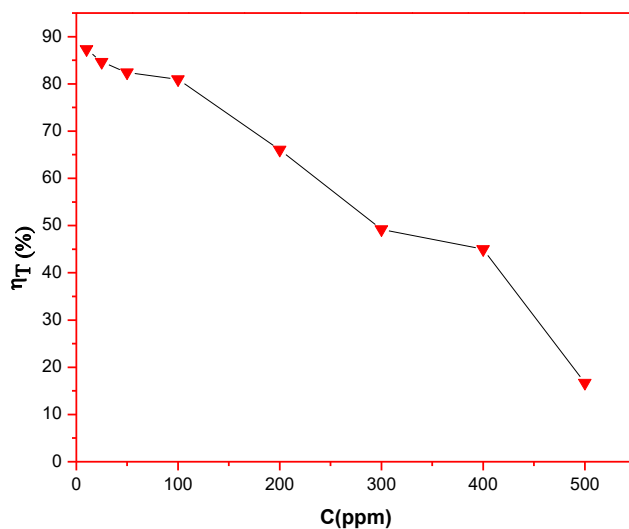


Figura 16. Eficiencia de inhibición del aceite de chía sobre el acero SAE 1018 a diferentes concentraciones.

En la Figura 16 se observa que la η_T no es función de la concentración, es decir, existe una mayor cantidad de sitios activos protegidos a menor concentración, como resultado el gradiente de corriente sobre la superficie del acero es menor; por la posible formación de una barrera fílmica más ordenada entre la interfase metal-solución, debida a la orientación de Gamma-Tocoferol y Beta-Sitosterol de sus grupos funcionales.

Al incrementar la concentración de extracto de chía gradualmente la eficiencia de inhibición tiende a disminuir drásticamente, porque la fuerza de atracción electrostática entre los grupos funcionales de los compuestos de Gamma-Tocoferol y Beta-Sitosterol tiende a ser menor hacia la superficie por tratarse de un proceso de adsorción física.⁴³ Otro factor que puede intervenir también en dicho comportamiento es la presencia de grandes cadenas saturadas ácido α -linolénico (Ω 3) y linoleico (Ω 6) que al incrementar su concentración y su volumen molecular es mayor en comparación al resto de los compuestos. Debido a que estas dos moléculas (Ω 3) y (Ω 6) representan el 62 y 20 % del total de los compuestos presentes.

3.1 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS)

El estudio de la cinética de la disolución del hierro en diferentes soluciones ácidas es amplio, sin embargo, todos parten del modelo general que describe el mecanismo de la disolución del hierro en medio ácido.⁴⁴ Donde están implicadas tres reacciones con especies intermedias. La Figura 17 describe el mecanismo, donde el subíndice “ad” y “sol” indican las especies adsorbidas en la superficie del electrodo o disueltas en el volumen de la solución, $\text{Fe}^*(\text{I})_{\text{ad}}$ y $\text{Fe}^*(\text{II})_{\text{ad}}$ son las especies intermedias durante la disolución.

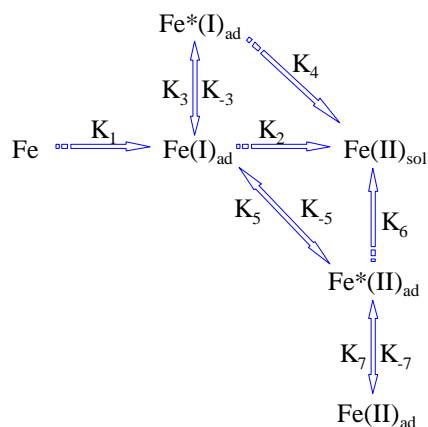


Figura 17. Representación esquemática de las diferentes rutas de la disolución del hierro.

Durante el desarrollo de estas reacciones, la capa de los productos de corrosión (CPC) tiene un rol importante en los procesos de corrosión. Su formación dependerá del tipo de aleación, medio corrosivo, temperatura, tipo de flujo, factores geométricos y pH de la solución, entre otras⁴⁵. El conocimiento de los tipos de productos de corrosión formados por la reacción anódica y su adsorción en la superficie del metal, es muy importante, para poder plantear aproximación de los diferentes procesos de la corrosión presentes.

Al agrupar las diferentes técnicas empleadas en el presente trabajo, podemos suponer un modelo de la interfase metal-CPC-solución. La capa primaria formada por FeOH_2 , FeSO_4 y la secundaria por Fe_xO_y . La capa primaria podría o no cubrir completamente la superficie metálica, de tal manera que habría áreas del metal libres con Fe_xO_y . De acuerdo a lo anterior, es posible considerar que el grosor de la doble capa es de escala nanométrica,

mientras que la capa de productos de corrosión (CPC) es micrométrica, entonces la interfase metal-CPC-solución tendría la forma que se muestra en la Figura 18.

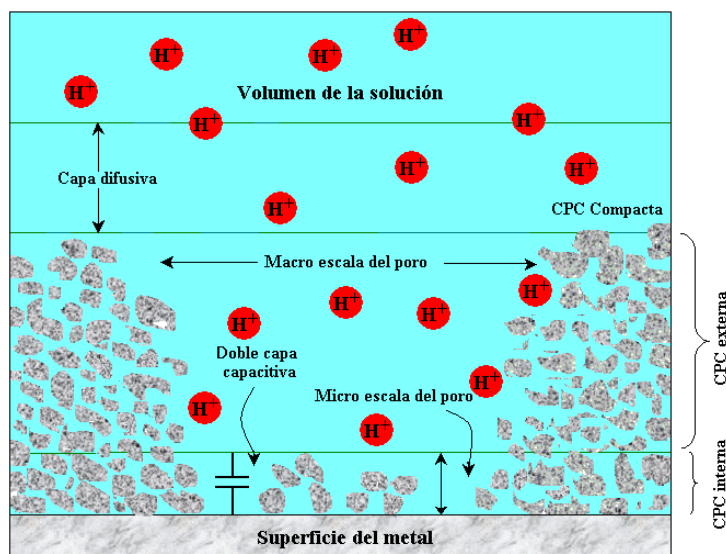


Figura 18. Modelo propuesto de la interfase metal-CPC-solución para las pruebas EIS sin inhibidor en H_2SO_4 1.0 M.

Las características de la capa externa porosa se deben a las reacciones de evolución de la parte catódica, aunado, si tomamos en cuenta la porosidad CPC, entonces las especies electroquímicamente activas pueden difundirse a través de ella, siendo la ruta de las especies corrosivas los poros de la capa externa hacia la capa interna y a la superficie del metal.

La Figura 19 muestra el posible modelo en la interfase metal-IC-solución para el sistema en presencia de inhibidor. Si la suposición anterior es válida para este sistema con inhibidor, entonces las moléculas de inhibidor de escala molecular podrían difundirse también al igual que las especies electroquímicamente activas, a través de los poros de ambas capas e interactuar con los sitios activos libres en la superficie del metal. En consecuencia, la porosidad de la superficie se vería reducida y como resultado la velocidad de corrosión del metal se reduciría, debido a que las especies electroquímicamente activas no podría difundirse de manera libre hacía el metal.

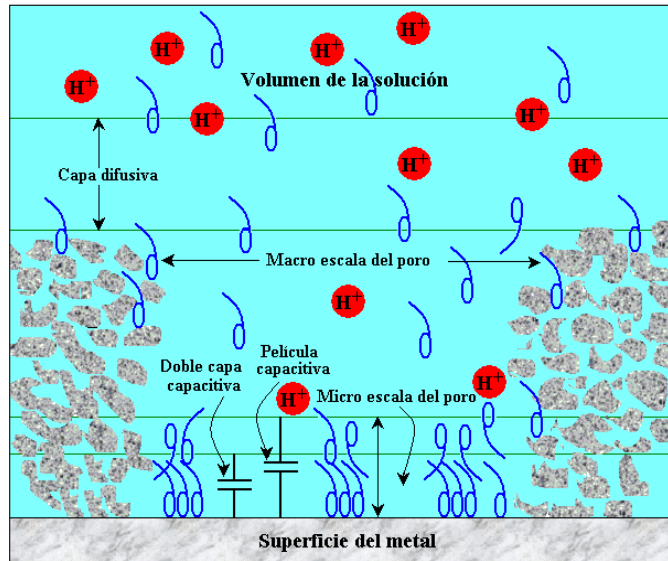


Figura 19. Modelo del proceso de inhibición en la interfase metal-película-solución en H_2SO_4 1 M.

Del análisis anterior se introdujo un modelo de circuito equivalente (CEQ) para interpretar el significado físico de los espectros de EIS obtenidos en el estudio. La Figura 20 muestra el CEQ que consta de un elemento de fase constante (CPE)(Q) y R_s (resistencia de la solución) y R_{TC} (resistencia de la transferencia de carga).

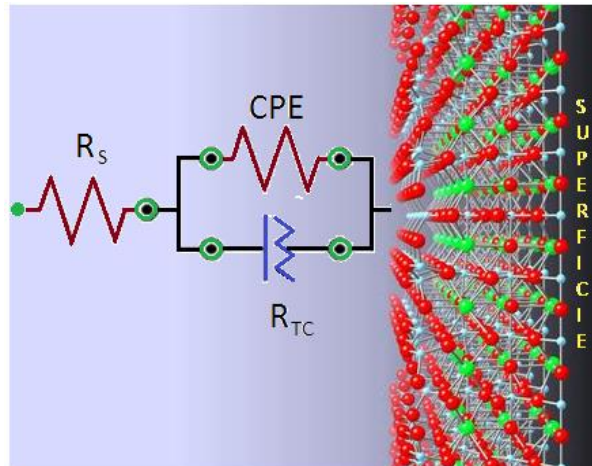


Figura 20. Representación esquemática del circuito equivalente sobre la superficie del acero.

El ajuste del CEQ con los datos experimentales fue hecho con el programa NOVA ver 2.0. Una aceptable convergencia entre los datos experimentales y los aproximados fue obtenida con el uso del elemento de fase constante (CPE) en el circuito equivalente, el cual es definido de la siguiente manera:

La impedancia, Z , del CPE toma la forma:⁴⁶

$$Z_{CPE} = [Q(i\omega)^n]^{-1} \quad (2)$$

Donde:

Q : es una combinación de las propiedades superficiales y las especies electro activas

ω : frecuencia angular (rads^{-1})

$j^2 = -1$: número imaginario

n : exponente del CPE

Dependiendo de n , CPE puede representar una resistencia ($n=0$, $Q=R$), capacitor ($n=1$, $Q=C$), inductancia ($n=-1$, $Q=L$) y una Warburg ($n=0.5$, $Q=W$). Estos valores hacen posible diferenciar entre el comportamiento ideal de un capacitor y el de un CPE ($n < 1$).

El CPE fue introducido en el ECQ para representar la no-idealidad del comportamiento capacitivo, debido al fenómeno físico de la heterogeneidad superficial que se debe a la rugosidad, impurezas, dislocaciones, límite de grano, distribución de los sitios activos, adsorción del inhibidor, formación de capas porosas.⁴⁷ En este contexto, n puede ser usada para representar la no-uniformidad superficial que influye en la distribución de la carga sobre la superficie.⁴⁷

La Figura 21 Muestra la gráfica de Nyquist obtenido en presencia y ausencia de extracto de chíá para el acero SAE 1018 en H_2SO_4 . Es claro que los diagramas de Nyquist obtenidos poseen la forma de semicírculos. La existencia de un solo semicírculo en el grafico Nyquist indica que sólo existe un proceso de transferencia de carga durante la disolución del acero.

$$EI_{EIS}, \% = \frac{R_{TC(inh)} - R_{TC}}{R_{TC(inh)}} \times 100 \quad (3)$$

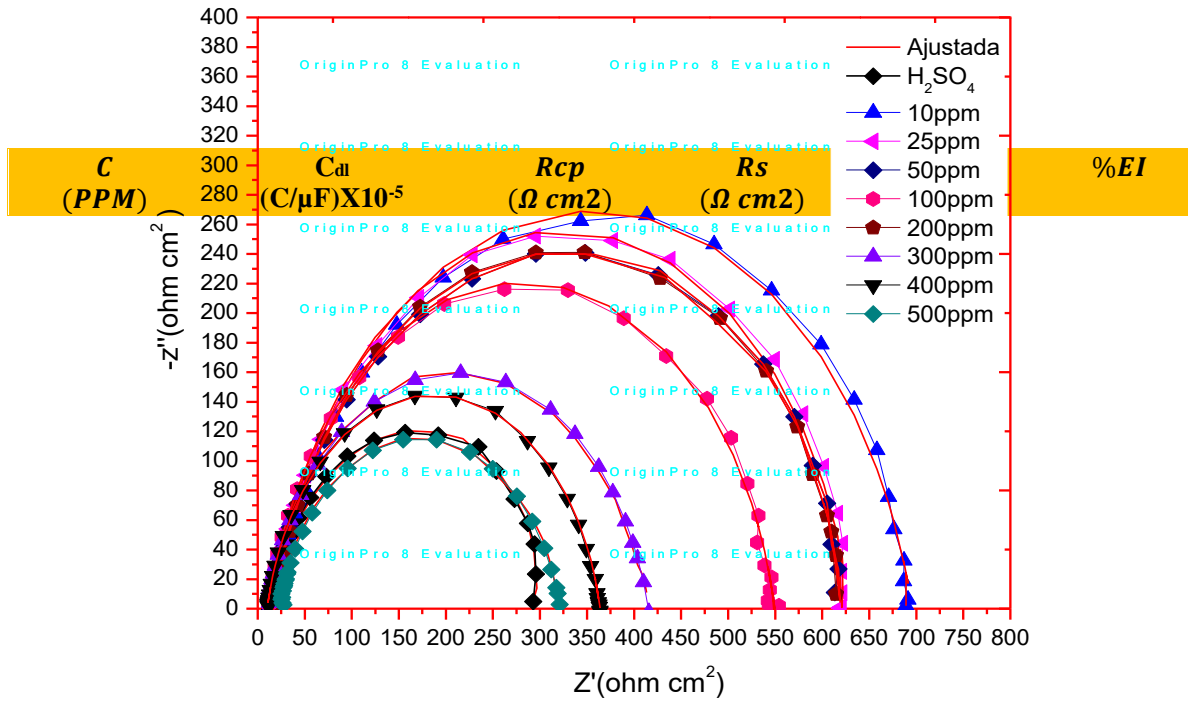


Figura 21. Gráfico de Nyquist del acero SAE 1018 en H₂SO₄ 1 M en presencia y ausencia de IC.

Además, el proceso de corrosión de acero SAE 1018 en la solución de H₂SO₄ en presencia y ausencia de extracto de chíá fue controlado por la transferencia de carga sobre la superficie del metal.⁴⁸ Se puede observar en la Figura 21 que el diámetro de semicírculo aumenta con la concentración de inhibidor, confirmándose la adsorción de moléculas a la superficie del metal. Los valores de R_{tc} fueron usados para calcular la EI_{EIS} con la siguiente ecuación:

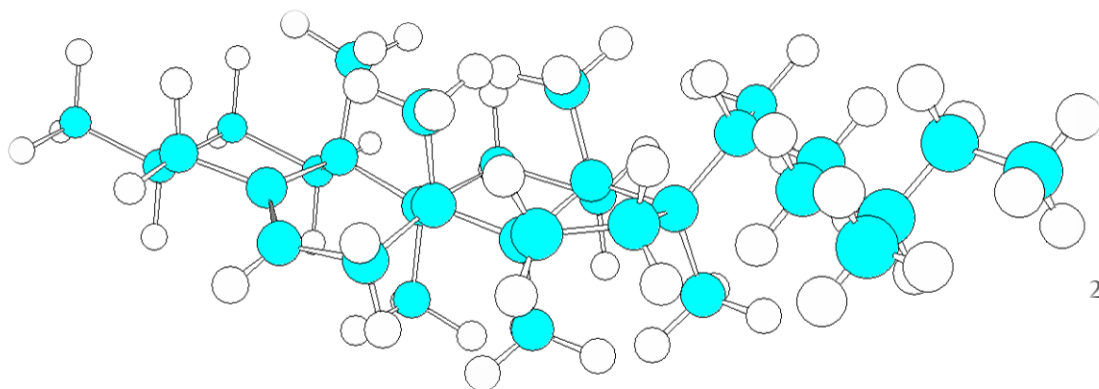
Tabla 2. Resultados electroquímicos obtenidos por EIS.

0	1.87	90.3	3.9	0.89	
10	1.58	203.9	4.7	0.83	55
25	1.33	183.5	5.3	0.82	51
50	1.41	183.0	5.0	0.83	50
100	1.08	161.1	3.6	0.95	44
200	1.41	183.4	4.8	0.83	50
300	1.27	121.7	2.8	0.92	26
400	1.24	106.2	3.0	0.93	15
500	2.06	95.6	6.8	0.97	5

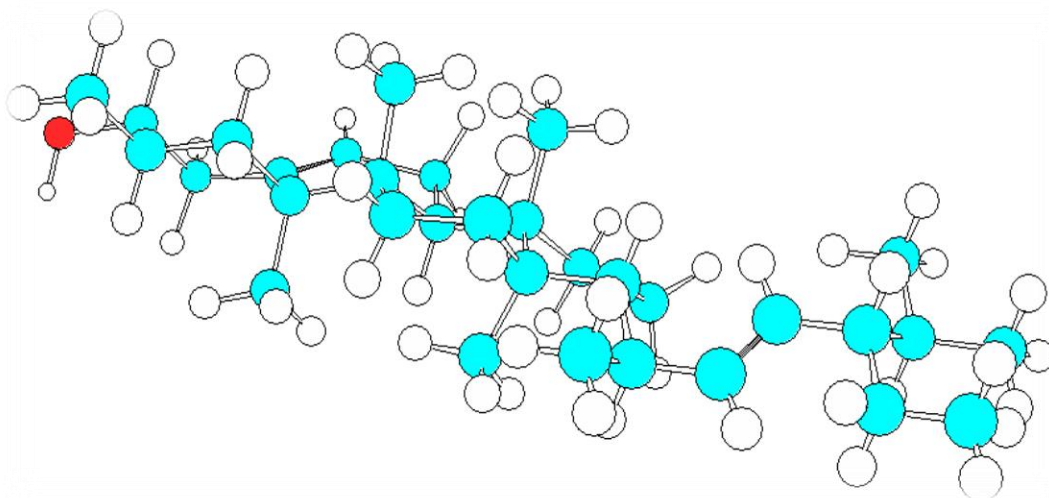
Donde $R_{TC(inh)}$, R_{TC} son la resistencia a la transferencia de carga en presencia y ausencia de inhibidor.

En la Tabla 2 se observa que en presencia de IC hay un incremento en los valores de R_{TC} , sin embargo, R_{TC} no guarda una relación directa con la concentración y la EI_{EIS} .

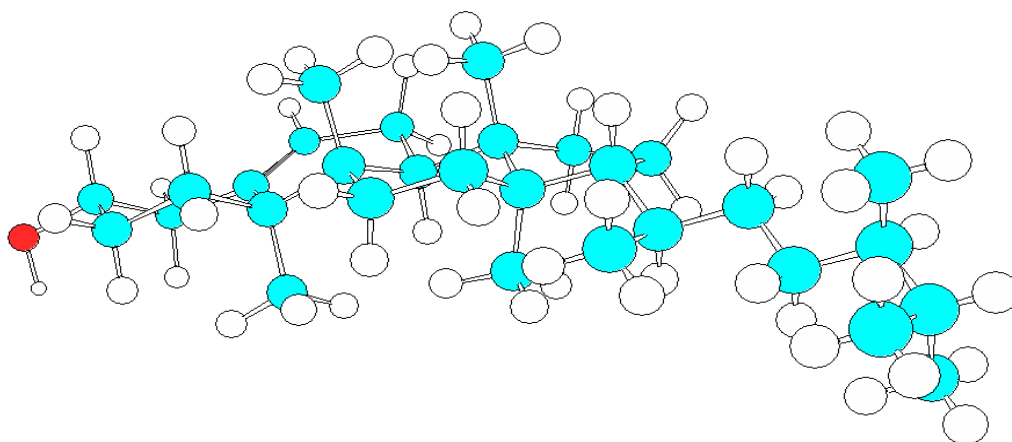
El comportamiento de la disminución de la EI_{EIS} es similar al observado por la técnica de Tafel y pérdida de peso. De acuerdo a la Figura de EIS y los resultados de EI_{EIS} se observa que a menor concentración se obtiene mayor protección de la superficie del acero. Este comportamiento esté ligado a la configuración atómica de los principales compuestos presentes en el extracto de chíá.³⁴ En condiciones reales no poseen una estructura plana, sino que poseen ángulos de orientación entre átomos que forman las moléculas Figura 22 (a)-(c).



(a) β -sitosterol



(b) Stigmasterol



(c) Campesterol

Figura 22. Estructuras de los principales compuestos presentes en el extracto de chía

Tabla 3. Compuestos identificados por cg-ms presentes en el aceite de chía.

COMPUESTOS	TIEMPO DE RETENCIÓN (MINUTOS)
Z, Z, Z - 9,12,15 - octadecatrienoico ácido	21.44
γ -tocoferol	25.71
Campesterol	29.06
Stigmasterol	29.73
β -sitosterol	31.05

Al incrementar la concentración hay una mayor cantidad de ellas en la solución, su acercamiento entre ellas, incrementa su tamaño y su volumen molecular, por lo tanto, no pueden difundirse por la capa de productos de corrosión hacia la superficie del acero a los sitios activos. Este fenómeno puede ser el responsable de una disminución en el número de moléculas adsorbidas sobre la superficie del metal e incrementado la velocidad de corrosión del acero. Se observa en la Tabla 2 que hay una disminución de CPE con la concentración, debido a que ha sido afectado el capacitor eléctrico formado por la doble capa entre la superficie del metal cargada y la solución. Efecto relacionado por la sustitución de moléculas de agua con moléculas de inhibidor, debido a que las moléculas de agua tienen una constante dieléctrica superior a la película pasiva formada en la superficie del metal. El comportamiento de CPE en presencia de extracto provee la formación de la capa protectora en la superficie del metal que bajo condiciones reales no es uniforme y homogénea como lo confirman los valores de n . El parámetro n es otro de los datos útiles que confirman una superficie rugosa/heterogeneidad. Tanto la degradación del acero en H_2SO_4 1 M y la adsorción de las moléculas en la superficie del metal pueden ser comprendidos con el parámetro n .⁴⁹ Los valores de n en la Tabla 2 tienden a incrementar con la concentración, sin embargo, la disminución del valor de n en el presente trabajo no puede ser atribuido a

una disminución de daños en la superficie del metal, más bien, a la falta de homogeneidad de la película de inhibidor en la superficie del acero. La adsorción aleatoria de las moléculas de extracto de chía hacía la superficie del metal (ambos vertical y paralela a la cara del metal) puede ser responsable de la disminución de homogeneidad superficial. En nuestro caso la no homogeneidad aumento con la concentración.

3.2 PÉRDIDA DE PESO

Además de análisis electroquímicos para calcular la eficiencia de inhibición del extracto de chía, también se realizaron pruebas de pérdida de peso. Esta técnica es ampliamente usada y aceptada en la industria, porque reporta la velocidad de corrosión real de cualquier material metálico que se encuentra expuesto a un medio corrosivo.⁵⁰ Las pruebas de pérdida de peso fueron realizadas solo a dos intervalos de tiempo, dos y ocho horas, con el objetivo de conocer la estabilidad, si la adsorción de las moléculas del extracto de chía es estable con el tiempo sobre la superficie del acero. Algunos trabajos, han reportados que muchos IC derivados de extractos de plantas, no son estables como IC en función del tiempo, debido a que su propiedad de adsorción; se vean afectadas por la acides del medio y temperatura, teniendo un efecto directo con el incremento de sitios activos.⁵¹ Las condiciones en medios ácidos favorecen a tener electrolitos fuertes, favoreciendo a la velocidad de las reacciones de óxido-reducción en la superficie del acero, es decir la velocidad de corrosión es mayor por la velocidad de disolución de acero (oxidación) y transferencia de electrones (catódica). Esto implica que muchas veces la protección de los sitios activos por moléculas de IC no es una función directa con el tiempo, como resultado la velocidad de corrosión tiende a incrementarse.

De acuerdo a lo anterior en la Figura 23 se observa que la eficiencia de inhibición es inversamente proporcional a la concentración a dos y ocho horas. La mayor *EI* fue obtenida a 10 ppm que corresponde a la menor concentración de extracto evaluada en el presente estudio. A esta concentración la *EI* a dos horas fue de 24% y a ocho de 54%. Mientras que la menor *EI* también fue obtenida a la máxima concentración de extracto (500 ppm), a dos horas fue de 3% y a ocho de 13%. De acuerdo a nuestros resultados, es interesante el comportamiento de la *EI* en función de la concentración, porque existen trabajos que

atribuyen el incremento de *EI* con la concentración, fenómeno asociado a la existencia de un mayor grado de superficie cubierta de inhibidor.⁵²En nuestro estudio se puede establecer que existe una mejor distribución de moléculas de extracto de chía a menor concentración de acuerdo a los resultados de la *EI*. Con el incremento en la concentración la orientación y adsorción de las moléculas hacia la superficie del acero es menor, indicando que el proceso de inhibición con extracto de chía se presenta por la existencia de enlaces débiles, es por ello, que la eficiencia de inhibición tiende a disminuir con la concentración. Por otro, la Figura 24 también confirma que la adsorción de las moléculas de chía y *EI* es función del tiempo, sin embargo, los resultados de *EI* son muy bajos y difícilmente, puede considerarse al extracto de chía como un buen inhibidor de corrosión de acuerdo a otros trabajos reportados donde las *EI* son superiores al 90%.⁵³

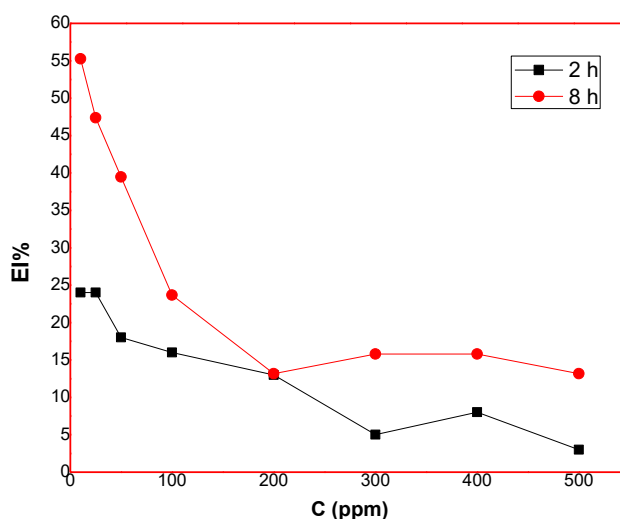


Figura 23. Eficiencia de inhibición de los testigos cúbicos de acero SAE 10108 con aceite de chía en un tiempo de 2 y 8 horas de inmersión

La Tabla 3, muestras el resumen de los resultados obtenidos por la técnica de pérdida de peso, observándose que la velocidad de corrosión V_{corr} tiende a disminuir con la concentración, por lo tanto, la velocidad de disolución del acero SAE 1018 en H_2SO_4 es menor. Adicionalmente, V_{corr} , EI %, y el grado de superficie cubierta (θ) son reportadas y fueron calculadas con la siguiente ecuación.

$$V_{corr} = \frac{KW}{AT\rho} \quad (4)$$

$$EI, \% = \frac{V_{corr}^0 - V_{IC}}{V_{corr}^0} \times 100 \quad (5)$$

$$\theta = \frac{EI\%}{100} \quad (6)$$

Donde W^1 y W^2 es la masa del electrodo al inicio y al final de la prueba, T es el tiempo de exposición del electrodo de trabajo en el medio corrosivo, ρ es la densidad del acero, K es una constante con valor de 8.76×10^4 y V_{IC} es la velocidad de corrosión sin y con IC, respectivamente.

Tabla 4. Eficiencia de inhibición de Aceite de Chía como IC en los testigos cúbicos de acero SAE 1018

C (ppm)	8 horas				2 horas	
	Peso inicial	Peso final	V_{corr} mm/años	EI %	V_{corr} mm/años	EI %
0	0.313	0.275	2.69	-	5.37	-
10	0.312	0.295	1.20	55	4.10	24
25	0.331	0.311	1.41	47	4.10	24
50	0.332	0.309	1.63	39	4.38	18
100	0.319	0.290	2.05	24	4.53	16
200	0.314	0.281	2.33	13	4.67	13
300	0.324	0.292	2.26	16	5.09	5
400	0.327	0.295	2.26	16	4.95	8
500	0.315	0.282	2.33	13	5.23	3

3.3 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

El ajuste de los datos experimentales con los diferentes modelos de isotermas de adsorción fue realizado empleando los datos de la eficiencia de inhibición obtenidos de las pruebas

electroquímicas de polarización de Tafel (Figura 24 a 27). En general el principio de las isotermas se basa en considerar que el proceso corrosivo sobre la superficie del acero es uniforme. Además, la velocidad de corrosión deberá ser igual al número de especies activas que permanecen sin bloquear, después de que ocurre la adsorción de moléculas del inhibidor. Para comprender el fenómeno de adsorción de la gran variedad de compuestos evaluados como inhibidores, se han empleado diferentes modelos de adsorción desarrollados en su forma lineal.

Isoterma Langmuir:

$$\frac{\theta}{(1-\theta)} = K_{ads} C \quad (7)$$

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C. \quad (8)$$

$$\log \frac{C}{\theta} = \log C - \log K_{ads} \quad (9)$$

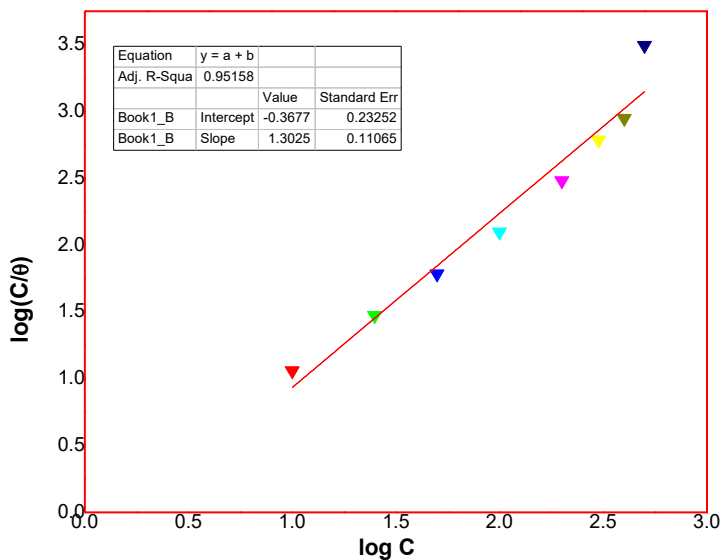


Figura 24. Ajuste del comportamiento de adsorción del aceite de chía en el metal a través de la isoterma de Langmuir

Isoterma Temkin

$$KadsC = e^{g\theta} \tag{10}$$

$$\log \frac{\theta}{C} = \log Kads + g\theta \tag{11}$$

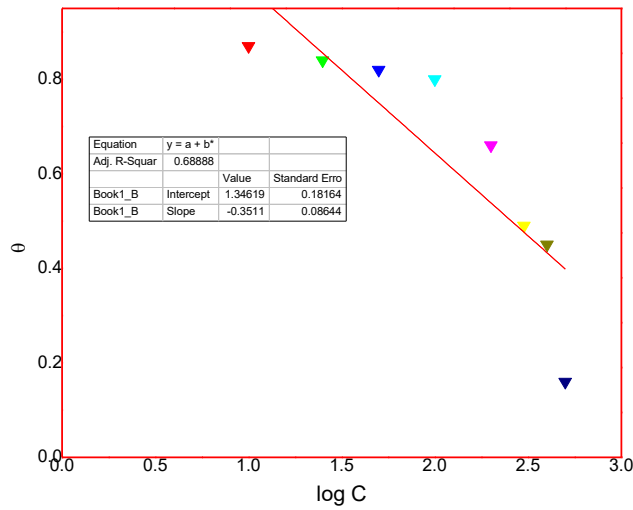


Figura 25. Ajuste del comportamiento de adsorción del aceite de chía en el metal a través de la isoterma de Temkin.

Isoterma Frumkin

$$KadsC = \left(\frac{\theta}{1-\theta}\right) e^{g\theta} \tag{12}$$

$$\log \frac{\theta}{(1-\theta)} C = \tag{13}$$

$$\log Kads + g\theta$$

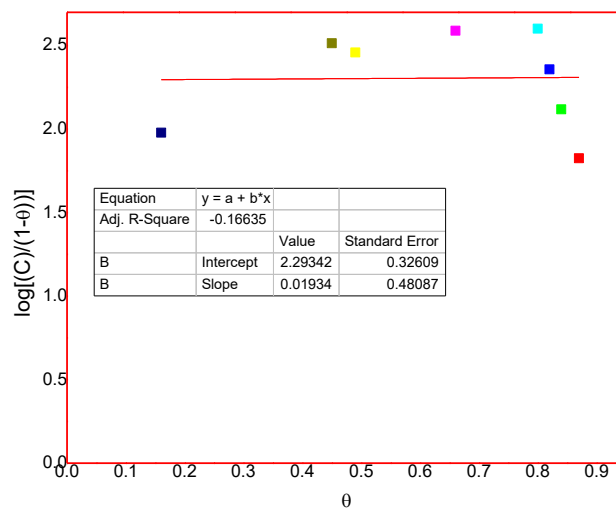


Figura 26. Ajuste del comportamiento de adsorción del aceite de chía en el metal a través de la isoterma de Frumkin.

Isoterma Flory-Huggins

$$\log\theta + \log(1 - \theta)^x = \log(Kads XC) \quad (14)$$

$$\log\theta - X\log(1 - \theta) = \log Kads X + \log C \quad (15)$$

$$\log\theta - \log C = \logKadsX + X\log(1 - \theta) \quad (16)$$

$$\log \frac{\theta}{C} = X\log(1 - \theta) + \logKads \quad (17)$$

$$K' = KadsX \quad (18)$$

$$\log k' = \logKadsX \quad (19)$$

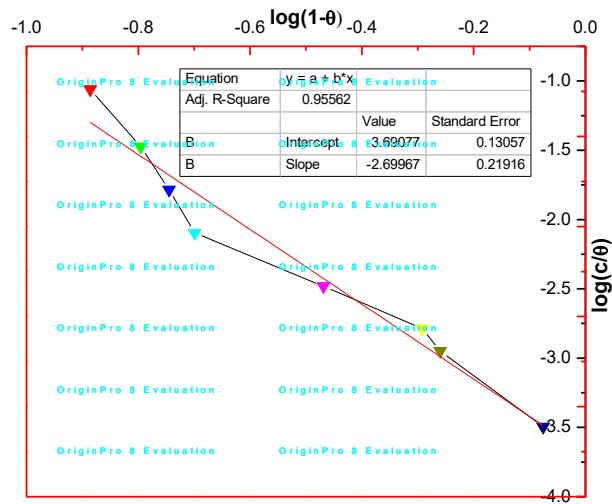


Figura 27. Ajuste del comportamiento de adsorción del aceite de chía en el metal a través de la isoterma de Flory-Huggins

donde: θ es el grado de superficie cubierta, C la concentración de IC, X es el parámetro de tamaño y es una medida del número de moléculas de agua adsorbidas sustituidos por una molécula de inhibidor dada. La Tabla 4 Muestran el ajuste de los datos experimentales con diferentes isothermas de adsorción empleadas, donde se observa que la Figura 24 que corresponde al modelo de Langmuir es la que proporciona el mejor ajuste de acuerdo al coeficiente de correlación (R^2) reportados en la Tabla 4 de la Figura 24 al graficar $\log C$ vs $\log (C/\theta)$ es factible obtener la constante de adsorción de equilibrio K_{ads} , que corresponde a la ordenada de origen, valor que es reportado la Tabla 4 Debido a que el proceso de inhibición implica un proceso de adsorción de moléculas, que bien, esta adsorción puede ser física o química, la cual ha sido relacionada con el valor de la energía libre estándar de adsorción ΔG ⁵⁴, La relación que permite determinar el valor de ΔG es la siguiente:

$$\Delta G_{ads} = -RT \ln(55.5 K_{ads}) \quad (20)$$

donde R es la constante de los gases ideales (8.314 J/mol K), T es la temperatura absoluta del medio ácido, K_{ads} es la constante de equilibrio de adsorción y 55.5 es la concentración molar de agua en disolución. El valor negativo ΔG (Tabla 4) indica que el proceso de adsorción ocurre de manera espontánea, mediante la formación de una capa adsorbida sobre la superficie del acero SAE 1018. Esto ocurre debido a que antes de la adición del inhibidor sobre la superficie del acero, las moléculas de agua se mueven aleatoriamente sobre la superficie, cuando el inhibidor es agregado las moléculas son absorbidas ordenadamente sobre la superficie del acero, ocurriendo una disminución en la entropía.⁵⁴ De acuerdo a lo anterior, se denota que el valor de ΔG es la variable más importante para comprender, el fenómeno de adsorción de las moléculas presentes en el extracto de chía, el valor obtenido fue de -7.85 kJ/mol, esto implica que las moléculas solo se adsorben de manera física, como lo confirman otros estudios realizados.⁵⁵ Donde valores

menor a -20 kJ/mol confirman enlaces muchas veces débiles de tipo de Vander Wals. Al relacionar el valor de ΔG con la EI , ahora es factible comprender porque se obtuvieron bajas EI con el extracto de Chia, principalmente porque las moléculas (Tabla 3) de acuerdo a su estructura química posiblemente no poseen alta densidad electrónica, como se ha reportada en otras moléculas en estudios complementados con cálculos de simulación molecular.⁵⁴ Además, la existencia de grandes cadenas alquílicas en las estructuras dificultan una mejor orientación a la superficie, es por ello, que con el incremento de la concentración la EI tiende a disminuir. La Figura 28 (a) y (b) representa de manera hipotética la adsorción de las moléculas inhibidor en un proceso físico sobre la superficie del acero en función de la concentración. Como se observa en la figura (b) a 500 ppm la relación $(\theta - 1)$ es mayor en comparación con (a) 10 ppm, donde esta relación es menor, debido a un mejor ordenamiento y orientación a la superficie, como resultado una mayor eficiencia de inhibición es obtenida a menor concentración.

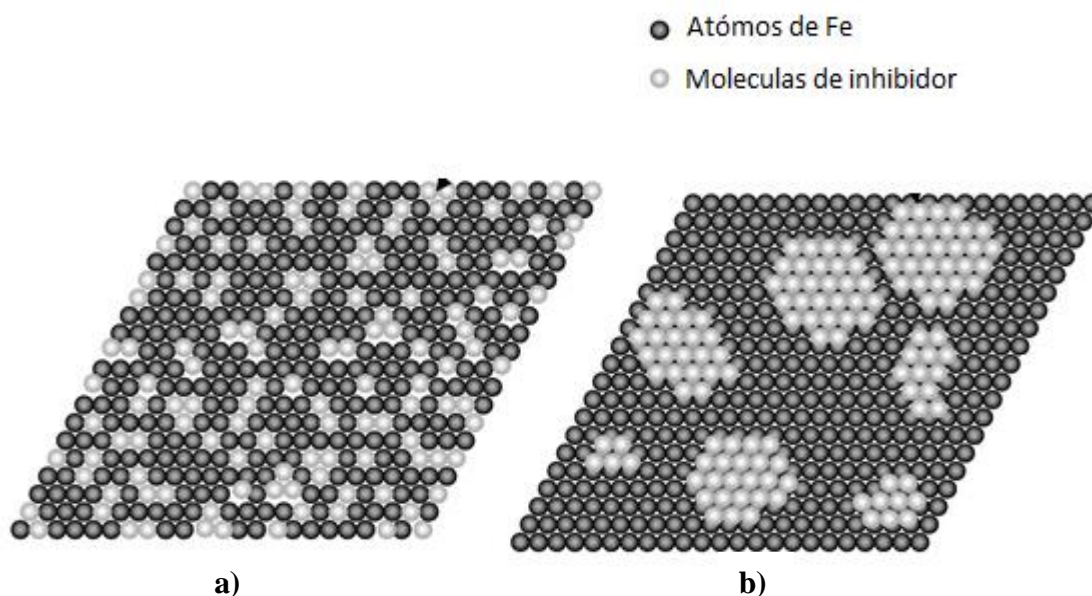


Figura 28. En esta imagen se muestra la concentración de inhibidor en una superficie metálica. a) 10 ppm donde el inhibidor tiene una mejor distribución b) 500 ppm menor ordenamiento de las moléculas del inhibidor.

Tabla 5. Valores de la energía libre de adsorción estándar para la adsorción del aceite de chía evaluado sobre el acero SAE 1018

$T(K)$	R^2	$\log k$	$\Delta G_{ads}(KJ/mol)$
298.15	0.9585	0.3677	-7.85454549

3.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Para cuantificar el daño superficial del acero se realizaron análisis de microscopía electrónica de barrido (MEB) de los testigos metálicos. Para tener una visión clara del daño superficial todas las superficies que fueron atacadas, fueron sometidas a un proceso de disolución de los productos de corrosión, es por ello, que se omiten los análisis EDS. Los análisis de SEM fueron desarrollados a amplificación 1000X, 1500x y 2000x, sin embargo, solo se reportan a 1000X. En la Figura 29 se observa la superficie del acero que fue expuesta al medio corrosivo de H_2SO_4 1 M, sin la presencia de inhibidor. La superficie presenta el tipo de corrosión uniforme que se confirma por la pérdida de masa de manera uniforme en el acero.

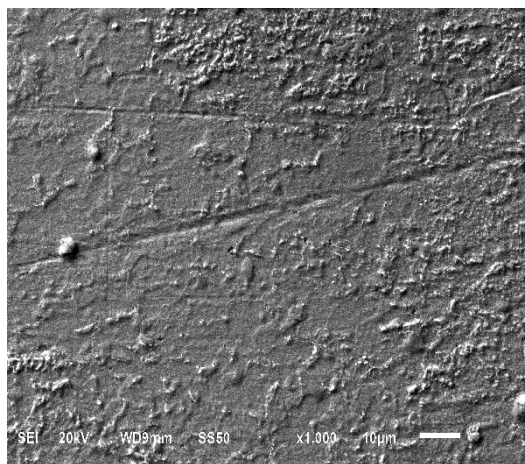


Figura 29. Análisis de MEB de la superficie del acero SAE 1018 después de 2h de inmersión en H_2SO_4 1M.

En la Figura 30 se observa la micrografía del acero en H_2SO_4 1M, en presencia de 10 ppm de aceite de chía, donde se aprecia una mayor cantidad de zonas sin daño por corrosión (x), pero debido a la baja eficiencia de inhibición también se observa disolución del acero (y) con corrosión uniforme. A 100 ppm la superficie presentó similar daño superficial (Figura31) a diferencia que se presentaron dos tipos de daños por corrosión uniforme y picadura. Estas observaciones soportan los resultados obtenidos por las técnicas de

electroquímicas y de pérdida de peso. Es decir, el extracto de chía no puede ser considerado con un posible inhibidor de corrosión de clasificación verde por la baja eficiencia de inhibición obtenidas por todas las técnicas empleadas.

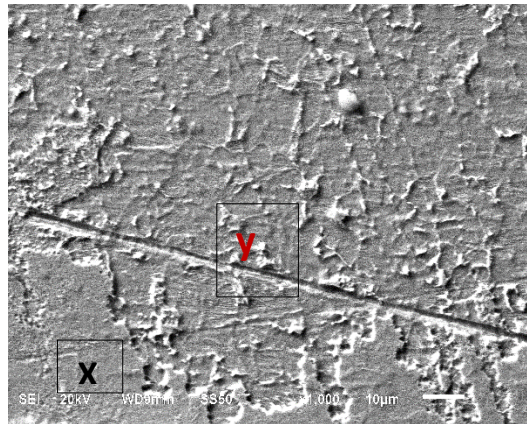


Figura 30. Análisis de MEB de la superficie del acero SAE 1018 después de 2h de inmersión en H₂SO₄ 1M a 10 ppm de aceite de chía

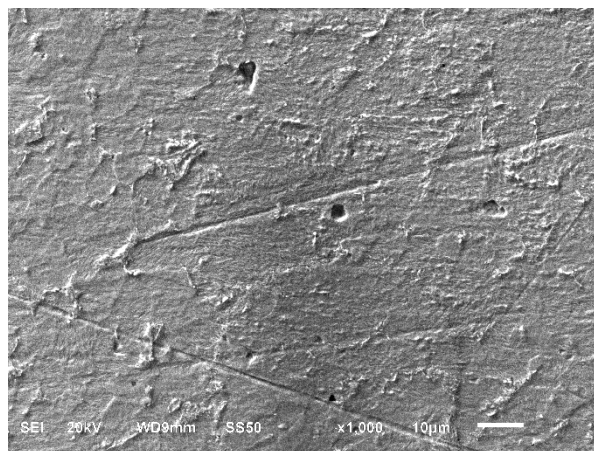


Figura 31. Análisis de MEB de la superficie del acero SAE 1018 después de 2h de inmersión en H₂SO₄ 1M a 100ppm

CONCLUSIONES

-Las pruebas electroquímicas de polarización de Tafel mostraron que la intensidad de corriente incrementa con la concentración, es decir la adsorción de moléculas del extracto de chía es inversamente proporcional a la concentración de extracto en el medio corrosivo, debido a la posición que presentan las curvas potenciodinámicas.

-Para análisis EIS del extracto de chía como inhibidor de la corrosión se introdujo un modelo de circuito equivalente (CEQ) para interpretar el significado físico de los espectros de EIS obtenidos en el estudio donde se indica que sólo existe un proceso de transferencia de carga durante la disolución del acero. Se observó que a menor concentración se obtiene mayor protección en la superficie del acero, este comportamiento está ligado a la configuración atómica de los principales compuestos presentes en el extracto de chía.

-Los resultados por pérdida de peso confirmaron el comportamiento de la eficiencia de inhibición observados por las técnicas electroquímicas. Pero además la eficiencia de inhibición fue inversamente proporcional a la concentración a dos y ocho horas. La mayor *EI* fue obtenida a 10 ppm que corresponde a la menor concentración de extracto evaluada en el presente estudio. Con el incremento en la concentración de IC la orientación y adsorción de las moléculas hacia la superficie del acero es menor, indicando que el proceso de inhibición con extracto de chía se presenta por la existencia de enlaces débiles, es por ello, que la eficiencia de inhibición tiende a disminuir con la concentración.

- La adsorción aceite de chía sobre la superficie del acero SAE 1018 en H_2SO_4 1.0 M fue descrita mediante la isoterma de Langmuir. Los valores de la constante de equilibrio de adsorción (K_{ads}) y la energía libre de adsorción ($\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$) indicaron un proceso espontáneo de adsorción física.

- Los análisis de la superficie por MEB soporto los resultados obtenidos por las técnicas de electroquímicas y de pérdida de peso. Es decir, el extracto de chía no puede ser considerado como un posible inhibidor de corrosión de clasificación verde por la baja eficiencia de inhibición obtenida por todas las técnicas empleadas. Sin embargo, el aceite es el 30% de la composición de la semilla de chía, habría que explorar la posibilidad su extracción con solventes polares como metanol y etanol, para obtener compuestos con una mayor eficiencia en estos procesos de inhibición.

REFERENCIAS

- 1.-Abdel-Gaber, A.M., Abd-El-Nabey, B.A., Sidahmed, I.M., El-Zayady, A.M. y M. Saadawy. Inhibitive action of some plant extracts on the corrosion of steel in acidic media. *Corros. Sci*, 48 (2006) 2765–2779.
- 2.-Badiea, A. y Mohana, K. Corrosion Mechanism of Low-Carbon Steel in Industrial. *J. Mater. Eng.Perform.*, 18 (2009) 1264.
- 3.- W. Revie, H.H. Uhlig, Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering, *Wiley-Intersci*. 2 (2008) 537.
- 4.-J. Wiley & Sons, Sastri vs Green Corrosion Inhibitors, Theory and Practice, Hoboken, NJ, (1998).
- 5.- M.S. Vukasovich, A Glossary of Corrosion-Related Terms Used in Science and Industry, *SAE International*, (1995).
- 6.-H.A. Videla, R.C. Salvarezza, Introducción a la corrosión microbológica, Biblioteca Mosaico, Librería Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina, (1984).
- 7.-E.E. Oguzie, Evaluation of the inhibitive effect of some plant extracts on the acid corrosion of mild steel, *Corros. Sci*. 50 (2008) 2993–2998.
- 8.-Umhau J.C. and Dauphinais K.M., Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids and Health, Low-Cost Approaches to Promote Physical and Mental Health, , DOI: 10.1007/0-387-36899-X_4. 2 (2007) 87- 101.
- 9.- Taylor and Francis Group, Corrosion Mechanisms in Theory and Practice, *Ed. P. Marcus P*. 3ra. Edición, 2 (2012) 885-889.
- 10.Cruz Islas E. “Evaluación del Recubrimiento Metálico Zn-Al mediante Espectroscopia de Impedancia Electroquímica y Difracción de Rayos x” Tesis de Licenciatura, Poza Rica de Hidalgo Ver. (2002) 9-12, 20-24.
- 11.- M.F., and Jones D.R.H. Engineering Materials-An Introduction to their Properties and Applications, Butterworth-Heinemann, Boston, 2ª ed ,(2000) 90-157.
- 12.-Davis, J. R. (Ed.). Corrosion: understanding the basics. *ASM International*. (2000).
- 13.-Bard AJ,Faulkner RF Electrochemical methods ,John Wiley,New York, 2ª ed (2000).

- 14.- Regina Fuchs-Godec, Gregor Zerjav, Corrosion resistance of high-level-hydrophobic layers in combination with Vitamin E –(α -tocopherol) as green inhibitor, *Corros. Sci.* 97 (2015) 7-16.
- 15.-Finšgar, M., Jackson, J. Application of corrosion inhibitors for steels in acidic media for the oil and gas. (2014).
- 16.-G. Salensky, Organic Corrosion Inhibitors, *Handbook of Coatings Additives*, ustry: A review. *Corros. Sci.*, 86 (1987) 17-41.
- 17.- Taylor and Francis Group, Corrosion Mechanisms in Theory and Practice, *Ed. P. Marcus P.* 3ra. Edición, 2, 885, (2012) 395-419.
- 18.- D. Cabrera, Efecto del flujo turbulento en la corrosión de soldaduras de aceros de alta Resistencia, Tesis Universidad Veracruzana, Veracruz, (2013).
- 19.- Adewuyi, A., Göpfert, A., Wolff, T. Succinyl amide gemini surfactant from *Adenopus breviflorus* seed oil: A potential corrosion inhibitor of mild steel in acidic medium. *Industrial Crops and Products*, 52 (2014) 439-449.
- 20.-Yaro, A., Khadom, A., Wael, R. Apricot juice as green corrosion inhibitor of mild steel in phosphoric acid. *Alexandria Eng. J.* 52 (2013) 129-135.
- 21.-El Bribri, A., Tabyaoui, M., Tabyaoui, B., El Attari, H., Bentiss, F. The use of *Euphorbia falcate* extract as eco-friendly corrosion inhibitor of carbon steel in hydrochloric acid solution. *Mater Chem Phys*, 141 (2013) 240-247.
- 22.- Kamal, C., Sethuraman, M. *Spirulina platensis* – A novel green inhibitor for acid corrosion of mild steel. *Arab J Chem*, 5 (2012) 155-16.
- 23.-Abdel-Gaber, A.M., Abd-El-Nabey, B.A., Sidahmed, I.M., El-Zayady, A.M. y M. Saadawy. Inhibitive action of some plant extracts on the corrosion of steel in acidic media. *Corros Sci*, 48 (2006) 2765–2779.
- 24.-Nahle, A., Abu, I., Abdel, I., Al-Khayat, M. UAE Neem Extract as a Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in HCl Solution, <http://dx.doi.org/10.1155/2010/460154>. *Int J Corros.*
- 25.-Eddy, N., Ebenso, E. Corrosion inhibition and adsorption properties of ethanol extract of *Gongronema latifolium* on mild steel in H₂SO₄. *Pigm Resin Technol*, 39 (2010) 77–83.
- 26.-Chevalier, M., Robert, F., Amusant, N., Traisnel, M., Roos, C., Lebrini, M. Enhanced corrosion resistance of mild steel in 1 M hydrochloric acid solution by alkaloids extract

from *Aniba rosaeodora* plant: Electrochemical, phytochemical and XPS studies. *Electrochim. Acta*, 131 (2014) 96-105.

27.-Badiea, A. y Mohana, K. Corrosion Mechanism of Low-Carbon Steel in Industrial. *J. Mater Eng Perform* 18 (2009) 1264-1271.

28.- Eddy, N., Odoemelam, S, Inhibition of corrosion of mild steel in acidic medium using ethanol extract of Aloe vera. *Pigm Resin Technol* 38 (2009) 111–115.

29.- E. Khamis, N. Al-Andis, “Herbs as New Type of Green Inhibitors for Acidic Corrosion of Steel”, *Materwiss. Werkstofftech.* 33 (2002) 550–554.

30.-Bouyanzer, A. y Hammouti B.A study of anti-corrosive effects of Artemisia oil on steel. *Pigm Resin Technol*, 33 (2004) 287–292.

31.-Bukasov, S. Las plantas cultivadas de Mexico, Guatemala y Colombia. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronomico Tropical de Investigación y enseñanza, CATIE-GTZ (1981).

32.-Jamboonsri, W., Phillips, T. D., Geneve, R. L., Cahill, J. P., & Hildebrand, D. F. Extending the range of an ancient crop, *Salvia hispanica* L.—a new x3 source. *Genet Resour Crop Evol*, 59 (2012) 171-178.

33.-Di Sapio, O., Bueno, M., Busilacchi, H., Quiroga, M., & Severin, C. Caracterización Morfoanatómica de Hoja, Tallo, Fruto y Semilla de *Salvia hispanica* L. (Lamiaceae). *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 11 (2012) 249-268.

34.- Alonso-Calderón A. “Characterization of Black Chia Seed (*Salvia hispanica* L) and Oil and Quantification of β -sitosterol” *INT RES J BIOL SC.* Vol. 2(1) (2013) 70-72.

35.-Ayerza (h), R. Oil content and fatty acid composition of chia (*Salvia hispanica* L.) from five northwestern locations in Argentina. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 72 (1995) 1079–1081.

36.-López Luengo, T.. Fitoesteroles y fitoestanoles, su papel en la prevención cardiovascular. *OFFARM*, vol.21 (2005) 90-94.

37.-Brown, R. (Ed).. *Handbook of polymer testing: physical methods*. CRC press, (1999).

38.-**Astm** standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals contained in vol. 03.02, (2006) 31-72.

39. Rosero-Navarro, N. C. *et al.* Electrochemical techniques for practical evaluation of corrosion inhibitor effectiveness. Performance of cerium nitrate as corrosion inhibitor for AA2024T3 alloy. *Corros. Sci.* 52 (2010) 3356–3366.

- 40.- P. Mourya, S. Banerjee, R.B. Rastogi, M.M. Singh, The inhibition of mild steel corrosion in hydrochloric and sulfuric acid media using thiosemicarbazone derivative, *Ind Eng Chem*, 52 (2013) 12733–12747.
- 41.- H.A. Videla, R.C. Salvarezza, Introducción a la corrosión microbológica, Biblioteca Mosaico, Librería Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina, (1984).
- 42.- Benítez, L. P. T., Castellar, P. J. M., Percy, E. D. A., & Bravo, M. J. B. Uso de extractos de plantas como inhibidores de corrosión. *Revista Informador Técnico*, 78 (2014) 155-164.
- 43.- J. Ávila, J. Genesca, Más allá de la herrumbre I, Ed. Fondo de Cultura Económica, Primera edición, México, (1986).
- 44.- Finšgar M., Jackson J., Application of corrosion inhibitors for steels in acidic media for the oil and gas industry: A review. *Corrosion Sci*, 86 (2014) 17-41.
- 45.- A. Popova, M. Christov, S. Raicheva, W. Sokalova; “Adsorption and inhibitive properties of benzimidazole derivatives in acid mild Steel corrosion”, *Corros. Sci.* 46 (2004) 1333-1350.
- 46.- M. Hukovic-Metikos, R. Babic, Z. Grutac; “The study of aluminium corrosion in acidic solution with nontoxic inhibitors”, *J. Appl. Electrochem.* 32 (2002) 35-41.
- 47.- F. B. Growcock, J. H. Jasinski; “Time-Resolved AC Impedance Spectroscopy of Mild Steel in Concentrated Hydrochloric Acid”, *J. Electrochem. Soc.* 136 (1989) 2310-2341.
- 48.- S. Issaadi, T. Douadi, A. Zouaoui, S. Chaafaa, M. A. Khan, G. Bouet, Novel thiophene symmetrical schiff base compounds as corrosion inhibitor for mild Steel in acidic media, *Corros. Sci.* 53 (2011) 1484-1477.
- 49.- Obot IB, Obi-Egbedi NO. Adsorption properties and inhibition of mild steel corrosion in sulphuric acid solution by ketoconazole: Experimental and theoretical investigation. *Corros Sci* , 52 (2010) 198–204
- 50.- Cortés, R., Rodríguez, R., & Capra, A. Caracterización de aceros alonizados resistentes a la corrosión utilizados en la industria del petróleo Rev. Fac. Ing. - Univ. Tarapacá , 12 (1) (2004) 43-48.
- 51- González Fernández, J. A. *Teoría Y Práctica De La Lucha Contra La Corrosión.* (1984) 413-447.

- 52.- A. Sosa Hernández, “Evaluación de extractos de plantas vegetales como inhibidores de corrosión de bajo impacto ambiental”, tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería Universidad Veracruzana campus Veracruz, abril (2008).
53. Mu, G. & Li, X. Inhibition of cold rolled steel corrosion by Tween-20 in sulfuric acid: Weight loss, electrochemical and AFM approaches. *J. Colloid Interface Sci.* 289 (2005) 184–192.
- 54.- C. Cao, On electrochemical techniques for interface inhibitor research *Int J Electrochem Sci*, 10 (2015) 5112 – 5129.