

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA INHIBIDORA DE CORROSIÓN DEL
EXTRACTO ACUOSO DE AGUACATE (*Persea americana*)**



**MARÍA JOSÉ BERROCAL BRAVO
EDGAR DAVID ALTAMIRANDA PERCY**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
CARTAGENA DE INDIAS, D.T y C.**

2013

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA INHIBIDORA DE CORROSIÓN DEL
EXTRACTO ACUOSO DE AGUACATE (*Persea americana*)**



**MARÍA JOSÉ BERROCAL BRAVO
EDGAR DAVID ALTAMIRANDA PERCY**

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

**Director de Tesis
Ing. Pedro Javier Meza Castellar**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
CARTAGENA DE INDIAS, D.T y C.**

2013

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

Cartagena de Indias D.T. y C. 9 de abril de 2013.

DEDICATORIA

Principalmente dedico este trabajo de grado a **Dios** por haberme permitido llegar hasta este punto. Gracias a su amor y fidelidad estoy recorriendo los últimos pasos para culminar mi carrera y graduarme como Ingeniera Química. Gracias Padre mío, por haberme dado esta oportunidad, todo lo que soy y lo que seré te lo debo a **Ti**.

A mis padres, **Antonio Berrocal** y **Yenny Bravo**, les dedico esta tesis con todo mi amor, gracias papi por haberme enseñado matemáticas desde pequeña y por inculcarme amor por la ciencia y el conocimiento. Millones de gracias mamita preciosa por tu apoyo, por tu amor, por tu esfuerzo y constante lucha por sacarme adelante.

A todos mis hermanos, **Toñito**, **Geka**, **Chewi** y **Davo**, gracias por haber creído en mi.

A mi **tía Luzmi**, mi segunda mamá, muchas gracias por su apoyo y consejos oportunos.

A mis sobrinos **Isabella** y **José Alejandro**, mi esfuerzo y lucha es por ustedes para brindarles un futuro mejor, los amo.

A todos mis familiares, abuelos, tíos y primos, les dedico este trabajo por ser el motor que me impulsa día a día.

A mis amigos **Helvi**, **Edgar**, **Heleine**, **Helen** y **Bosqui** les agradezco en el alma por su ayuda, consejos, por las risas, por los regaños, por las discusiones y demás. Gracias a todos, jamás los olvidaré, ustedes son parte de mi vida.

María José Berrocal Bravo

DEDICATORIA

Mi mayor dedicatoria es a Dios por ser el creador del universo, dueño de mi vida el cual me regaló la sabiduría necesaria para poder construir el sueño de mi vida.

A mis padres, Sigilfredo Altamiranda e Ibeth Percy por su perseverante apoyo espiritual y material a lo largo y ancho de mi carrera para poder cristalizar el nuevo proyecto de vida que nos permita mejorar la calidad de vida, los amo con toda mi vida.

A mí querido hermano Jesús Altamiranda, que pese a todas las peleas es un referente por transmitirme siempre que para el hombre no hay límites para crecer y reiterarme que todo lo que me proponga lo puedo alcanzar, todo depende de mí

A mis abuelitos, Salustiano Percy y Tona Alvis, quienes permanentemente me creyeron y apoyaron, orando siempre a Dios para que lograra todas mis metas y objetivos propuestos.

A mi tía Astrid Percy, mi segundad mamá, quien me ha orientado y apoyado con sus infinitas plegarias en todo momento para la realización de este proyecto que enmarca un escalón más hacia el éxito en un futuro no muy lejano, tía te amo mucho. También a mis demás familiares, abuelos, tíos, primos quienes son una parte importante de mi vida.

A nuestra Universidad por haberme dado la oportunidad de ingresar al sistema de Educación Superior y cumplir este gran sueño.

Así mismo a mis amigas Heleine, María Elvira, quienes fueron protagonistas de esta tesis, por su participación en el proyecto ya que me permitieron crecer y sentir un poco más la vida.

Edgar David Altamiranda Percy.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios, a nuestros padres y amigos. A la profesora Lesly Tejeda por sus consejos y su gran ayuda, así mismo a la profesora Gesira De Avila por sus correcciones oportunas en la redacción y creación de este documento.

A la **Universidad de Cartagena**, nuestra alma mater, por habernos formado y brindado el apoyo económico para la realización de esta tesis.

A todos nuestros profesores, directivos y secretaria, por trabajar en conjunto para brindarnos la mejor educación.

RESUMEN

Este proyecto tuvo como objetivo principal, evaluar la eficiencia del extracto de pulpa de aguacate como potencial inhibidor de corrosión del acero al carbono y aluminio, expuestos a un medio ácido (HCl 1M y 0.5 M). Para tal fin, se llevó a cabo un estudio de pérdida de peso, para determinar la velocidad de corrosión en presencia y ausencia del extracto de aguacate. En esta misma prueba, se comparó el desempeño del aguacate, con el del extracto de tabaco, utilizado a nivel industrial como inhibidor de corrosión. Los resultados obtenidos demostraron que, el extracto de aguacate, alcanzó mejores eficiencias de inhibición que el tabaco y además, obtuvo mayores porcentajes de inhibición para el acero al carbono (hasta un 98.1%) que para el aluminio. Al mismo tiempo, se realizaron pruebas fitoquímicas para determinar la composición química del extracto de aguacate y tabaco. El análisis mostró que, ambos extractos tienen altas cantidades de Taninos en su composición, siendo el extracto de aguacate el poseedor de la mayor cantidad de estos compuestos (2.01 mg/L). La presencia de taninos, se relacionó con el potencial de inhibición, ya que estos compuestos forman complejos, que se adsorben sobre la superficie metálica, dificultando la reacción de corrosión.

También, se realizaron pruebas de polarización electroquímica o curvas de Tafel, para determinar los parámetros electroquímicos de la reacción de corrosión en presencia del extracto de aguacate. Se demostró que la adición de este extracto, disminuyó la corriente de corrosión para ambos metales y así mismo, la velocidad de corrosión. Los mayores porcentajes de inhibición obtenidos fueron para el acero al carbono, 98.06%. Los resultados de esta investigación, permiten establecer que el extracto de aguacate posee un alto potencial como inhibidor de corrosión para el acero al carbono y un desempeño no tan destacable para el aluminio, bajo las condiciones de prueba y podría ser utilizado, en la industria de la prevención y control de la corrosión.

Palabras Clave: Corrosión, inhibidor, extracto de aguacate, acero al carbono, aluminio, HCl.

ABSTRACT

The inhibition effects of avocado pulp extract on the corrosion of carbon steel and aluminum in aqueous hydrochloric acid solution (0.5M HCl and 1M HCl) has been investigated. Weight loss measurement to determining the corrosion rate in the presence and absence of the avocado extract were conducted. In this test, avocado extract performance was compare with tobacco, which has been used industrially as a corrosion inhibitor. The results showed that, avocado extract achieved best inhibition efficiencies than tobacco, and also achieved higher percentages of inhibition for carbon steel (up 98.1%) than for aluminum. Simultaneously, phytochemicals tested to determinate avocado and tobacco composition were conducted. This analysis showed that both extracts contain high amounts of tannins in its composition and avocado extract has the highest concentrations of these compounds. The presence of tannins, was associated with inhibition ability because these compounds form complexes, which are adsorbed on the metal surface, preventing the corrosion reaction.

Moreover, electrochemical polarization tests or Tafel curves to determine electrochemical parameters corrosion reaction in the presence of avocado extract were conducted. It was demonstrated that the addition of this extract reduced the corrosion current for both metals and likewise, the corrosion rate. The highest percentages of inhibition were obtained for carbon steel, 98.06%. The results of this research allow establishing that the avocado extract has higher potential as a corrosion inhibitor for carbon steel than for aluminum, under the test conditions and could be used in industry prevention and corrosion control.

Key Words: Corrosion, inhibitor, avocado extract, carbon steel, aluminum, HCl.

CONTENIDO

	pág
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	19
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. MARCO DE REFERENCIA	20
2.1. ESTADO DEL ARTE	20
2.2. ANTECEDENTES	22
2.3. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	26
2.3.1. Corrosión.....	26
2.3.2. Importancia económica de la corrosión.....	27
2.3.3. El fenómeno de la corrosión.....	29
2.3.4. Tipos de corrosión.....	30
2.3.5. Corrosión electroquímica	30
2.3.6. Definición de ánodo y cátodo.....	31
2.3.7. Cinética de corrosión y corriente de intercambio.....	33
2.3.8. Estudio de la cinética de corrosión.....	41
2.3.9. Medida de la pérdida de peso	42
2.3.10. Técnicas de evaluación electroquímica.....	43
2.3.11. Medidas de polarización electroquímica (MPE).....	44
2.3.12. Inhibidores de corrosión.....	45
2.3.13. Inhibidores a partir de extractos de plantas	47
2.3.14. Generalidades y Composición del aguacate.....	50
2.3.15. El aguacate como inhibidor de corrosión.....	52
3. METODOLOGÍA	53
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	53
3.2. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE RECOLECCIÓN DE DATOS	53
3.2.1. Fuentes de información primaria.....	53

3.2.2. Fuentes de información secundarias	54
3.3. MUESTRA	54
3.4. VARIABLES.....	55
3.5. DISEÑO EXPERIMENTAL	56
3.6. PROCEDIMIENTO.....	58
3.6.1. Preparación del medio corrosivo con inhibidor.	58
3.6.2. Obtención del extracto a partir de pulpa de aguacate.....	59
3.6.3. Obtención del extracto de tabaco.	59
3.6.4. Caracterización de la pulpa de aguacate.	59
3.6.5. Prueba Pérdida de peso.	60
3.6.6. Pruebas electroquímicas	61
3.6.7. Cálculo de Eficiencia	64
4. RESULTADOS: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	65
4.1. CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA DEL EXTRACTO.....	65
4.2. PRUEBA DE PÉRDIDA DE PESO.....	66
4.2.1. Análisis de varianza ANOVA.....	74
4.3. PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS.....	77
4.3.1 Parámetros electroquímicos y Curvas de Tafel para el Acero al Carbono.....	78
4.3.2. Parámetros electroquímicos y Curvas de Tafel para el Aluminio.....	81
5. CONCLUSIONES	85
6. RECOMENDACIONES	88
REFERENCIAS.....	89
ANEXOS	98

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Unidades de velocidad de corrosión - Constante K.....	42
Tabla 2. Plantas utilizadas como inhibidores de corrosión.....	50
Tabla 3. Variables del diseño experimental.....	55
Tabla 4. Diseño Experimental.....	56
Tabla 5. Distintos experimentos que se realizaron.....	57
Tabla 6. Caracterización electroquímica de las soluciones utilizadas en estas pruebas.....	61
Tabla 7. Constituyentes fitoquímicos del Aguacate.....	65
Tabla 8. Constituyentes químicos de los extractos de aguacate y tabaco-comparativo.....	66
Tabla 9. %EF y recubrimiento de la superficie del Aluminio en HCl 0.5 M con aguacate y tabaco a diferentes concentraciones, durante 264 horas de exposición.....	70
Tabla 10. %EF y recubrimiento de la superficie del Aluminio en HCl 1 M con aguacate y tabaco a diferentes concentraciones, durante 264 horas de exposición.....	70
Tabla 11. %EF y recubrimiento de la superficie del Acero al carbono en HCl 0.5M con aguacate y tabaco a diferentes concentraciones, durante 264 horas de exposición.....	71
Tabla 12. %EF y recubrimiento de la superficie del Acero al carbono en HCl 1 M con aguacate y tabaco a diferentes concentraciones, durante 264 horas de exposición.....	71
Tabla 13. Comparativo de eficiencias de inhibición del extracto de tabaco y aguacate en Aluminio y Acero al carbono.....	72
Tabla 14. Diseño Experimental.....	74

Tabla 15.	Análisis de Varianza para la Eficiencia de Inhibición.....	75
Tabla 16.	Comparación de la investigación realizada con otras plantas en acero al carbono.....	76
Tabla 17.	Comparación de la investigación realizada con otras plantas en aluminio.....	77
Tabla 18.	Parámetros Electroquímicos de la corrosión del Acero al carbono en solución ácida de HCl 0.5M, en presencia y ausencia de extracto de aguacate.....	79
Tabla 19.	Parámetros Electroquímicos de la corrosión del Aluminio en solución ácida de HCl 0.5M, en presencia y ausencia de extracto de aguacate.....	81

LISTA DE FIGURAS

		pág
Figura 1.	Proceso de obtención de metales y su deterioro por corrosión.....	27
Figura 2.	Tipos de corrosión.....	30
Figura 3.	Celda electroquímica... ..	31
Figura 4.	Dirección del flujo de corriente entre un ánodo y un cátodo en una celda de corrosión	32
Figura 5.	Proceso de oxidación y de reducción del cobre.....	34
Figura 6.	Polarización de un sistema electroquímico.....	36
Figura 7.	Potenciales de equilibrio de Tafel.....	37
Figura 8.	Diagrama de Evans para el cobre.....	38
Figura 9.	Diagrama de Evans para el Zinc	39
Figura 10.	Diagrama de Evans para diferentes formas de ataque.....	40
Figura 11.	Gráfica de la medida de polarización electroquímica.....	45
Figura 12.	<i>Persea americana</i> (aguacate).....	51
Figura 13.	Obtención del extracto de aguacate.....	59
Figura 14.	Esquema Celda Electroquímica de 3 electrodos.....	61
Figura 15.	Montaje de Celda Electroquímica de 3 electrodos. 1. Electrodo de trabajo. 2. Electrodo de referencia. 3. Electrodo Auxiliar. 4. Electrolito. 5 Termómetro.....	62
Figura 16.	Montaje experimental para las Pruebas Electroquímicas.....	62

Figura 17.	Curvas de Pérdida de Peso vs Tiempo para el Aluminio en HCl 0.5 M en presencia y ausencia de extracto de aguacate y tabaco a diferentes concentraciones y 25°C.....	63
Figura 18.	Curvas de Pérdida de Peso vs Tiempo para el Acero al carbono en HCl 0.5 M en presencia y ausencia de extracto de aguacate y tabaco a diferentes concentraciones y 25°C.....	67
Figura 19.	Curvas de Pérdida de Peso vs Tiempo para el Acero al carbono en HCl 1M en presencia y ausencia de extracto de aguacate y tabaco a diferentes concentraciones y 25°C.....	68
Figura 20.	Curvas de Pérdida de Peso vs Tiempo para el Aluminio en HCl 1M en presencia y ausencia de extracto de aguacate y tabaco a diferentes concentraciones y 25°C.....	69
Figura 21.	Diagrama de Pareto estandarizado para la eficiencia de inhibición de la corrosión.....	75
Figura 22.	Curvas de Tafel para la corrosión del Acero al carbono en medio ácido HCl 0.5 M en presencia y ausencia de extracto de Aguacate a 27°C. Curve (7.DTA): 5% inhibidor - Curve (8 .DTA): 10% inhibidor - Curve (7.DTA): 0% inhibidor.....	80
Figura 23.	Efecto de la concentración de inhibidor sobre la velocidad de corrosión del acero al carbón en soluciones de HCl 0.5M a 27°C ...	81
Figura 24.	Curvas de Tafel para la corrosión del Aluminio en medio ácido HCl 0.5 M en presencia y ausencia de extracto de Aguacate a 27°C. Curve (10.DTA): 5% inhibidor - Curve (11 .DTA): 10% inhibidor - Curve (12.DTA): 0% inhibidor.....	83
Figura 25.	Efecto de la concentración de inhibidor sobre la velocidad de corrosión del Aluminio en soluciones de HCl 0.5M a 27°C.....	84

LISTA DE ANEXOS

	pág
Anexo A. Resultados de la prueba Fitoquímica de las muestras de extractos de aguacate y tabaco.	99
Anexo B. Pérdida de peso de los cupones de prueba durante el ensayo de pérdida de peso	99

INTRODUCCIÓN

La corrosión se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. Es un fenómeno natural en el cual el material sufre un ataque químico o electroquímico, en detrimento de sus propiedades físicas y químicas (Chaieb *et al.*, 2005; El-Rehim *et al.*, 2001).

Los problemas de la corrosión son frecuentes en la industria química, petrolífera, naval, de construcción civil, en los medios de transporte, los sistemas de comunicación, entre otros. Sin embargo los problemas más prominentes tanto económicos como ambientales y sociales, se presentan en las grandes instalaciones industriales, como centrales eléctricas o plantas de procesos químicos. Este fenómeno, genera daños en los equipos industriales que, por ejemplo, causan incendios, explosiones, liberación de productos tóxicos a la atmosfera, agua o tierra, entre otro tipo de desastres (Chen *et al.*, 2008; Restrepo *et al.*, 2009).

La National Association of Corrosion Engineers (NACE) generó un reporte acerca de las implicaciones que tiene la corrosión en la economía de algunas de las potencias mundiales como Estados Unidos, Reino Unido, Japón, China y Canadá, en el cual se afirma que los costos asociados a este fenómeno son alrededor del 2-4% del PIB de cada uno de estos países. Adicionalmente, afirma que el 25% de estos costos se pueden reducir si se adoptan medidas para el control y prevención de la corrosión (Sastri, 2011).

Una de las alternativas para controlar y prevenir este fenómeno, es el empleo de sustancias llamadas inhibidores de corrosión. Cuando están presentes en concentraciones adecuadas, en el medio corrosivo, reducen la velocidad de corrosión. Sin embargo, algunos de estos compuestos son demasiado costosos y peligrosos para los seres vivos, debido a su alta toxicidad. (Bothi y Sethuraman, 2008). Estudios han demostrado que la descarga de aguas servidas contaminadas con metales pesados que fueron utilizados como inhibidores, afectó a especies sensibles a la presencia de los

mismos en su hábitat (Rizzo, 2004). Algunos inhibidores de tipo orgánico, pueden incluso, causar daños a los riñones, al hígado y perturbar los procesos bioquímicos, así como el funcionamiento enzimático en general (Abdallah *et al.*, 2010). Por tal motivo, las agencias ambientales de los países han creado estrictas normas y reglamentos para el uso y descarga de inhibidores de corrosión.

En respuesta al tema de compatibilidad ambiental, el campo de los inhibidores está experimentando cambios dramáticos, que buscan nuevas alternativas ambientalmente amigables y de bajo costo. Entre ellas se encuentra el uso de extractos a partir de semillas, frutas, hojas, flores, etc. (Anuradha *et al.*, 2003; Abdullah, 2011; Amitha y Bhatih, 2012) que reducen notablemente la velocidad de corrosión, siendo a la vez fácilmente biodegradables.

Investigaciones previas realizadas por el grupo de investigación GIPIQ de la Universidad de Cartagena, con distintas plantas, han arrojado resultados muy promisorios. Al realizar algunas pruebas cualitativas, se halló que el fruto de la planta de Aguacate (*Persea americana*) posee un alto potencial para ser usado como inhibidor de corrosión. El extracto de esta fruta, presenta algunas ventajas como son: su bajo costo, disponibilidad en la región, facilidad de extracción, alta capacidad inhibidora demostrada con pruebas, entre otras, además, el hecho de ser un recurso renovable obtenido a partir de biomasa, lo hace atractivo para la generación de empresas de base biotecnológica.

Asimismo, el aguacate hace parte de uno de los cultivos más tradicionales en la región de los Montes de María (Redacción Agroeconómica, 2010; Figueroa, H., 2011), lo que permitiría darle un impulso a esta región estratégica de la costa Caribe que ha sido golpeada por la violencia durante mucho tiempo, al darle un alto valor agregado a través de la obtención de inhibidores de corrosión ambientalmente amigables y por tratarse de una alternativa innovadora para la producción y comercialización del aguacate.

De igual manera COLCIENCIAS ha creado el programa de Biotecnología y desarrollo sostenible de la agroindustria el cual busca la creación de industrias de alto valor agregado (Innovación), así como el programa de Química Verde cuyo objetivo es el aprovechamiento sostenible de la biodiversidad y su utilización en la industria, lo que demuestra coherencia de esta tesis con los planes de ciencia y tecnología de Colombia (CONPES, 2011).

El propósito de esta investigación es estudiar por primera vez, de forma cuantitativa, la eficiencia de inhibición del extracto de aguacate como inhibidor en la corrosión del acero al carbono y el aluminio en solución ácida, mediante la técnica de pérdida de peso y curvas de Tafel. El alcance de este estudio permitirá establecer el potencial del aguacate, como materia prima para la producción de un nuevo, eficiente y eco amigable inhibidor, para la prevención de la corrosión de metales, en la industria de procesos químicos. Este trabajo investigativo, es pertinente con el desarrollo de nuevas tecnologías para el mantenimiento de equipos y tuberías, que se desgastan y pierden su funcionalidad a causa de la corrosión producida en las plantas de procesos industriales.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia del extracto de *Persea americana* (aguacate) en la inhibición de la corrosión de acero al carbono y aluminio en medio ácido.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener el extracto a partir de pulpa *Persea americana* (aguacate) y *Nicotiana tabacum* (tabaco) que se utilizarán como inhibidores de corrosión.
- Identificar los principales grupos de compuestos químicos, que posee la pulpa aguacate y el tabaco para relacionarlos con el proceso de inhibición.
- Determinar la eficiencia de inhibición de los extractos obtenidos, estimando la velocidad de corrosión de los metales mediante pruebas de curvas de Tafel y de pérdida de peso.
- Comparar la eficiencia del extracto de aguacate, con la del extracto de tabaco (*Nicotina tabacum*) utilizado industrialmente como inhibidor de corrosión.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. ESTADO DEL ARTE

Recientemente se han desarrollado muchos estudios para conseguir alternativas ecoamigables como inhibidores de corrosión de metales en medio ácido, los extractos de plantas se han convertido en una de las más importantes, mostrando buenos resultados a la hora de probar su eficiencia de inhibición. Algunos de estos estudios se muestran a continuación:

Xianghong Li, Shuduan Deng y Hui Fu (2012), investigaron la eficiencia inhibidora de las hojas del bambú para combatir la corrosión en el acero laminado en frío, sumergido en solución ácida 1.0 – 5.0 M de HCl y 0.5-5.0 M de H₂SO₄; a través de estudios de pérdida de peso, curvas de polarización potenciodinámicas, espectroscopía de impedancia electroquímica, entre otros. Los resultados muestran que el extracto de hojas de bambú es buen inhibidor en soluciones 1.0 M de HCl y 0.5 M de de H₂SO₄ siendo mayor la inhibición en el HCL. El extracto obedece a una curva de adsorción de Langmuir y actúa como inhibidor mixto en ambos medios ácidos.

Shuduan y Xianghong (2012) por su parte, evaluaron la capacidad de inhibición del extracto de hojas secas de *Jasminum nudiflorum Lindl.* en la corrosión del aluminio en solución ácida de HCl. Concluyeron que la eficiencia de inhibición aumenta con la concentración del extracto, siendo mayor al 90% con una concentración de 1g/L. Este tipo de extracto actúa como inhibidor catódico en las pruebas realizadas por los investigadores.

Dong y colaboradores (2011) analizaron el uso de extractos acuosos a partir salvado de arroz como inhibidores de corrosión de acero al carbono en ácido clorhídrico (HCl). Los resultados muestran que el extracto de arroz presenta un buen desempeño en HCl 1 M. La eficiencia de inhibición se incrementó con el aumento de la concentración del

inhibidor y se vio afectada moderadamente por las variaciones de temperatura en el rango de 303-363 K. Las curvas de polarización mostraron que el inhibidor tuvo una acción catódica y anódica y el comportamiento de la adsorción seguido, describió la isoterma de Langmuir

Por otra parte, se investigó el jugo de durazno como un material anti-corrosivo barato, no tóxico y amigable con el ambiente, en la corrosión del acero dulce en ácido clorhídrico a diferentes temperaturas. Se realizaron estudios de pérdida de peso y polarización en un rango de temperatura de 30 a 60°C. Los resultados muestran que la eficiencia de inhibición incrementó con el aumento de la concentración del inhibidor a temperaturas de hasta 50°C, mientras que a temperaturas superiores, los valores de la eficiencia disminuyeron. El inhibidor fue adsorbido físicamente en la superficie del metal y siguió la isoterma de Langmuir. La eficiencia de la inhibición máxima fue del 91% a 50°C con una concentración del inhibidor de 50 cm³/l (Yaro et ál., 2011).

Hazwan Hussin y Jain Kassim (2011) estudiaron la inhibición de corrosión y el comportamiento de adsorción del extracto de *Uncaria gambir* en la inhibición de la corrosión del acero dulce en HCl 1M. Llevaron a cabo estudios de pérdida de peso así como técnicas de polarización potenciodinámica y espectroscopía de impedancia electroquímica. Aseguran que la presencia de catequina en el extracto reduce notablemente la velocidad de corrosión del acero al carbono en la solución ácida. Asimismo, los resultados de sus estudios afirman que el extracto se comporta como un inhibidor mixto, mostrando una eficiencia de inhibición mayor al 98% a una concentración de 1000 ppm del extracto en el medio corrosivo.

2.2. ANTECEDENTES

La utilización de extractos de plantas como inhibidores de la corrosión de diferentes metales, tanto en medio ácido ha sido ampliamente estudiada:

Eddy (2010) evaluó las eficiencias de los extractos de *Garcinia kola* y *Cola nítida* como inhibidores de corrosión del acero dulce en H_2SO_4 . Las eficiencias de los extractos fueron comparadas a diferentes concentraciones, períodos de inmersión y temperatura. Los resultados indicaron que la eficiencia del extracto de etanol de *Cola nítida* es relativamente mayor a las eficiencias obtenidas con los extractos de *Garcinia kola*. El poder de inhibición de los extractos se debe probablemente a la presencia de fenoles, alcaloides, taninos, saponinas y flavanoides en su constitución. En los estudios termométricos se halló que las energías libres de adsorción de los inhibidores sobre el acero dulce, son negativas, lo que indica que la adsorción en este sistema se dio de manera espontánea de acuerdo con la isoterma de Langmuir. La eficiencia, por último, se vio afectada al aumentar la temperatura de la solución.

Eddy y Odiongenyi (2010) estudiaron las características de inhibición y de adsorción del extracto de etanol de *Heinsia crinata* en la corrosión del acero al carbono en soluciones de H_2SO_4 . Se utilizaron técnicas de pérdida de peso, termométricas y de evolución del hidrógeno, mientras que las propiedades de adsorción fueron estudiadas mediante espectroscopia IR. La eficiencia de inhibición del extracto varió con la concentración, el período de inmersión y con la temperatura. Las propiedades inhibidoras son atribuidas a la presencia de alcaloides, saponinas, taninos, glucósidos cardíacos y antraquinona. La adsorción del inhibidor sobre la superficie del acero dulce es espontánea, exotérmica y es consistente con el mecanismo de adsorción física descrita por las isotermas de adsorción de Temkin y Frumkin.

Se encontró que el extracto de hojas de Neem es altamente eficiente para inhibir la corrosión del acero al carbón en soluciones de HCL 1M, alcanzando eficiencias de alrededor de 87% a temperatura ambiente con una concentración de 3g/L del extracto.

Incluso con la mitad de esta concentración, 1.0g/L la eficiencia de inhibición es del 80% a la misma temperatura. El porcentaje de inhibición disminuyó con la temperatura lo que indica que el mecanismo de adsorción predominante es el físico ya que la cantidad de inhibidor adsorbido disminuye con el aumento de la temperatura (Nahle et ál., 2010).

Umoren y colaboradores (2009) estudiaron la inhibición de corrosión del aluminio en una solución de HCl 0.1 M en presencia de goma a partir de *Raphia hookeri* en un rango de temperatura de 30 a 60°C, usando las técnicas de pérdida de peso y termometría. La eficiencia de inhibición aumentó proporcionalmente con la concentración y fue inversamente proporcional a la temperatura. La máxima eficiencia de inhibición observada fue de 56.30%. El efecto de inhibición de la goma de *Raphia hookeri* puede ser atribuido a la presencia de algunos constituyentes fitoquímicos que se adsorben en la superficie del metal. Se encontró que la goma obedece la isoterma de Temkin. Los parámetros termodinámicos revelan que el proceso de adsorción fue espontáneo.

Okafor y Ebenso (2007) evaluaron el efecto de las diferentes partes de la *Carica Papaya*, que incluyó: hojas, semillas, centro y corteza del tallo, como inhibidor de corrosión del acero dulce en H₂SO₄ en un intervalo de temperatura de 30°C a 60°C. La investigación demostró que la mayor eficiencia de inhibición la produjeron las hojas con un 85,8% de inhibición a 30°C. Las eficiencias incrementaron con la concentración de los extractos y disminuyeron con el aumento de la temperatura. La inhibición de la corrosión se le atribuyó a la adsorción física de los componentes fitoquímicos de los extractos en la superficie del metal, la cual describió una isoterma de Langmuir.

Sethuraman y Bothi (2005) evaluaron el potencial de inhibición del extracto de *Datura metel*, usando como medio ácido el HCl y el H₂SO₄. El procedimiento llevado a cabo consistió en agregar 5g del extracto de la planta en 200 ml de una solución que contenía HCl al 10% y de otra con H₂SO₄ al 10%, y durante un periodo aproximado de 3 horas se efectuaron los primeros estudios de carácter analítico y gravimétrico para determinar la velocidad de corrosión. Los cálculos por pérdida de peso se realizaron en intervalos de 2 horas variando la temperatura del sistema desde 303 K hasta 313 K. La inhibición de la

corrosión en el acero al carbón por *Datura metel* depende directamente de la temperatura a la cual se aplica y la dosis del inhibidor. La adsorción de *Datura metel* en la superficie del acero al carbón sigue una isoterma de Tempkin y Langmuir. La presencia de alcaloides como la escopolamina y la atropina en el extracto puede ser la razón de la actividad inhibitoria de la corrosión.

Bouyanzer y Hammouti (2004) estudiaron los efectos del aceite de artemisa en la corrosión del acero en ácido clorhídrico. El procedimiento consistió en cubrir con aceite de artemisa el acero, luego sumergirlo en ácido clorhídrico y mediante pruebas gravimétricas y de pérdida de peso, determinar la velocidad de corrosión para establecer su eficiencia. Los resultados obtenidos mostraron que el aceite de artemisa reduce la velocidad de corrosión y su eficiencia aumenta con la concentración del inhibidor. La adsorción del aceite de artemisa en la superficie del acero en presencia de ácido clorhídrico fue descrita por el modelo de Frumkin.

Chetouani y colaboradores (2004) evaluaron el aceite de jojoba en la inhibición de la corrosión del hierro en ácido clorhídrico. Se encontró que la velocidad de corrosión disminuyó significativamente en presencia del aceite y que su eficiencia de inhibición incrementó hasta llegar a 100% a una concentración de 0,515g/l, demostrando que es un excelente inhibidor de corrosión. El efecto de la temperatura en la corrosión del hierro disminuye la eficiencia del aceite. La adsorción del aceite de jojoba describe una isoterma de Frumkin. El aceite de jojoba actuó esencialmente como un inhibidor catódico sin modificar el mecanismo de evolución de hidrógeno.

En la Universidad de Benha, analizaron la eficiencia de inhibición de la corrosión del aluminio, en medio ácido, del extracto de *Opuntia*. Para ello se usaron los métodos de termometría, pérdida de peso, evolución del hidrógeno y técnicas de polarización. Se encontró que el extracto de *Opuntia* proporciona buena protección contra la corrosión tipo picadura en presencia de iones cloruro, aumenta la energía de activación de la reacción de corrosión y su eficiencia es proporcional a la concentración del extracto. La acción inhibitoria se lleva a cabo a través de la adsorción de los compuestos del extracto

en la superficie del aluminio. El proceso de adsorción es espontáneo y sigue una isoterma de adsorción de Langmuir (El-Etre, 2003).

Farooqi y colaboradores (1999) utilizaron extractos acuosos de *Concordia Latifolia* y la *Curcumina*, como inhibidores naturales de corrosión en acero al carbón y compararon su eficiencia de inhibición con la del Ácido hidroxietilideno 1-1 difosfónico (HEDP), el cual también fue mezclado con estos extractos para investigar su eficiencia de inhibición. Las plantas usadas en el estudio poseen grandes cantidades de materia resinosa permitiendo que la absorción en la superficie metálica sea inmediata, por medio de los centros activos de oxígeno presentes en el inhibidor. Los extractos estudiados fueron eficaces para reducir la corrosión del acero al carbón. Con eficiencias de inhibición del 99, 92 y 64% para el HEDP, la *Concordia latifolia* y la *Curcumina*, respectivamente. Los extractos de la *Concordia Latifolia* y la *Curcumina* son inhibidores de naturaleza mixta.

A través de la revisión bibliográfica realizada, se han presentado algunos de los estudios realizados hasta el momento, en los cuales se obtuvieron buenas eficiencias de inhibición bajo las condiciones de estudio. Sin embargo, pocas son las investigaciones que se dedicad al estudio de la fitoquímica y al proceso de adsorción del inhibidor, en aras de identificar los grupos de compuestos químicos que poseen un efecto inhibidor y la forma cómo éstos intervienen. Adicionalmente, se reportan pocos estudios que pongan a prueba la biodegradabilidad de los extractos, su almacenamiento y uso a largo plazo. Pese a ello, debido a los altos porcentajes de eficiencias encontrados, incluso mayores al 90%, los inhibidores a partir de extractos vegetales, son una tecnología emergente con gran potencial para ser utilizada en la protección de los metales contra la corrosión, aventajada por la biodegradabilidad del los extractos, su alta disposición y naturaleza inofensiva con el medio ambiente.

2.3. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.3.1. Corrosión

Para obtener metales en forma libre, a partir de los minerales que se encuentran en los yacimientos, el hombre ha creado métodos en los que se consumen grandes cantidades de energía. Esto se debe a que todos los procesos se llevan a cabo en contra de una reacción que ocurre espontáneamente. Una vez producido el metal, éste posee una alta energía y presenta una fuerte tendencia a bajarla para poder estabilizarse, reaccionando así, con el medio ambiente y volviendo a su forma original, a este fenómeno se le llama *corrosión* (Ver Figura 1) (Marulanda, 2006).

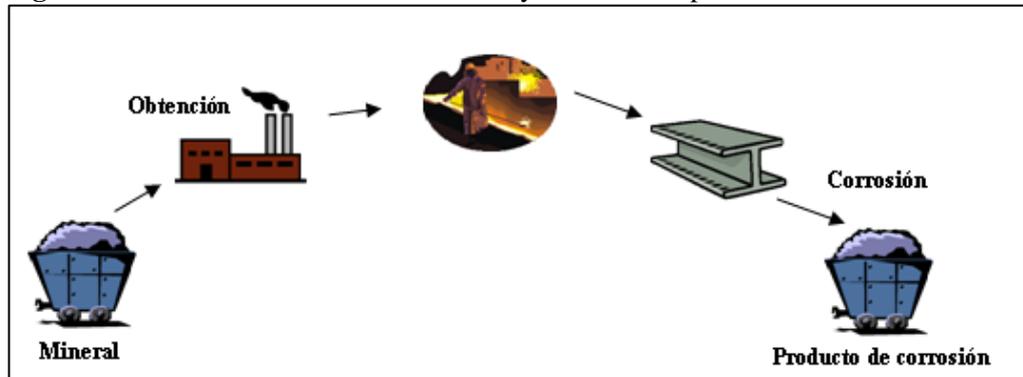
Aquellos metales que son atacados por un medio agresivo y/o se encuentran bajo la acción de esfuerzos mecánicos, pierden su funcionalidad. Por esta razón los conocimientos que se tienen en el control de la corrosión, deben ser aplicados para que el metal o aleación perdure más tiempo en servicio, sin perder sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas, por la transformación en formas combinadas como óxidos, sulfuros, etc. o en sistemas degradados que no cumplen con los requisitos de operación.

Para combatir este fenómeno, se emplean diversas técnicas de protección tales como, la alteración superficial de los metales, que consiste en crear o provocar una barrera protectora, como es el caso del anodizado. En este proceso el metal a proteger se oxida electrolíticamente, es decir, se le somete a condiciones tales, que produce una película superficial de óxido del mismo metal que posteriormente lo protegerá del medio agresivo (Kalpakjian & Schmid, 2002).

Además, un metal se puede alea o combinar con otros metales, con el fin de conseguir una aleación con mejores propiedades y una mayor resistencia a algún tipo de corrosión. Un ejemplo típico, lo constituye el acero inoxidable, en donde el hierro y el carbono, se

combinan con elementos tales como el cromo, níquel, molibdeno, entre otros, los cuales incrementan notablemente su resistencia a la oxidación (Senner, 1994).

Figura 1. Proceso de obtención de metales y su deterioro por corrosión.



Fuente: Elaborada en la presente investigación.

Otra forma, es aislar físicamente el metal del medio en que se encuentra expuesto, a través de recubrimientos como lo son las pinturas anticorrosivas y el metalizado entre otros. Debido a que los procesos de corrosión en su gran mayoría son electroquímicos, se puede alterar la velocidad de corrosión del metal, al modificar las diferencias de potencial eléctrico existentes. Las técnicas que tratan acerca de este sistema de protección metálica, se las conoce como protección anódica y catódica (Gómez & Alcaraz, 2006).

Por último, concerniente con esta tesis, existe otra técnica eficaz en la que se aplican ciertas sustancias orgánicas e inorgánicas en el medio corrosivo, que adhiriéndose a la superficie del metal, disminuyen la velocidad de corrosión, a estas sustancias se les conoce como *inhibidores de corrosión*.

2.3.2. Importancia económica de la corrosión.

El desarrollo de la industria metalúrgica, hace posible un mayor empleo de los metales, desafortunadamente, el aumento en la utilización de los productos metálicos va acompañado, de un crecimiento en el costo de la corrosión. Para tener una idea de esto,

aproximadamente un 25% de la producción anual de acero, es destruido por la corrosión (Ávila & Genescá, 2005).

La corrosión de los metales, constituye el despilfarro más grande en que incurre la civilización moderna. Por ejemplo, este fenómeno, conlleva a la rotura de tubos de escape y silenciadores de los automóviles, la sustitución de calentadores de agua, explosiones por fugas de gas en tanques de almacenamiento o tubos de conducción de combustibles, roturas en conducciones de agua, derrumbes de estructuras, entre otros. Un ejemplo común, como la reparación de la falla de un oleoducto resultante por problemas de corrosión, muestra que, adicional al costo inherente a la sustitución del tramo de tubería dañado, hay que tener en cuenta el daño ambiental causado por el aceite derramado en el ecosistema, así como el posible cese de actividades en refinería y los posibles problemas de desabastecimiento que esto puede acarrear (Gómez & Alcaraz, 2006).

Los costos directos e indirectos de la corrosión se resumen en:

- Paradas en las Plantas: el cambio de las paredes deterioradas y corroídas conlleva a parar la planta para su respectiva reparación o cambio, esto se traduce en disminuciones en la producción y ganancias de las empresas.
- Pérdida de Productos: la formación de agujeros en tanques de almacenamiento y tuberías conductoras de líquidos y gases, representan una pérdida de producto, que en algunos casos pueden tener un gran impacto ambiental.
- Pérdida de Eficiencia: la acumulación de óxidos en los intercambiadores de calor, por ejemplo, disminuye la conductividad térmica, por otro lado, en las bombas, los óxidos reducen su capacidad para impulsar fluidos.
- Contaminación: los productos de la corrosión, pueden dañar la producción de compuestos químicos en las industrias en especial la farmacéutica, además, pueden dañar recipientes que contienen elementos radioactivos, generando costosas paradas para descontaminar el ambiente.

- Sobre diseño: en ausencia de información detallada de la corrosión, se recurre al sobre diseño de las piezas para asegurar un buen tiempo de servicio, lo que conlleva a pérdidas de recursos y mayor gasto de energía para el movimiento de las partes.

Para los países de los que se disponen datos, el costo de la corrosión representa aproximadamente entre un 2 y 4% del PIB (Huu, 2004; Ahmad, 2006).

Los problemas derivados de la corrosión se pueden dividir en tres vertientes:

- Económicos (pérdidas directas e indirectas).
- Agotamiento de reservas naturales y contaminación.
- Seguridad Humana. (fallas fatales en medios de transporte, corrosión en bidones que contienen residuos radioactivos, escapes en tuberías de refrigeración de plantas nucleares, etc.).

2.3.3. El fenómeno de la corrosión

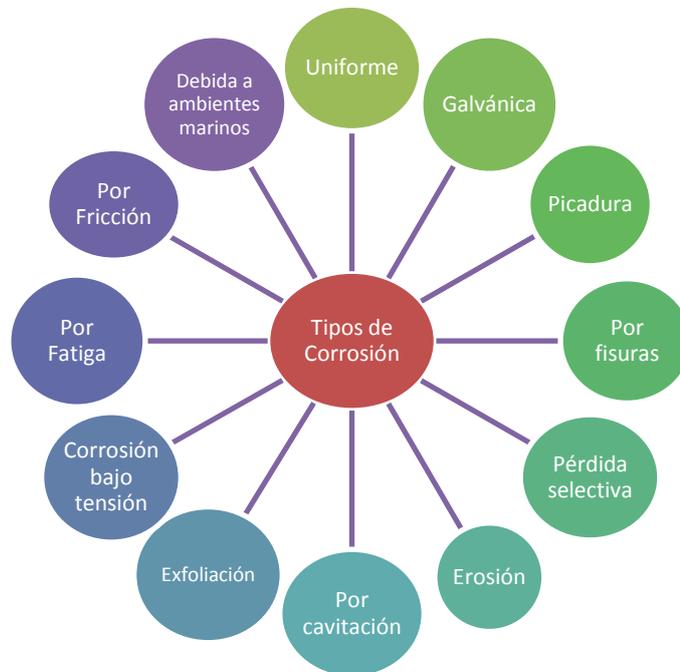
Es el resultado destructivo por una reacción química o electroquímica entre un metal o aleación y su medio ambiente, en donde los átomos metálicos pasan a compuestos químicos o minerales, ya que la corrosión es la tendencia que tienen los metales a volver al estado combinado, es decir, al mismo estado en que se encontraban en la naturaleza, que es, en términos termodinámicos, el estado estable.

La corrosión a temperaturas elevadas puede ser un proceso puramente químico, los restantes procesos de corrosión son siempre de naturaleza electroquímica, tratándose de la formación de una pila, con una corriente eléctrica que circula entre determinadas zonas de la superficie del metal, conocidas con el nombre de ánodos y cátodos y a través de una solución llamada electrolito, capaz de conducir dicha corriente. El funcionamiento de estas pilas da lugar a la corrosión de las zonas anódicas (Kelly, et ál., 2002).

2.3.4. Tipos de corrosión

Se pueden distinguir entre dos tipos básicos de corrosión: la corrosión generalizada o corrosión uniforme y la corrosión localizada. La corrosión generalizada, afecta más o menos por igual todos los puntos de la pieza. La corrosión localizada supone pérdidas pequeñas de material, pero sus consecuencias son peores, debido a que es menos previsible y su evolución es mucho menos regular. Dentro de los tipos de corrosión más comunes están (Committee research opportunities in corrosion science and engineering, 2011):

Figura 2. Tipos de corrosión



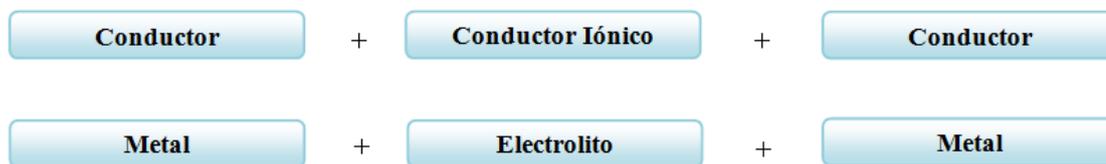
Fuente: Elaborada en la presente investigación.

2.3.5. Corrosión electroquímica

En un medio acuoso la corrosión es de naturaleza electroquímica, este es un proceso espontáneo que denota la existencia de una zona anódica (que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito, siendo imprescindible la presencia de estos tres elementos para que este tipo de corrosión pueda darse, además, se requiere de contacto

eléctrico entre la zona anódica y catódica. Por consiguiente una celda electroquímica es una combinación como sigue a continuación:

Figura 3. Celda electroquímica

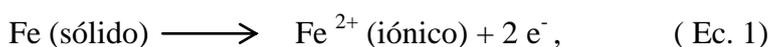


Fuente: Elaborada en la presente investigación.

En ella tienen lugar los procesos electroquímicos con el paso de una corriente eléctrica. Estas reacciones dependen tanto del metal como de la solución, esto implica que haya un intercambio de electrones en el sistema metal-solución, pudiendo disolverse parte del metal, depositarse los iones presentes en la solución en la superficie del metal y liberar gases entre otras más. Si la celda electroquímica, produce energía eléctrica, causada por el consumo de energía química, se dice que hay una celda galvánica o pila. Si por el contrario, la celda electroquímica consume corriente de una fuente de corriente externa, almacenando como consecuencia energía química, se dice que hay una celda electrolítica (Ahmad, 2006).

2.3.6. Definición de ánodo y cátodo.

El término ánodo se emplea para describir la superficie metálica en la que tiene lugar la corrosión (disolución del metal) y en la cual se liberan electrones como consecuencia del paso del metal en forma de iones, al electrolito. La reacción de oxidación que sucede en el ánodo, por ejemplo, para el caso del hierro, es:



En un conductor metálico, sólo son libres las cargas negativas o electrones. De aquí que toda la conducción de corriente en un metal se produzca por el movimiento de cargas negativas y por tanto, los electrones se mueven en sentido opuesto al convencional de la

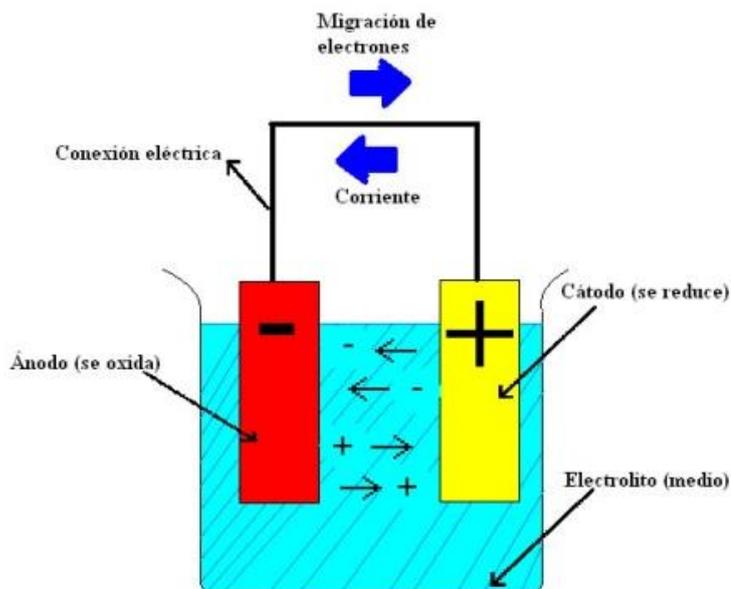
corriente, en el ánodo la corriente eléctrica sale del metal para entrar al electrolito, también la corriente eléctrica sale del electrolito para entrar al cátodo y cierra el circuito eléctrico con un conductor metálico externo.

El término cátodo se aplica a la superficie metálica en la cual los electrones producidos en el ánodo se combinan con los iones presentes en el electrolito, en otras palabras, el cátodo es el electrodo donde entra la corriente positiva proveniente del electrolito y se producen las reacciones de reducción (Bilurbina, Liesa & Iribarren, 2003).

Generalmente se toman como válidas las siguientes reglas:

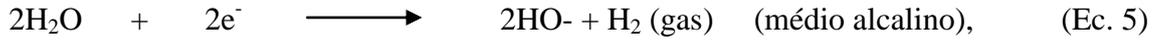
1. La reacción anódica es una oxidación y la reacción catódica una reducción.
2. Los aniones (iones negativos) migran hacia el ánodo y los cationes (iones positivos) hacia el cátodo. Se hace notar que, particularmente en una celda galvánica, la corriente positiva fluye del polo (+) al (-) en el circuito externo, mientras que dentro de la celda, la corriente positiva fluye del (-) al (+) (Ver Figura 4).

Figura 4. Dirección del flujo de corriente entre un ánodo y un cátodo en una celda de corrosión



Fuente: (Mantenimiento, 2001).

Las reacciones de reducción catódica más comunes en presencia de agua son:



El proceso de disolución de un metal en un ácido es igualmente un proceso electroquímico y la infinidad de burbujas que aparecen sobre la superficie metálica corresponden a la formación de infinitos cátodos donde se produce (H_2), mientras en los ánodos se va disolviendo el metal. A simple vista, es imposible distinguir entre una zona catódica y una anódica, dada la naturaleza microscópica de las mismas (micropilas galvánicas). Al cambiar continuamente de posición, estas zonas anódicas y catódicas, llega un momento en el que el metal se disuelve continuamente (Kelly *et al.*, 2002).

2.3.7. Cinética de corrosión y corriente de intercambio.

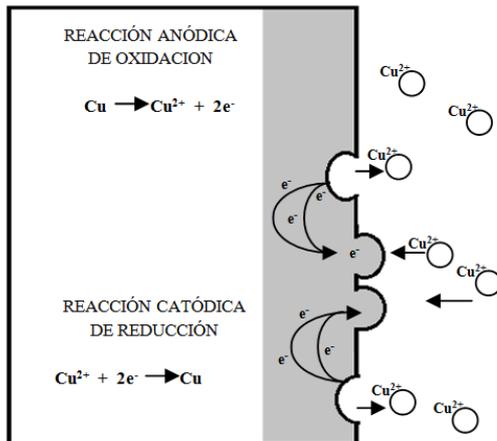
La cinética estudia la velocidad con que ocurre un proceso de corrosión, es decir, la cantidad de metal por unidad de tiempo que se está disolviendo en un medio dado. Está demostrado que la corrosión es termodinámicamente posible para muchas condiciones ambientales, por tanto, es más importante saber que tan rápido se corroe el metal en un medio dado.

Cuando el cobre, por ejemplo, está sumergido en una solución que contiene iones de cobre y la solución no contiene oxígeno disuelto, el cobre no se corroerá. Esto se debe fundamentalmente a que el cobre es mucho más noble que la reacción de desprendimiento de hidrógeno, según lo indica el cuadro de la fuerza electromotriz, que puede hallarse en la literatura relacionada con la corrosión, $E_{\text{Cu}} > E_{\text{H}}$, aparte del hidrógeno iónico no existe otro reactivo más catódico en el medio, por lo tanto decimos que el cobre establece un equilibrio del tipo (Pinilla, Bastidas & Mora, 2006):



La pieza de cobre no se corroe cuando está en contacto con una disolución de sus propios iones, debido a que no hay transformación química neta. Sin embargo, aun cuando el sistema se encuentre en equilibrio, este no es estático sino dinámico. En el potencial E^0 , existen reacciones de oxidación por las cuales se disuelve el cobre y también reacciones de reducción en donde el cobre en solución se deposita como metal. Estas reacciones ocurren de continuo y simultáneamente, siendo iguales en la magnitud de la carga transferida, aunque en sentido contrario. La velocidad con que se disuelve el cobre de la pieza es igual a la velocidad con que el cobre en solución se deposita. En resumen, en el equilibrio dinámico E^0 , no existe flujo de electrones, por lo tanto, no hay transformación química neta (Ver Figura 5).

Figura 5. Proceso de oxidación y de reducción del cobre.



Fuente: (Gómez & Alcaraz, 2006)

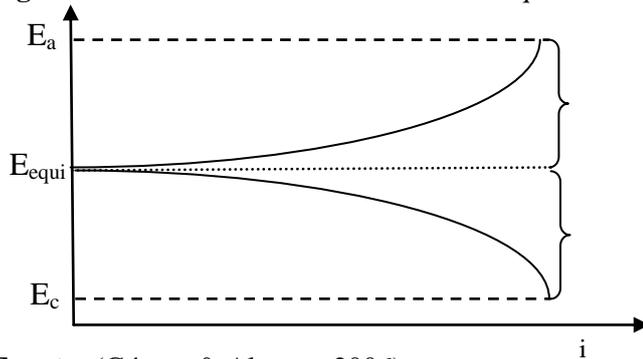
En electroquímica, a este flujo de electrones generados en la reacción de disolución (oxidación), el cual es igual al flujo de electrones consumidos en la reacción de reducción, se le llama densidad de corriente de intercambio i_0 ($\mu\text{A}/\text{cm}$), siendo una característica de un metal en equilibrio. Cada interfase tendrá una i_0 característica y su magnitud refleja la facilidad que posee esa interfase metal/solución para soltar y aceptar electrones. En las mismas interfases electroquímicas, se tiene que, a mayor i_0 , mayor facilidad de transferencia de carga y viceversa.

Cada interfase posee una i_0 específica, cuya magnitud proviene de consideraciones cinéticas, tales como arreglos atómicos, enlaces electrónicos, etc. Como las velocidades de oxidación y de reducción son iguales en magnitud pero de signo opuesto, no habrá un flujo de electrones neto y por lo tanto, será imposible medir la i_0 en un instrumento. Si la corriente anódica (de oxidación) se representa por \vec{i} y la corriente catódica (de reducción) como \vec{i} en el equilibrio:

$$i_0 = \vec{i}_a = \vec{i}_c \quad (\text{Ec.7})$$

Cualquier desviación que haya de la condición de equilibrio, desplazará el potencial del electrodo y entonces modificará las magnitudes de las velocidades anódicas y catódicas, produciéndose un flujo neto de electrones, como se observa en la Figura 6. Suponiendo que la pieza de cobre, inicialmente en equilibrio con sus propios iones, se conecta a una lámina de platino sumergida en el mismo electrolito a través de una fuente. Si se asume que al manipular la fuente se puede establecer una diferencia de potencial entre el cobre y el platino que haga fluir electrones entre estos metales, entonces se estarán modificando las condiciones de equilibrio reinantes en cada una de las interfases del cobre y del platino. La diferencia de potencial impuesta por la fuente, propicia que el cobre se disuelva, actuando como ánodo y pasando a la solución en forma de iones Cu^{2+} . Habrá entonces un flujo de electrones generados que viajarán hacia el platino (cátodo) a través de las conexiones eléctricas. El flujo de electrones propicia que los potenciales de equilibrio de cada una de las fases se desvíen de su valor inicial. Esto es lo que precisamente significa el término de polarización, el desplazamiento de un potencial de equilibrio hacia otro valor por medio de un flujo de corriente eléctrica (Gómez & Alcaraz, 2006).

Figura 6. Polarización de un sistema electroquímico.



Fuente: (Gómez & Alcaraz, 2006)

En la interfase cobre-solución aparece un incremento en la velocidad de oxidación del cobre, aunque las reacciones de reducción en esa interfase aun existen, ahora son comparativamente más pequeñas que las de oxidación, debido a que han desaparecido las condiciones de equilibrio, para dar paso a una situación de no-equilibrio. En la lámina de cobre, la magnitud de la corriente indicará la velocidad de oxidación, que excedió a la reducción. Es decir, dará una indicación de la corriente neta del proceso. La velocidad neta del proceso de oxidación estará dada por:

$$i_{a(neta)} = \vec{i}_c - \vec{i}_a, \quad (\text{Ec. 8})$$

A principios de este siglo, Tafel halló en forma experimental que el flujo neto de corriente variaba linealmente con la magnitud de la desviación que tiene el potencial de equilibrio, η , a través de la relación:

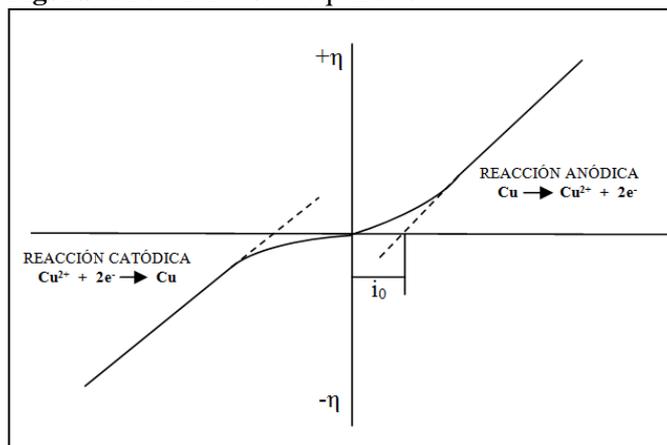
$$\eta = a + b \log i_{neta}, \quad (\text{Ec. 9})$$

Que es una ecuación análoga a la de una recta, donde η es el sobrepotencial, i_{neta} es el flujo de corriente en la interfase, a y b son constantes características de cada interfase electroquímica y de mucha importancia en el análisis cinético de los procesos de corrosión.

Cuando la desviación del potencial de equilibrio es positiva ($+\eta$) corresponde al proceso anódico y el metal se oxida o se disuelve, porque, en la polarización anódica, los electrones son removidos del metal y causan una deficiencia de electrones, lo que conlleva al cambio positivo del potencial gracias a la liberación de estos electrones. Si la desviación es negativa ($-\eta$), el potencial aplicado toma valores más negativos que el de equilibrio, ya que los electrones son entregados en esta superficie y el proceso es catódico, habiendo reacciones de reducción en la interfase metal/medio electrolito.

La Figura 7 representa gráficamente la relación de η contra $\log i$ para la reacción anódica de disolución metálica de la pieza de cobre considerada de ejemplo, cuando su potencial de equilibrio sufre una desviación en la dirección positiva ($+\eta$). Se observa que al incrementar la desviación en la dirección anódica, se estimula la velocidad de disolución de Cu ($\log i$). En la misma figura se aprecia la conducta que sucedería en el caso que la lámina de cobre hubiera sido alejada del equilibrio, pero ahora en la dirección negativa o catódica ($-\eta$) (cuadrante interior izquierdo). Esto se realizaría simplemente cambiando la polaridad de las conexiones de la fuente. En la reacción catódica que se efectuaría, sería predominante la deposición de cobre como se indica. Ambos procesos giran alrededor del potencial de equilibrio (Ávila & Genescá, 2005).

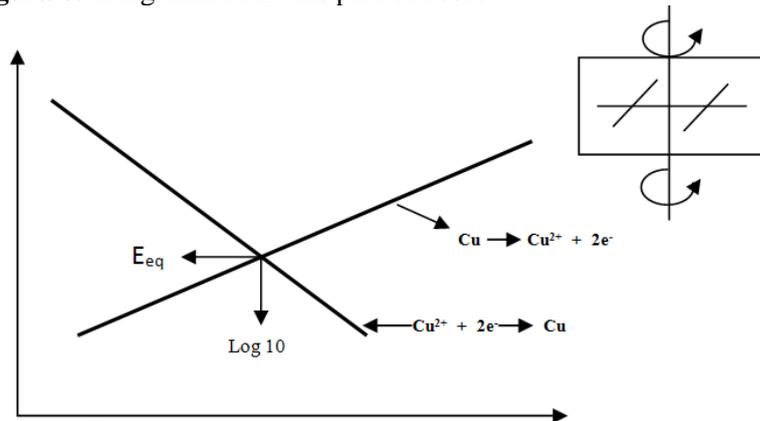
Figura 7. Potenciales de equilibrio de Tafel.



Fuente: (Ávila & Genescá, 2005).

Algunas veces es difícil interpretar esta figura, especialmente cuando se trata con la magnitud de i_0 . Una manera más familiar y también más fácil de ver esta misma relación, es como se presenta en la siguiente figura. Esta relación se obtiene al doblar el lado izquierdo sobre el derecho. A este tipo de diagramas se les conoce con el nombre de Diagramas de Evans.

Figura 8. Diagrama de Evans para el cobre.



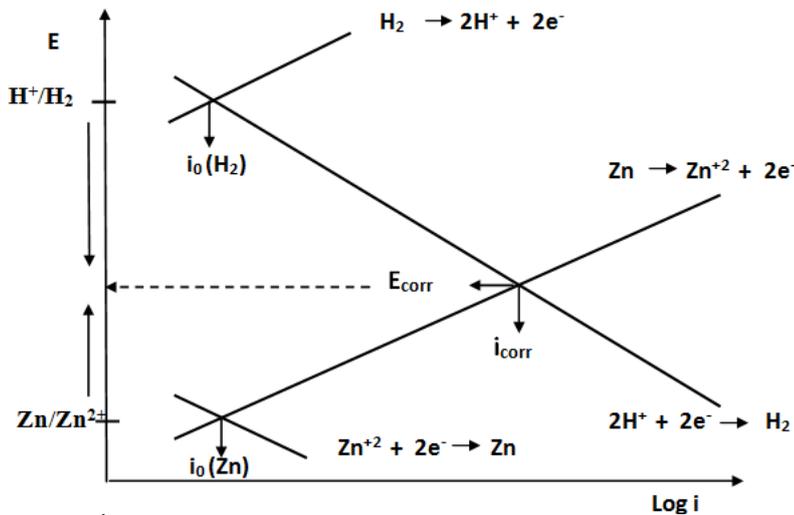
Fuente: (Ávila & Genescá, 2005).

En contraste al caso del cobre, cuando un pedazo de zinc se pone en una solución acuosa desaireada de sus propios iones, éste se corroe. Esto es debido a que el desprendimiento de hidrógeno es termodinámicamente posible ($E_{Zn} < E_H$). Entonces en la superficie del zinc, se establecen de inmediato zonas anódicas y catódicas las cuales desarrollan entre sí diferencias de potencial, acarreado como consecuencia de ello, el proceso de corrosión. Así es que los dos sistemas electroquímicos presentes, uno basado en el equilibrio Zn/Zn^{2+} y el otro en el equilibrio, buscan inicialmente un equilibrio sobre la misma superficie del metal. Sin embargo la corrosión que ocurre lo impide.

Por un lado el zinc se disuelve y por otro el hidrógeno gaseoso se desprende de zonas metálicas que funcionan como cátodos. Al haber corrosión, hay flujo de corriente y por tanto ninguno de los sistemas electroquímicos está en equilibrio. De ahí se desprende que ambos sistemas se desvíen de sus potenciales de equilibrio (se polarizan) y alcanzan un potencial común de electrodo en donde sucede que la corriente anódica de disolución (la velocidad con que se corroe el zinc) es igual a la corriente catódica (la velocidad con

que se desprende hidrógeno), lo anterior evita una acumulación de cargas en las zonas catódicas o anódicas. El diagrama de Evans de la siguiente figura muestra el análisis del proceso.

Figura 9. Diagrama de Evans para el Zinc.



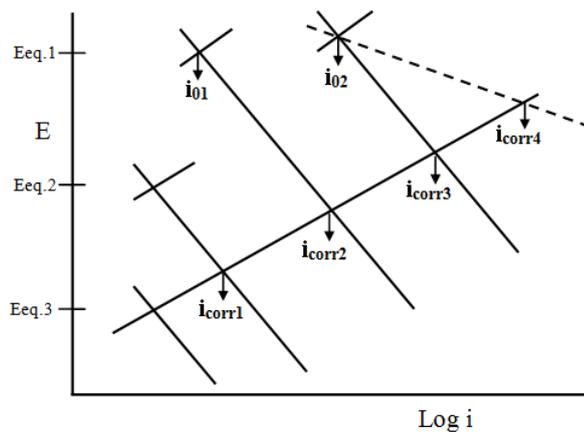
Fuente: (Ávila & Genescá, 2005).

El potencial uniforme al que se llega sobre la superficie metálica se llama el potencial de corrosión (E_{corr}). La velocidad de corrosión está dada por (i_{corr}), la cual puede ser convertida a pérdida de peso usando las leyes de Faraday. Como ya se había mencionado, durante el proceso de corrosión de un metal se llevan a cabo simultáneamente reacciones anódicas y catódicas sobre la superficie de éste. En las zonas anódicas del metal se disuelve y en la zona catódica ocurren reacciones de reducción entre el metal y el medio. Ni las fases anódicas ni las catódicas se encuentran en su potencial de equilibrio ($E_{Zn/Zn^{2+}}$ y E_{H^+/H_2} respectivamente). Según la figura anterior ambos potenciales de equilibrio son desplazados a un valor común, el potencial de corrosión, en el cual la velocidad de oxidación del metal es igual a la velocidad de reducción del protón H^+ . Por lo general, cuando se mide el potencial de un metal sumergido en un medio agresivo, contra un electrodo de referencia, lo que realmente se mide es el potencial de corrosión mixto, E_{corr} .

La velocidad de corrosión de un proceso, i_{corr} , puede tomar diversos valores dependiendo de varios factores que modifican su magnitud destacando (Ávila & Genescá, 2005):

1. La densidad de corriente de intercambio, i_0 . La Figura 10 demuestra este punto. La densidad i_0 depende mucho de la superficie en donde se lleve a cabo. Así por ejemplo, es más fácil desprender hidrógeno sobre hierro (i_{02}) que sobre el zinc (i_{01}). La velocidad de corrosión aumentará de i_{corr2} a i_{corr3} .
2. La fuerza motriz para llevar a cabo la corrosión, es decir, la diferencia de potencial termodinámico del par galvánico. La Figura 10 muestra que mientras más grande sea la diferencia de potencial entre la reacción anódica y la catódica, mayor será la velocidad de corrosión. Para (Eq.2 - Eq.3) corresponde a una i_{corr1} . En cambio, para (Eq.1 - Eq.3) la velocidad de corrosión es i_{corr2} .

Figura 10. Diagrama de Evans para diferentes formas de ataque.



Fuente: (Ávila & Genescá, 2005).

3. Un último factor lo constituye el valor de la pendiente de Tafel, la cual evidencia la facilidad o dificultad de transferir cargas cuando una fase se aleja del equilibrio. Haciendo referencia a la Figura 10, se observa que al disminuir la magnitud de la pendiente para la reacción catódica (línea punteada), ésta se vuelve más fácil, aumentando por tanto la velocidad de corrosión de i_{corr3} a i_{corr4} .

2.3.8. Estudio de la cinética de corrosión

La cinética estudia la velocidad con que ocurre un proceso de corrosión, es decir, qué cantidad de un metal por unidad de tiempo se está disolviendo en un medio dado. Basándose en ensayos de en el laboratorio, se pueden llegar a establecer las condiciones ambientales más fielmente parecidas a la realidad y por tanto, estudiar el comportamiento de un metal o varios metales en este medio. La realización de estos ensayos en el laboratorio puede ser fácil o extraordinariamente difícil, según la naturaleza del medio estudiado.

De una manera muy general y en función del objetivo perseguido (selección de materiales, estudios de la resistencia a la corrosión, pruebas con inhibidores de corrosión o bien el mecanismo de la reacción, etc.) Los ensayos de corrosión se pueden englobar en dos grandes categorías (Ávila & Genescá, 2005):

- Ensayos acelerados realizados en el laboratorio.
- Ensayos de larga duración efectuados en los medios naturales.

Para un estudio completo de la cinética de corrosión se debe tener en cuenta que la velocidad de reacción puede ser de tipo media o instantánea. En el presente estudio, la velocidad de reacción instantánea es la de interés ya es esta la que se puede manipular aumentando o disminuyendo la concentración de un inhibidor en un momento dado. Esta velocidad de corrosión se puede determinar de dos formas:

1. Por la medida de la pérdida de peso, que corresponde a la diferencia presentada en el material al encontrarse expuesto al medio corrosivo.
2. Realización de pruebas electroquímicas.

2.3.9. Medida de la pérdida de peso

El método utilizado tradicionalmente, es el de la medida de pérdida de peso que consiste en determinar la pérdida de peso que ha experimentado un determinado metal o aleación en contacto con un medio corrosivo. Con el cálculo del área total superficial del cupón o probeta de prueba y la pérdida de masa, se obtiene la velocidad de corrosión así:

$$V_c = \frac{K * W}{A * T * D}, \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde K es la constante de corrosión, T es el tiempo de exposición en horas, A es el área en cm^2 , W es la pérdida de peso en gramos y D es la densidad del metal en g/cm^3 . La velocidad de corrosión también es calculada a través de la pendiente de las gráficas de pérdida de peso donde se grafica la pérdida de peso vs el tiempo de exposición del metal al medio corrosivo. Las unidades más frecuentes para expresar la pérdida de peso son: miligramos decímetro cuadrado día (mdd), milímetros por año (mm/año), milipulgadas por año (mpy), en la Tabla 1 se muestran las distintas unidades de velocidad de corrosión y sus constantes de corrosión, útiles a la hora de hacer cálculos (Gómez & Alcaraz, 2006).

Tabla 1. Unidades de velocidad de corrosión - Constante K.

Unidades de velocidad de corrosión	Constante de corrosión (K)
Milésimas de pulgada por año (mpy)	3.45×10^6
Pulgadas por año (ipy)	3.45×10^3
Pulgadas por mes (ipm)	2.87×10^2
Milímetros por año (mm/a)	8.76×10^4
Micrómetros por año ($\mu\text{m/a}$)	8.76×10^7
Picómetros por segundo (pm/s)	2.78×10^6
Gramos por metro cuadrado por hora ($\text{g/m}^2.\text{h}$)	$1.00 \times 10^4 D$
Miligramos por decímetro cuadrado por día (mmd)	$2.40 \times 10^6 D$
Microgramos por metro cuadrado por segundo ($\mu\text{g/m}^2.\text{s}$)	$2.78 \times 10^6 D$

(Fuente: Coatl, 2009)

2.3.10. Técnicas de evaluación electroquímica

Las medidas electroquímicas forman la base de muchas evaluaciones de corrosión en ambientes acuosos tanto en el laboratorio como en planta y en campo. Los fenómenos de corrosión implican reacciones redox que se verifican en la interfase metal/electrolito. Este tipo de procesos conlleva a un movimiento de cargas eléctricas. De esta manera el estudio de los fenómenos de corrosión puede ser abordado haciendo uso de distintas técnicas electroquímicas que permitan evaluar los parámetros eléctricos asociados a esos procesos de transporte de carga.

La mayor parte de los métodos electroquímicos para el estudio de la corrosión están basados en la perturbación controlada de una de las dos variables eléctricas fundamentales, potencial o corriente, y en la medida del valor que adquiere la otra variable como consecuencia de la alteración introducida en el sistema. Haciendo un uso de estos métodos es posible estimar la velocidad de corrosión y, además, extraer información adicional sobre otras características del sistema difíciles de obtener mediante otras técnicas experimentales.

Una simple aplicación de la ley de Faraday permite convertir la densidad de corriente de corrosión i_{corr} en la velocidad de pérdida de peso del material y en la velocidad de penetración del material en mma, mpy entre otras unidades.

Los valores de corriente de corrosión pueden ser obtenidos por celdas galvánicas y medidas de polarización, el primer paso es convertir la corriente hallada en densidad de corriente, esto se hace dividiendo la corriente hallada por el área total expuesta así (Cembrero, et ál. 2005):

$$I_{corr} = i_{corr} / A, \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde i_{corr} es la densidad de corriente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), I_{corr} es la corriente anódica total en (μA) y A es el área total expuesta del cupón.

El cálculo de la velocidad de corrosión se puede hacer en términos de penetración o pérdida de peso de la siguiente manera:

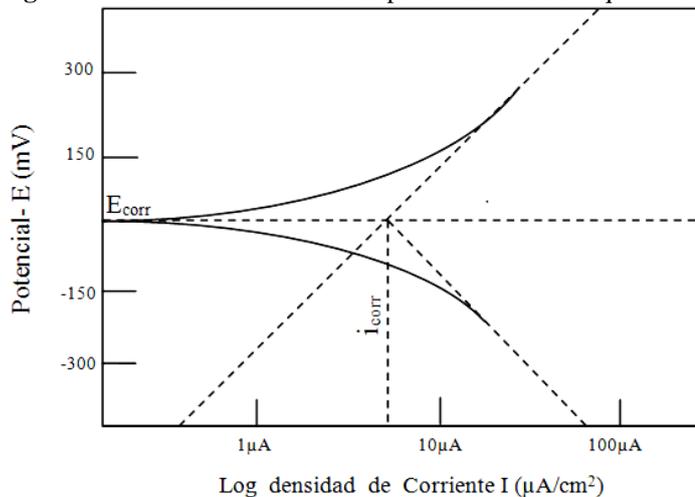
$$\text{Velocidad de corrosión} = V_c = K \times \left(\frac{i_{corr}}{\rho} \right) \times P_e, \quad (\text{Ec. 72})$$

Donde V_c es la velocidad de corrosión dada en mm/a, K_1 es la constante de corrosión, ρ es la densidad del metal y P_e es el peso equivalente en gramos del mismo (Bard & Faulkner, 1980).

2.3.11. Medidas de polarización electroquímica (MPE)

La técnica de medida de polarización electroquímica o extrapolación de Tafel, cuenta con los datos derivados de la polarización catódica y anódica, la valoración requiere de la medida de la corriente aplicada y el potencial, para establecer un diagrama de polarización. El potencial del electrodo se grafica contra el logaritmo de la corriente aplicada, las curvas anódicas y catódicas no son lineales a bajas corrientes, pero a altas corrientes, éstas se vuelven lineales con respecto al logaritmo de la corriente. Estas regiones se llaman regiones de Tafel, donde la corriente aplicada es igual a la diferencia entre la corriente del proceso de reducción y oxidación. Cuando se aplican altas densidades de corriente, la corriente se acerca a la corriente total anódica o catódica de la reacción de corrosión, las regiones de Tafel son normalmente identificadas y en la práctica el voltaje se mueve a $\pm 50\text{mV}$ desde el potencial de corrosión. La Figura 11 muestra una gráfica de polarización electroquímica.

Figura 11. Gráfica de la medida de polarización electroquímica.



Fuente: (González, (s.f.))

La determinación de la velocidad de corrosión por medio de las curvas de polarización, normalmente se hacen por extrapolación de las regiones de Tafel hacia el potencial libre de corrosión (E_{corr}). En el potencial de corrosión la velocidad de las reacciones anódicas y catódicas son iguales y la corriente de corrosión (I_{corr}) puede ser medida. Las curvas de polarización, también son usadas para investigar los mecanismos de reacción de corrosión. (Kelly, et ál., 2002).

2.3.12. Inhibidores de corrosión

Entre los diferentes métodos de prevención y control de corrosión, el uso de inhibidores de corrosión es muy popular. Los inhibidores de corrosión son sustancias que al ser agregadas en pequeñas concentraciones en el medio corrosivo, disminuyen o previenen la reacción entre el metal y el medio. Los inhibidores son agregados a sistemas de refrigeración, unidades de refinación, unidades de producción de químicos, unidades de procesamiento de petróleo y gas, calderas, etc (Bothi & Gopalakrishnan, 2008).

La eficiencia de un inhibidor de corrosión puede expresarse como una medida de disminución de la velocidad de corrosión (Roberge, 1999).

$$\text{Eficiencia de Inhibición(\%)} = \frac{V_c - V_{c_{\text{inhibidor}}}}{V_c}, \quad (\text{Ec. 83})$$

Donde v_c , es la velocidad de corrosión sin inhibidor y $v_{c_{\text{inhibidor}}}$ corresponde al sistema al que se le adiciona un inhibidor.

Los inhibidores reaccionan con la superficie metálica o con el ambiente al que está expuesta esta superficie, dándole un cierto nivel de protección. Algunos inhibidores se adsorben, protegiendo la superficie metálica mediante la formación de una película. Los inhibidores retardan el proceso de corrosión incrementando el comportamiento de la polarización anódica y catódica, reduciendo el movimiento o difusión de los iones hacia la superficie metálica, incrementando la resistencia eléctrica de la superficie metálica (Satri, 2011).

Existen distintas clases de inhibidores como los inorgánicos: sales de cromatos, fosfatos y molibdato. En este tipo de compuestos los aniones son los responsables de la reducción de la velocidad de corrosión del metal. Los inhibidores orgánicos se utilizan en sistemas de enfriamiento y comúnmente son de tipo aniónico como el mercaptobenzotiazol (MBT), sulfatos de sodio y fosfonatos (Eldredge et ál., 1948).

Los mecanismos de inhibición pueden ser muy complejos. En el caso de las aminas orgánicas por ejemplo, el inhibidor es absorbido tanto en el ánodo como en cátodo interrumpiendo la corriente de electrones. Otros inhibidores específicamente afectan los procesos catódicos o anódicos, por esta razón los inhibidores se pueden clasificar en anódicos, catódicos o mixtos (Davis, 2010).

Los inhibidores son a menudo fáciles de aplicar y ofrecen la ventaja de la aplicación *in situ*, sin causar ninguna interrupción significativa en el proceso. Sin embargo, se debe considerar: el costo y la toxicidad del inhibidor; además que sea amigable con el ambiente. El costo del inhibidor puede ser muy alto cuando el material en cuestión es caro, cuando la cantidad necesaria es enorme o tiene baja disponibilidad, la toxicidad del inhibidor, puede causar efectos dañinos a los seres humanos y otras especies (Bothi et ál., 2008).

2.3.13. Inhibidores a partir de extractos de plantas

Se han estudiado una gran cantidad de compuestos orgánicos para investigar su potencial inhibidor de la corrosión. Todos estos estudios revelan que los compuestos orgánicos, especialmente aquellos con N, S y O muestran una significativa eficiencia de inhibición. Pero desafortunadamente la mayoría de estos componentes no sólo son caros sino que también son tóxicos para los seres vivos (Ameer et ál., 2000; Gomma, 1998; Martinez y Stern, 2001; Benali et ál., 2005; Oguzie, 2004; Oguzie et ál., 2004b; Ebenso y Oguzie, 2005).

Los extractos de plantas se han convertido en una opción ambientalmente amigable, se encuentran disponibles y representan un recurso renovable para una amplia gama de inhibidores. Además de esto, son una fuente muy rica de compuestos químicos naturales que se pueden extraer por medio de procedimientos simples de bajo costo y son biodegradables por la naturaleza (Lecante et ál., 2011; Abdel et ál., 2006; Ehteram, 2009).

Los compuestos heterocíclicos han sido útiles como inhibidores de corrosión (Wang et al., 2005; Talati & Gandhi, 1983; Luo et al., 1988) y su síntesis se ha realizado continuamente. La mayoría de estos compuestos contienen nitrógeno, azufre y oxígeno con un par solitario de electrones y adicionalmente poseen sistemas aromáticos. (Bentiss et al., 1999, 2000; Emregul & Atakol, 2002; Popova & Christov, 2006; Abd EL-Rehim et al., 1999). Estos compuestos pueden actuar en la superficie metálica por medio de adsorción y allí, mediante el bloqueo de los sitios activos, pueden reducir la velocidad de corrosión (Achary et al., 2008). El N, O y S son átomos presentes en los compuestos heterocíclicos y son los sitios donde probablemente ocurre la adsorción, debido a que tienen disponible un par solitario de electrones (Oguzie, et al., 2004; Eddy, Odoemelam, & Odiongenyi, 2010).

En los extractos de plantas, se encuentran presentes un gran número de compuestos químicos, especialmente heterocíclicos, que inhiben la corrosión de manera eficiente

(Sathiyathan et al., 2005; Oladele, & Okoro, 2011). El efecto inhibitor, se atribuye a la adsorción de estas sustancias orgánicas sobre la superficie del metal, bloqueando los sitios activos o formando una capa protectora (Abdel-Gaber *et al.*, 2006; Singh, 2010; Anuradhaa, 2008). Los datos existentes demuestran que la mayoría de inhibidores orgánicos actúan por adsorción en la interfase metal / solución; mediante el desplazamiento de las moléculas de agua formando una película compacta que funciona como barrera (Abdel-Gaber *et al.*, 2006).

La adsorción necesita de la existencia de fuerzas atractivas entre el adsorbato y el metal. El principal tipo de interacción entre un inhibidor orgánico y la superficie del metal son la quimiosorción y/o fisicosorción. Se ha sugerido que las moléculas fisiadsorbidas se unen al metal en cátodos locales y la disolución de metal se retarda cuando se impide la reacción catódica; mientras que las moléculas quimiadsorbidas protegen las áreas anódicas y reducen la reactividad inherente del metal en los sitios donde están unidos (Oguzie, 2008).

La adsorción del metal 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. De hecho, la interacción específica entre los grupos funcionales, la superficie del metal y heteroátomos como el nitrógeno, oxígeno, azufre y fósforo juega un papel importante en la inhibición debido a los pares de electrones libres que poseen. Los compuestos que contienen enlaces π generalmente presentan buenas propiedades de inhibición por el suministro de electrones a través de los orbitales π (Abdullah, 2011).

Se ha reportado que los extractos de *Vernoniaamydalina* (Ekpe et al., 1994), *Cocos nucifera* (Avwiri & Igho, 2003; Abiola & Oforca, 2003) inhiben la velocidad de corrosión de los metales. Su efecto inhibitor se ha atribuido a la presencia de taninos en sus componentes químicos. Los taninos son utilizados en el tratamiento de agua de calderas, para eliminar el oxígeno y formar una película catódica, debido a sus propiedades reductoras. Los taninos, en especial, forman una capa de pasivación de tanatos sobre la superficie metálica (Avwiri y Igho, 2003; Davies, 1990). Debido a los grupos OH en la posición orto en los anillos aromáticos, estas sustancias son capaces de

formar quelatos con el hierro y otros cationes metálicos (por ejemplo, cobre) (Abiola, et al., 2007). Los grupos OH alrededor de la molécula se atraen para formar fuertes enlaces con el hidrógeno y así formar complejos con los iones metálicos. Los complejos así formados, provocan un bloqueo en los sitios de formación de micro-anodos, que se generan cuando las superficies metálicas entran en contacto con un electrolito o medio corrosivo, por lo tanto, retardan la disolución subsiguiente del metal (Amitha & Bharathi, 2011).

About y colaboradores (2004) estudiaron la aplicación de los extractos de algas marrón (*Bifurcaria bifurcata*) en la inhibición de la corrosión del acero al carbono en presencia de HCl 1 M. El proceso de inhibición lo atribuyeron a la adsorción de moléculas del inhibidor, a la precipitación de quelatos de hierro y a la formación de complejos en la superficie. La investigación confirmó que este tipo de extracto juega un papel importante en la prevención de la corrosión del acero al carbono.

Eddy y Odiongenyi (2010) estudiaron las características de inhibición y de adsorción del extracto de etanol de *Heinsia crinata* en la corrosión del acero al carbono en soluciones de H₂SO₄. Se utilizaron técnicas de pérdida de peso, termométricas y de evolución del hidrógeno, mientras que las propiedades de adsorción fueron estudiadas mediante espectroscopia IR. La eficiencia de inhibición del extracto varió con la concentración, el período de inmersión y con la temperatura. Las propiedades inhibidoras fueron atribuidas a la presencia de alcaloides, saponinas, taninos, glucósidos cardíacos y antraquinona.

La Tabla 2 muestra algunos de los estudios adelantados en el tema de inhibidores de corrosión a partir de extractos de plantas.

Tabla 2. Plantas utilizadas como inhibidores de corrosión.

País	Planta	Autor
India	Artemisa (<i>Artemisa pallaens</i>)	Kalaiselvi, <i>et al.</i> 2010
Rusia	Arroz, Trigo y Girasol.	Kharchenko, <i>et al.</i> 2008
Marruecos	Hinojo (<i>foeniculum vulgare</i>)	Lahhit, <i>et al.</i> 2011
Guayana Francesa	Cafecillo (<i>palicourea guianensis</i>)	Lebrini, <i>et al.</i> 2011
Guayana Francesa	Acacia (<i>gatteria ourego</i>) y Paraguatan (<i>Simira tinctoria</i>)	Lecante, <i>et al.</i> 2011
China	Salvado de Arroz.	Liu Dong, <i>et al.</i> 2011
India	Rosa de Siria (<i>Hybiseus syriacus linn</i>)	Nagarajan, <i>et al.</i> 2010
Emiratos Árabes Unidos	Neem	Nahlét, <i>et al.</i> 2010
Arabia Saudita	Flor de Jamaica (<i>Hibiscus sabdariffa</i>)	Noor. 2009
India	Sauce de Hojas Justicia(<i>Justicia gendarussa</i>)	Satapathy, <i>et al.</i> 2009

Fuente: realizada en esta investigación.

2.3.14. Generalidades y Composición del aguacate.

El aguacate (*Persea americana*) es un fruto originario de Mesoamérica, la evidencia más antigua del consumo de este fruto data de 7,000 a 8,000 años A. C. y fue encontrada en una cueva localizada en Puebla, México. El aguacatero pertenece a la familia *Lauraceae* y al género *Persea*, y en la actualidad contiene alrededor de 85 especies (Sanginés, 2008).

Figura 12. *Persea americana* (aguacate).



Fuente: Tomada de la pág. <http://www.abc-economia.com/tema/aguacate/>

En cuanto a la composición química del aguacate, los estudios realizados se han enfocado en determinar su valor nutricional. La porción comestible (pulpa) contiene agua entre un 65-80%; proteína L-4%; azúcar alrededor del 1%; aceite 3-30%. También es rica en vitamina B y moderada en vitaminas A y D, sin embargo, el contenido de vitamina D debido al alto contenido de aceite, los aguacates tienen el mayor valor de energía que cualquier fruta. El alto contenido de aceite también contribuye a la consistencia y el sabor especial de la fruta (Acosta Moreno, 2011).

Las semillas contienen una amplia variedad de componentes, incluidos ácidos grasos, alcoholes y un número de compuestos insaturados con un sabor muy amargo. El aguacate contiene protocianidina, la carnitina y un alto contenido de carotenoides en la semilla. El aceite de la semilla es abundante en tocoferol. Las hojas de este árbol contienen primordialmente un aceite esencial amarillo-verdoso compuesto de estragol, pireno, cineol, anetol, transanetol, alcanfor y trazas de ácido enántico, gammametilionona, betapineno y limoneno. Los extractos acuosos basándose en hojas de aguacate, además de su alto contenido en aceite esencial, poseen dopamina y serotonina, flavonoides derivados del quercetol, perseita, persiteol, y un principio amargo llamado abacatina (Hall, et. ál., 2002).

2.3.15. El aguacate como inhibidor de corrosión.

El aguacate es ampliamente reconocido por sus propiedades nutricionales, medicinales y culinarias a nivel mundial, sin embargo, es la primera vez que se evaluará el potencial inhibidor del extracto de pulpa de aguacate en la corrosión de dos tipos de metales, el acero al carbono y aluminio, sumergidos en una solución corrosiva de ácido clorhídrico.

Con los porcentajes de inhibición obtenidos tras las pruebas realizadas se podrá sentar un precedente, que demuestre que la pulpa de aguacate tiene potencial como inhibidor de corrosión, bajo las condiciones de estudio realizadas. Una investigación de este tipo, incluirá el extracto de aguacate en la literatura disponible acerca de los inhibidores de corrosión a partir de extractos de plantas y contribuirá al desarrollo de nuevas tecnologías limpias y amigables con el ambiente, para el control y prevención de la corrosión.

3. METODOLOGÍA

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Para evaluar la eficiencia del extracto acuoso de *Persea americana* (aguacate) en la inhibición de la corrosión de acero al carbono y aluminio en medio ácido, se realizó una investigación cuantitativa de tipo experimental. El extracto se obtuvo a partir de la pulpa del aguacate, utilizando como solvente agua doblemente destilada. Se manipuló la concentración del extracto, la concentración del medio corrosivo y el tipo de metal con el fin de cuantificar el efecto de estos factores sobre la eficiencia de inhibición. Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas de pérdida de peso y pruebas electroquímicas para determinar la eficiencia de inhibición del extracto y se comparó la eficiencia de los extractos de aguacate con los extractos de tabaco bajo las mismas condiciones experimentales, obtenidas en la prueba de pérdida de peso.

3.2. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.2.1. Fuentes de información primaria.

Las fuentes de información primaria de este proyecto de grado fueron los datos de velocidad de corrosión obtenidos a partir de las pruebas de pérdida de peso y pruebas electroquímicas. Estos ensayos se realizaron en los laboratorios de la Universidad de Cartagena y Universidad del Valle en lo corrido del año 2012. A partir de los datos obtenidos, se determinó la velocidad de corrosión del aluminio y el acero al carbono en medio ácido (HCl 0.5 M y 1M) en presencia y ausencia de los extractos (Dahmani, 2010; Obi-Egbedi, Obot & Umoren, 2010).

3.2.2. Fuentes de información secundarias

Las fuentes secundarias, consistieron en artículos científicos, tesis, patentes y textos académicos recopilados de diferentes Bases de Datos como Science Direct, Search Ebohost, American Chemical Society (ACS), Springer-Books, Springer- Journal, Ebrary, E-libro, Emerald y ASTM international. El análisis de estas fuentes bibliográficas sirvió para establecer la metodología utilizada para la obtención del extracto y el procedimiento adecuado para la prueba de pérdida de peso y curvas de Tafel.

3.3. MUESTRA

Las muestras de aguacate y tabaco provienen del municipio de El Carmen de Bolívar, Bolívar. Los aguacates se tomaron de forma aleatoria de los árboles. Se seleccionaron aquellos frutos que no tenían daños físicos como golpes o magulladuras y se evitaron aquellos con signos de enfermedades. Los frutos escogidos tenían una coloración externa homogénea y se encontraban en estado de madurez. Para la preparación del extracto se utilizaron dos aguacates, del cual se tomaron 250 gramos de pulpa. Para la preparación de los extractos de tabaco se tomaron 250 g de hojas secas de esta planta. Las muestras de acero al carbono y aluminio corresponden a láminas de 5 x 4 x 0,3 cm y 5 x 4 x 0,1 cm respectivamente.

3.4. VARIABLES.

A continuación, se muestra la Tabla 3, que contiene las variables dependientes, independientes e intervinientes, que se manejaron durante este estudio experimental.

Tabla 3. Variables del diseño experimental

VARIABLES DEPENDIENTES	Definición	Unidad
Velocidad de corrosión	Pérdida de peso del metal por unidad de tiempo.	g /h
VARIABLES INDEPENDIENTES	Definición	Unidad
Concentración de extracto	Gramos de extracto adicionado al medio corrosivo.	g/ml
Concentración del medio corrosivo	Cantidad de HCl por volumen de solución	Molaridad
Metal	Área del metal usado en las pruebas.	cm ²
VARIABLES INTERVINIENTES	Definición	Unidad
Solvente de extracción	Agua doblemente destilada	ml
Tiempo	Tiempo de exposición de los metales en cada una de las pruebas.	h
Temperatura	Temperatura a la que se realizaron los ensayos.	°C
Voltaje de polarización	Voltaje aplicado en la técnica de curvas de Tafel.	mV

Fuente: Realizada en la presente investigación.

3.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se realizó un diseño factorial 2^k considerando 4 factores de dos niveles cada uno para un total de 16 tratamientos en la prueba de pérdida de peso. Estos 16 tratamientos se realizaron para los extractos de aguacate y de tabaco, arrojando un total de 16 experimentos. Los factores aparecen tabulados a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4. Diseño Experimental

METAL	Acero al carbono	-
	Aluminio	+
EXTRACTO	Tabaco	-
	Aguacate	+
CONCENTRACIÓN ÁCIDO	0,5 M	-
	1 M	+
CONCENTRACIÓN EXTRACTO	5 g/ml	-
	10 g/ml	+

Fuente: Realizada en la presente investigación.

La variable respuesta es la eficiencia de inhibición. En lo relacionado a la concentración del inhibidor y concentración del medio corrosivo, los niveles estudiados se tomaron teniendo en cuenta las concentraciones reportadas en los artículos revisados donde se obtuvieron inhibidores a partir de extractos vegetales. Así mismo, se realizaron pruebas preliminares de pérdida de peso para encontrar las concentraciones de inhibidor más favorables.

A continuación en la Tabla 5 se muestran los distintos experimentos que se realizaron durante la prueba de pérdida de peso del acero al carbono el aluminio en presencia y ausencia de los extractos de aguacate y tabaco.

Tabla 5. Distintos experimentos que se realizaron.

CORRIDA	FACTORES				VARIABLE RESPUESTA
	METAL	EXTRACTO	CONCENTRACION ACIDO	CONCENTRACION EXTRACTO	EFICIENCIA DE INHIBICIÓN
1	+	+	+	+	
2	+	+	+	-	
3	+	+	-	+	
4	+	+	-	-	
5	+	-	+	+	
6	+	-	+	-	
7	+	-	-	+	
8	+	-	-	-	
9	-	+	+	+	
10	-	+	+	-	
11	-	+	-	+	
12	-	+	-	-	
13	-	-	+	+	
14	-	-	+	-	
15	-	-	-	+	
16	-	-	-	-	

Fuente: Realizada en la presente investigación.

A partir de un análisis de varianza de los resultados obtenidos, se determinó sobre qué metal y a que concentraciones del medio corrosivo, el extracto de aguacate actuó con mayor eficiencia para disminuir la velocidad de corrosión en la prueba de pérdida de peso. En esta metodología no se realizaron réplicas de los ensayos puesto que ya se habían llevado a cabo pruebas de pérdida de peso preliminares, sin embargo, se realizó una comparación de las eficiencias obtenidas usando extracto de aguacate y extracto de tabaco, cuyo desempeño como inhibidor ya ha sido patentado y comercializado.

3.6. PROCEDIMIENTO

Para evaluar la eficiencia del extracto de *Persea americana* (aguacate) en la inhibición de la corrosión de acero al carbono y aluminio en medio ácido, se realizaron pruebas electroquímicas y de pérdida de peso.

Los experimentos de pérdida de peso se llevaron a cabo a temperatura ambiente sumergiendo las muestras metálicas (cupones) en soluciones ácidas de HCl 0.5 M y HCl 1.0 M, sin agitación durante 10 días. Los cupones metálicos de aluminio y acero al carbono presentaban las siguientes dimensiones: 5x4x0,3 cm y 5x4x0,1cm respectivamente. Se expusieron al medio corrosivo durante las pruebas de pérdida de peso y las pruebas electroquímicas, el blanco se hizo con cupones sumergidos en solución ácida sin inhibidor.

3.6.1. Preparación del medio corrosivo con inhibidor.

Las soluciones (HCl 0.5M y HCl 1.0 M) fueron preparadas mediante dilución de ácido clorhídrico (reactivo analítico 37%) con agua destilada. El volumen del medio corrosivo para cada corrida experimental fue de 180 ml. Las cantidades necesarias de extracto de aguacate (inhibidor) y extracto de tabaco, se agregaron en los diferentes recipientes para posteriormente adicionar la solución ácida y completar el volumen de 180 ml, obteniéndose así, concentraciones de 5% y 10% v/v de inhibidor ((Dahmani, 2010; Obi-Egbedi, Obot & Umoren, 2010).

3.6.2. Obtención del extracto a partir de pulpa de aguacate.

La parte carnosa (mesocarpio) del aguacate, se cortó en pedazos pequeños y se pesaron 250 g que se homogenizaron durante 3 minutos en una licuadora con 500 ml de agua destilada, cómo se observa en la Figura 13.

Figura 13. Obtención del extracto de aguacate.



Fuente: Tomada durante esta investigación



3.6.3. Obtención del extracto de tabaco.

Se pesaron 250 g de hojas secas de tabaco y se pusieron al baño de maría durante 30 minutos, a una temperatura de 70°C. La solución resultante se filtró y se almacenó para su posterior utilización.

3.6.4. Caracterización de la pulpa de aguacate.

Distintas muestras de pulpa de aguacate, se sometieron a un análisis fitoquímico, con el fin de identificar algunos metabolitos secundarios presentes, como saponinas, flavonoides, taninos, compuestos fenólicos etc. Los resultados del análisis se utilizaron

para establecer un punto de comparación con publicaciones anteriores, en las que se obtuvieron inhibidores a partir de plantas y en los que se relaciona el potencial inhibidor con la presencia de los mismos grupos de compuestos orgánicos hallados en esta investigación.

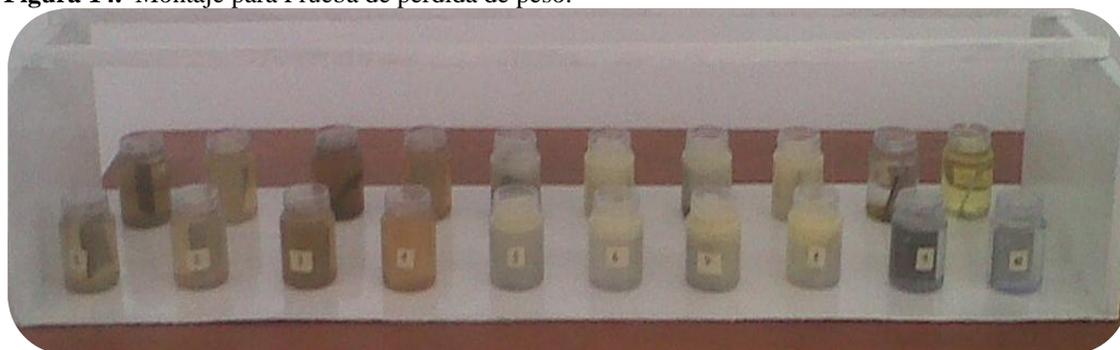
Los constituyentes fitoquímicos de los extractos acuosos del aguacate y tabaco se determinaron mediante una serie de técnicas analíticas. Extracción Soxhlet para la identificación de aceites y grasas, Prueba de la espuma abundante para determinación de saponinas, Gelatina-sal para caracterizar taninos y por último, Fotocolorimetría para identificar fenoles. Estas pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de la facultad de Química farmacéutica de la Universidad de Cartagena, el informe recibido se encuentra en el ANEXO A.

3.6.5. Prueba Pérdida de peso.

Los cupones metálicos fueron sumergidos en soluciones ácidas con las distintas concentraciones de inhibidor y de medio corrosivo. Se prepararon cuatro soluciones sin inhibidor (blancos), cada una con un cupón.

Antes de la prueba, cada una de las muestras o cupones, se lavaron con etanol 95% v/v para quitar la grasa y otras impurezas. Posteriormente se secaron y pesaron en una balanza electrónica para establecer su peso antes de ser corroídos. La inmersión se llevó a cabo a temperatura ambiente durante 10 días sin agitación (Ver Figura 14). Cada día, los cupones eran extraídos de las soluciones ácidas, lavados con etanol 95% v/v, secados y pesados, con el fin de determinar la cantidad de masa de metal perdida por la corrosión. Al finalizar este paso, los cupones eran nuevamente sumergidos en la solución, para repetir este procedimiento día a día.

Figura 14. Montaje para Prueba de pérdida de peso.



Fuente: foto tomada durante esta investigación.

3.6.6. Pruebas electroquímicas

En esta etapa se determinaron las velocidades de corrosión de los metales en presencia y ausencia del extracto de aguacate como inhibidor de corrosión, mediante pruebas electroquímicas de extrapolación de Tafel. Estas pruebas se realizaron con el fin de corroborar las eficiencias de inhibición del extracto de pulpa de aguacate, obtenidos en la prueba de pérdida de peso.

Dos muestras de 1.000 cm^3 de inhibidor (extracto de aguacate) fueron enviadas a los laboratorios de la Universidad del Valle en el mes de noviembre de 2012, donde fueron almacenadas en una nevera a 4°C . Una hora antes de cada ensayo se prepararon soluciones de 250 cm^3 en un balón aforado, midiendo el volumen y peso necesario de agua desionizada (con resistividad de $17.7 \text{ M}\Omega\text{-cm}$), electrolito (HCl) e inhibidor (Aguacate). En la Tabla 6, se presenta la caracterización de las soluciones preparadas, hecha con un medidor multiparámetro Meter Waterproof Handheld Meters Eijkelkamp PC650.

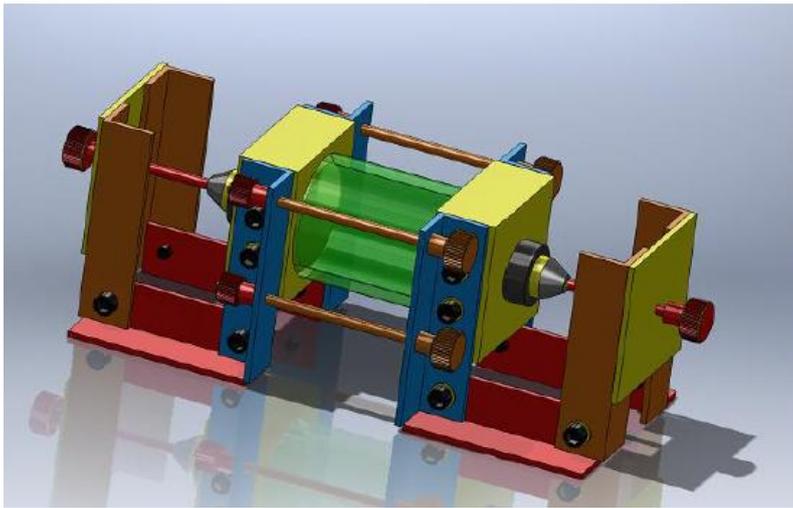
Tabla 6. Caracterización electroquímica de las soluciones utilizadas en estas pruebas.

Solución	pH ₀ ($27 \pm ^\circ\text{C}$)	Conductividad ₀ ($27 \pm ^\circ\text{C}$) mS/cm)
HCl 0.5M	0,34	136,9
HCl 0.5M + inhibidor 5%	0,3	113,7
HCl 0.5M + inhibidor 10%	0,42	111,9

Fuente: Realizada durante esta investigación.

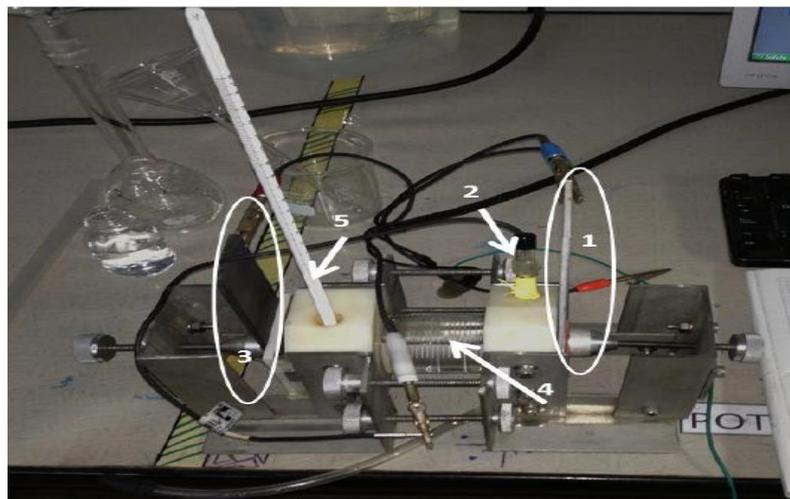
Los ensayos se llevaron a cabo en una celda de tres electrodos, con un electrodo auxiliar de grafito con un área de 7,6 cm², un electrodo de referencia Gamry 930-15 de Ag/AgCl (3M KCl) y como electrodos de trabajo se utilizaron placas de acero al carbón ASTM A36 y de aluminio con un área circular expuesta a la solución de 5,0 cm². El volumen de la celda fue de 185 cm³, con una distancia entre electrodos de 13,6cm. Un termómetro para el control de temperatura estaba en contacto con la solución en la parte superior de la celda. El montaje experimental, se ilustra en las Figura 15 y Figura 16.

Figura 15. Esquema Celda Electroquímica de 3 electrodos.



Fuente: [http://corinto.pucp.edu.pe/ contenido/42-celdas-galvanicas-o-celdas-voltaicas](http://corinto.pucp.edu.pe/contenido/42-celdas-galvanicas-o-celdas-voltaicas)

Figura 16. Montaje de Celda Electroquímica de 3 electrodos. 1. Electrodo de trabajo. 2. Electrodo de referencia. 3. Electrodo Auxiliar. 4. Electrolito. 5 Termómetro.



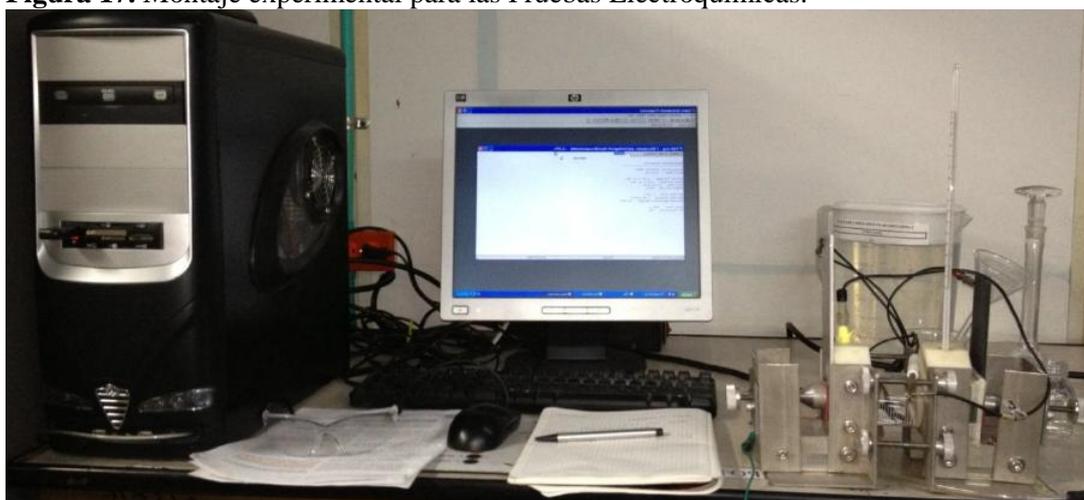
Fuente: Foto tomada durante el experimento en la Universidad del Valle.

Antes de cada ensayo, los electrodos de grafito, acero al carbón y aluminio, fueron lijados con papel abrasivo de grado 100, 350, 600 y 1.000 hasta obtener una superficie uniforme. Posteriormente fueron sumergidos en acetona, enjuagados con agua desionizada y seguidamente situados en los extremos de la celda, donde la solución fue vertida inmediatamente al interior.

Los ensayos electroquímicos se realizaron con un Potenciostato/Galvanostato Gamry® serie G75 conectado a la celda de tres electrodos (Ver Figura 17). La secuencia de los ensayos, consintió inicialmente en la medición del potencial de circuito abierto (E_{oc}) durante un periodo de reposo de 3.600 segundos. Después de este tiempo la variación en E_{oc} , para todos los experimentos era menor a ± 5 mV/ 10 minutos, considerándose estable.

Posteriormente, se realizó el barrido potenciales entre ± 250 mV de E_{oc} , comenzando desde la región catódica hacia la anódica, con un tamaño de paso de 50 mV y periodo de muestreo de 600 segundos, registrando y graficando el valor de corriente (A) al finalizar los 600, lo que corresponde a una velocidad de barrido de 0.1666 mV/s, como se reporta en la norma ASTM G5-94. Los experimentos se realizaron a temperatura ambiente, igual a $27^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Figura 17. Montaje experimental para las Pruebas Electroquímicas.



Fuente: Foto tomada durante la presente investigación.

3.6.7. Cálculo de Eficiencia

Una vez obtenidos los resultados de velocidad de corrosión, en cada uno de los ensayos, se procedió a calcular la eficiencia de inhibición de los extractos vegetales. La eficiencia de los inhibidores se determina como la capacidad para inhibir la corrosión del metal y se establece en función de la velocidad de corrosión del metal sin inhibidor. Para calcular la eficiencia de cada una de las concentraciones evaluadas de inhibidor, se utilizó el siguiente modelo:

$$E = \left(\frac{V_{corr \text{ sin inhibidor}} - V_{corr \text{ con inhibidor}}}{V_{corr \text{ sin inhibidor}}} \right) * 100, \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde,

E = % de eficiencia del inhibidor

V_{corr- sin-inhibidor} = Velocidad de corrosión sin adición de inhibidor

V_{corr-coninhibidor} = Velocidad de corrosión con adición de inhibidor

4. RESULTADOS: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA DEL EXTRACTO.

Los resultados de la caracterización fitoquímica del extracto de aguacate se aparecen en la Tabla 7.

Tabla 7. Constituyentes fitoquímicos del Aguacate

Componentes	Aguacate (mg/ml)
Aceites y grasas	44,88
Saponinas	No detectable
Taninos	2,01
Fenoles	1,26

Fuente: Informe de estudio Fitoquímico.

La presencia de taninos y fenoles en el extracto de aguacate sugiere la formación de quelatos por la interacción del metal con estas sustancias (Amitha y Bhatthi, 2012; Silveira, Cassel & Schermann, 2012). La alta cantidad de aceites y grasas en el aguacate contribuye a mejorar la eficiencia de inhibición; sin embargo, estas sustancias no poseen tan buenas propiedades inhibidoras como los taninos y fenoles.

Debido a los grupos OH en la posición orto en los anillos aromáticos, los taninos son capaces de formar quelatos con el hierro y otros cationes. Los grupos OH alrededor de la molécula se atraen para formar fuertes enlaces con el hidrógeno y así formar complejos con los iones metálicos. Los complejos así formados, provocan un bloqueo en los sitios de formación de micro-anodos, que se generan cuando la superficie metálica entra en contacto con un electrolito o medio corrosivo, por lo tanto, retardan la disolución subsiguiente del metal.

Al comparar la composición fitoquímica del aguacate con la del extracto de tabaco, cuyas propiedades inhibidoras ya han sido estudiadas (Fraunhofer, 2008), se evidencia

que el aguacate contiene la mayor cantidad de taninos y fenoles (ver Tabla 8), lo que sugiere, que este tendría una mejor eficiencia de inhibición de la corrosión.

Tabla 8. Constituyentes químicos de los extractos de aguacate y tabaco - comparativo.

Componentes.	Aguacate (mg/ml)	Tabaco (mg/ml)
Aceites y grasas	44,88	No detectable
Saponinas	Nd	No detectable
Taninos	2,01	1,25
Fenoles	1,26	0,98

Fuente: Realizada en esta investigación.

4.2. PRUEBA DE PÉRDIDA DE PESO

Se llevó a cabo un estudio de pérdida de peso para evaluar la eficiencia de inhibición del extracto de aguacate comparándolo al mismo tiempo con la eficiencia del extracto de tabaco; en la corrosión del aluminio y acero al carbono sumergidos en solución ácida HCl 0.5M y 1.0M, a temperatura ambiente. Las Figuras (18 a 21) representan las curvas de pérdida de peso vs tiempo de inmersión, de los cupones de prueba en la solución ácida, en presencia y ausencia del extracto de aguacate y tabaco.

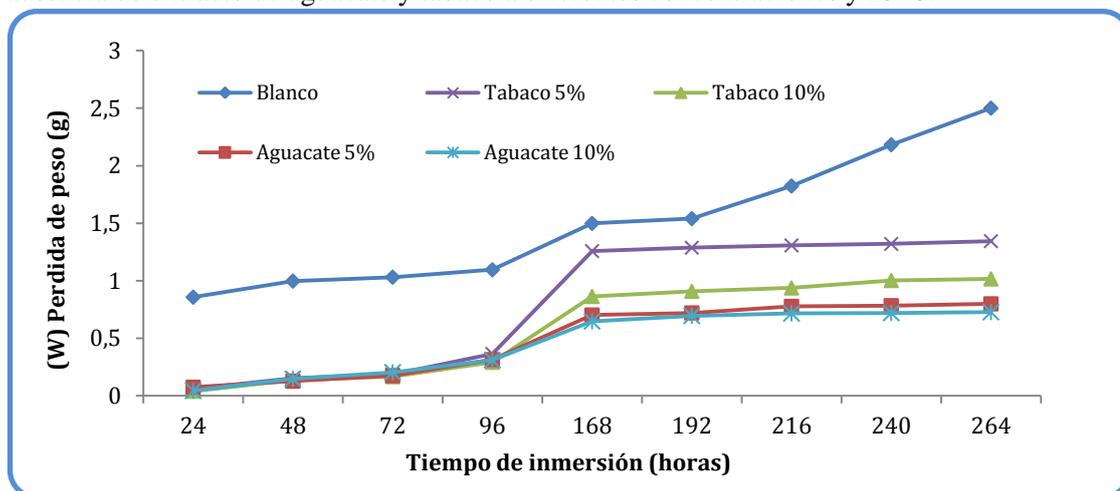
La velocidad de corrosión $V_{corr.}$ se calculó a partir de las pendientes de las curvas obtenidas en este ensayo (El-Etre, 2003). Los datos de pérdida de peso y velocidad de corrosión, para los diferentes sistemas evaluados en esta tesis, se encuentran en las Tablas del ANEXO B.

Una inspección realizada a las curvas realizadas a partir de los datos experimentales de pérdida de peso, que aparecen en las Figuras (18 a 21) revela que, la pérdida de peso en gramos, aumenta con el tiempo de inmersión, a lo largo de un periodo de 264 horas y es mayor en la solución ácida HCl 1M en comparación con el medio HCl 0.5M, para ambos metales. Esto indica que la velocidad de corrosión del aluminio y del acero al

carbono es una función de la concentración del ácido en la solución. Esta observación, concuerda con el hecho de que las velocidades de reacción química aumentan proporcionalmente con la concentración, debido probablemente, al incremento de la velocidad de difusión y ionización de las especies activas en la reacción de corrosión.

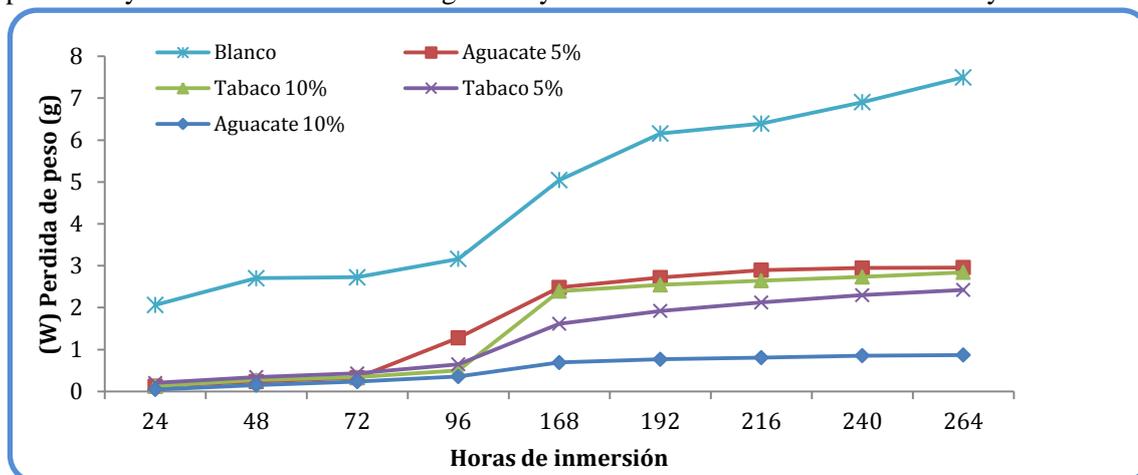
En las Figuras (18 a 21) se observa que, las curvas de pérdida de peso para los metales en presencia de los extractos, tienen una pendiente mucho menor que las curvas de los blancos (sin inhibidor), es decir, que ambos inhibidores retardaron o inhibieron el proceso de corrosión durante este ensayo. Esta disminución de la pendiente en la pérdida de peso del metal, indica que las moléculas de los extractos fueron adsorbidas sobre la superficie del metal y luego inhibieron el proceso de corrosión (El-Etre, 2003; Al-Qasmi, 2010). Así mismo, se evidencia que las pendientes de las curvas para los ensayos con extracto de aguacate, fueron menores a las pendientes obtenidas en los ensayos con extracto de tabaco, lo que sugiere una menor pérdida de peso de los metales en los sistemas que contenían extracto de aguacate.

Figura 18. Curvas de Pérdida de Peso vs Tiempo para el Aluminio en HCl 0.5 M en presencia y ausencia de extracto de aguacate y tabaco a diferentes concentraciones y 25°C.



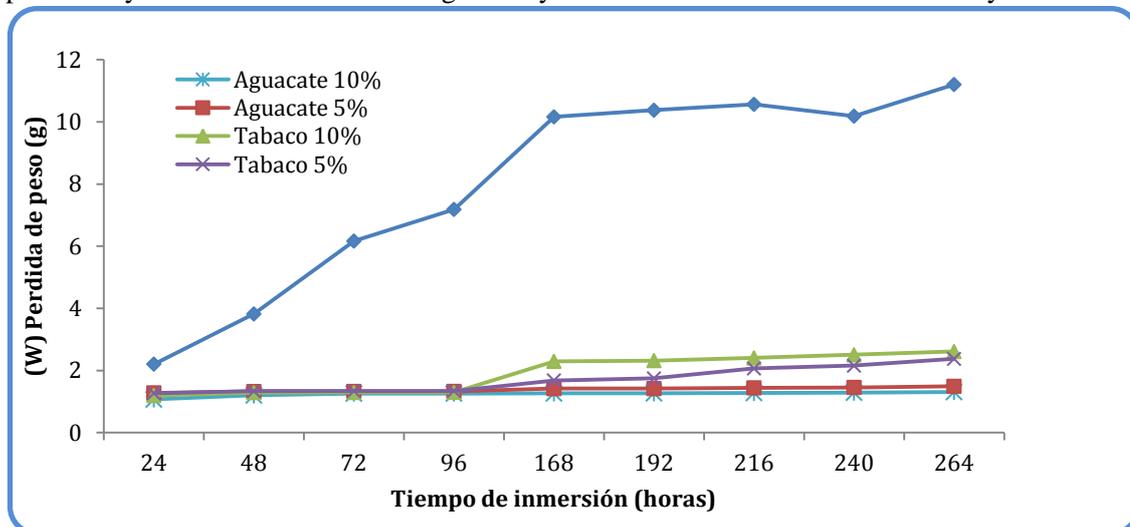
Fuente: Realizada en esta investigación.

Figura 19. Curvas de Pérdida de Peso vs Tiempo para el Acero al carbono en HCl 0.5 M en presencia y ausencia de extracto de aguacate y tabaco a diferentes concentraciones y 25°C.



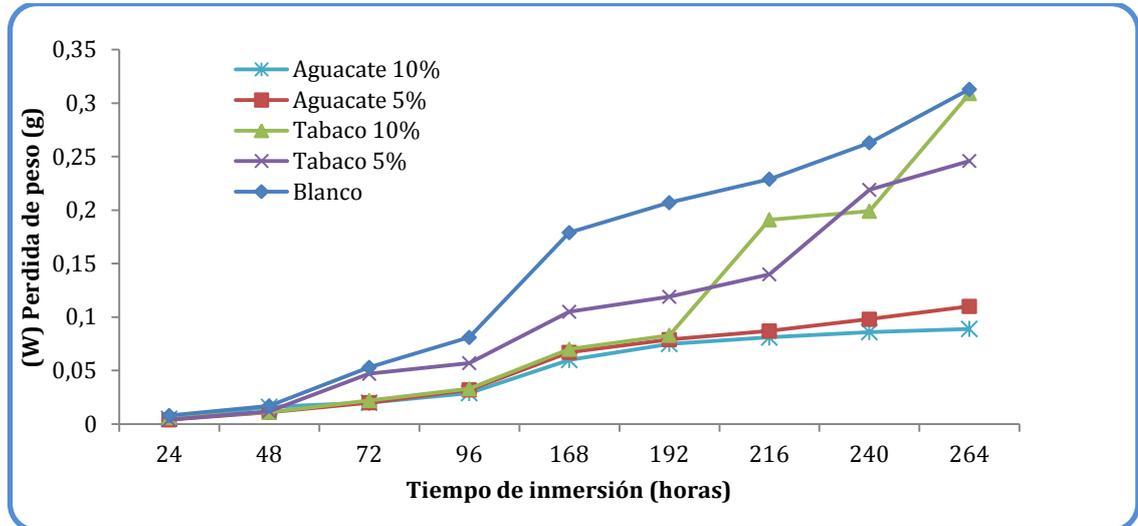
Fuente: Realizada en esta investigación.

Figura 20. Curvas de Pérdida de Peso vs Tiempo para el Acero al carbono en HCl 1M en presencia y ausencia de extracto de aguacate y tabaco a diferentes concentraciones y 25°C.



Fuente: Realizada en esta investigación.

Figura 21. Curvas de Pérdida de Peso vs Tiempo para el Aluminio en HCl 1M en presencia y ausencia de extracto de aguacate y tabaco a diferentes concentraciones y 25°C.



Fuente: Realizada en esta investigación.

Las eficiencias de inhibición de los extractos de aguacate y tabaco, en sus diferentes concentraciones, fueron calculadas utilizando la siguiente ecuación:

$$\%EI = \left[\frac{(V_{corr} - V_{inh})}{V_{corr}} \right] \times 100, \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde V_{corr} , es la velocidad de corrosión del cupón en solución ácida sin inhibidor (blanco) y V_{inh} es la velocidad de corrosión del cupón de prueba en presencia del extracto o inhibidor. La acción protectora del inhibidor durante la corrosión del metal se basa en la adsorbabilidad de sus moléculas, donde el resultado de la capa adsorbida aísla la superficie del metal del medio corrosivo. El grado de cobertura de la superficie θ , representa la parte del metal cubierta por las moléculas del inhibidor, fue calculado usando la ecuación 16 (Abiola, *et al.* 2007):

$$\theta = 1 - \left(\frac{V_{inh}}{V_{corr}} \right), \quad (\text{Ec. 16})$$

Los resultados de eficiencia de inhibición y cobertura del aluminio se muestran a continuación en las Tablas 9 y 10. Analizando los resultados, todas las eficiencias de

inhibición con extracto de aguacate son mayores que las del extracto de tabaco. Las eficiencias de inhibición, resultaron ser mejores en un medio ácido HCl 1.0 M (**70.69%**), que en solución HCl 0.5 M (**51.63%**) y adicionalmente, se observa que las mayores eficiencias corresponden a las soluciones con mayor concentración de extracto (**10% v/v**). Este comportamiento se debe a que, al aumentar la concentración del extracto, incrementa el número de moléculas disponibles que se pueden adsorber en la superficie metálica, inhibiendo en proceso corrosivo.

Tabla 9. %EF y recubrimiento de la superficie del Aluminio en HCl 0.5 M con aguacate y tabaco a diferentes concentraciones, durante 264 horas de exposición.

	Concentración Extracto (v%)	EI%	Recubrimiento (θ)
Aguacate	10%	51.63	0.516
	5%	46.53	0.465
Tabaco	10%	28.51	0.285
	5%	2.57	0.0257

Fuente: Realizada en esta investigación.

Tabla 10. %EF y recubrimiento de la superficie del Aluminio en HCl 1 M con aguacate y tabaco a diferentes concentraciones, durante 264 horas de exposición.

	Concentración Extracto (v%)	EI%	Recubrimiento θ
Aguacate	10%	70.69	0.706
	5%	64.53	0.645
Tabaco	10%	11.08	0.110
	5%	24.63	0.246

Fuente: Realizada en esta investigación.

En las Tablas 11 y 12, se muestran los resultados obtenidos para el acero al carbono. Se observa que, en todos los casos, la eficiencia de inhibición del aguacate, fue mayor con respecto al extracto de tabaco, con una porcentaje de inhibición de hasta un **98.1%**.

Tabla 11. %EF y recubrimiento de la superficie del **Acero al carbono** en **HCl 0.5M** con aguacate y tabaco a diferentes concentraciones, durante 264 horas de exposición.

	Concentración Extracto (v%)	EI%	Recubrimiento θ
Aguacate	10%	84.4	0.844
	5%	56.6	0.556
Tabaco	10%	44.3	0.443
	5%	41.7	0.417

Fuente: Realizada en esta investigación.

Tabla 12. %EF y recubrimiento de la superficie del **Acero al carbono** en **HCl 1 M** con aguacate y tabaco a diferentes concentraciones, durante 264 horas de exposición.

	Concentración Extracto (v%)	EI%	Recubrimiento θ
Aguacate	10%	98.1	0.981
	5%	97.7	0.976
Tabaco	10%	81.3	0.812
	5%	86.9	0.869

Fuente: Realizada en esta investigación.

La Tabla 13 muestra un comparativo de las eficiencias de inhibición para ambos metales bajo estudio. Un análisis de estos resultados, evidencia que las eficiencias de inhibición alcanzadas son mayores para el acero al carbono que para el aluminio en todos los casos o sistemas evaluados.

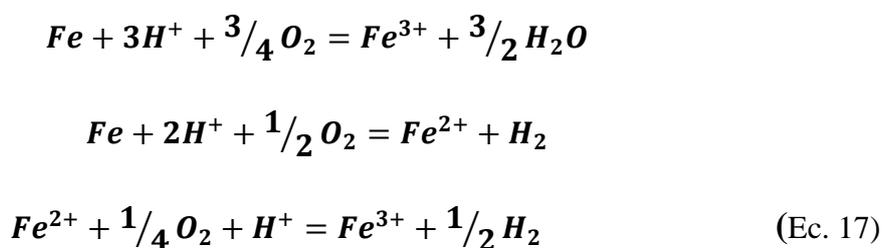
Tabla 13 Comparativo de eficiencias de inhibición del extracto de tabaco y aguacate en Aluminio y Acero al carbono.

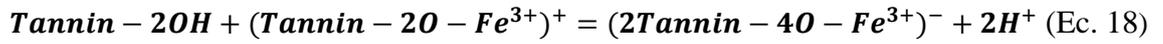
		Aluminio	Acero
HCl 0.5 M	Concentración Extracto	EI%	EI%
Aguacate	10%	51.63	84.4
	5%	46.53	56.6
Tabaco	10%	28.51	44.3
	5%	2.57	41.7
HCl 01.0 M		EI%	EI%
Concentración Extracto			
Aguacate	10%	70.69	98.1
	5%	64.53	97.7
Tabaco	10%	11.08	81.3
	5%	24.63	86.9

Fuente: Realizada en esta investigación.

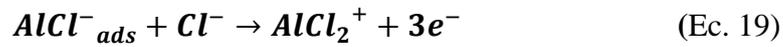
Esta diferencia en las eficiencias de inhibición, radica en la forma en que los constituyentes de los extractos actúan sobre el tipo de metal. Existe una mayor reactividad del acero al carbono con los taninos del extracto de aguacate y del extracto de tabaco, ya que estos compuestos son capaces de formar quelatos con los iones férricos y ferrosos del acero provocando un bloqueo en los sitios de formación de micro-ánodos, que se generan cuando la superficie metálica entra en contacto con el ácido clorhídrico y por lo tanto, retardan la disolución del metal (Ostovari et al., 2009).

El mecanismo de reacción del hierro con los taninos presentes en el extracto, está dado por las siguientes reacciones (Rahim & Kassim, 2008):





En el caso del aluminio el mecanismo de reacción es el siguiente (Abdel-Gaber, *et al*, 2008):



La ausencia de iones aluminio en solución, los quelatos no pueden formarse con los taninos de los extractos, para posteriormente ser absorbidos en la superficie del metal, lo que conlleva a una disminución de las eficiencias de inhibición.

4.2.1. Análisis de varianza ANOVA.

A continuación, la Tabla 14 muestra los factores y corridas del diseño experimental y la Tabla 15 muestra el análisis de varianza realizado.

Tabla 14 Diseño Experimental

FACTORES					VARIABLE RESPUESTA
Corrida	Metal	Extracto	Concentración Ácido	Concentración Extracto	Eficiencia de Inhibición (%)
1	Aluminio	Aguacate	1 M	10 g/ml	70.69
2	Aluminio	Aguacate	1 M	5 g/ml	64.53
3	Aluminio	Aguacate	0.5 M	10 g/ml	51.63
4	Aluminio	Aguacate	0.5 M	5 g/ml	46.53
5	Aluminio	Tabaco	1 M	10 g/ml	11.08
6	Aluminio	Tabaco	1 M	5 g/ml	24.63
7	Aluminio	Tabaco	0.5 M	10 g/ml	28.51
8	Aluminio	Tabaco	0.5 M	5 g/ml	2.57
9	Acero	Aguacate	1 M	10 g/ml	84.4
10	Acero	Aguacate	1 M	5 g/ml	56.6
11	Acero	Aguacate	0.5 M	10 g/ml	98.1
12	Acero	Aguacate	0.5 M	5 g/ml	97.7
13	Acero	Tabaco	1 M	10 g/ml	44.3
14	Acero	Tabaco	1 M	5 g/ml	41.7
15	Acero	Tabaco	0.5 M	10 g/ml	81.3
16	Acero	Tabaco	0.5 M	5 g/ml	86.9

Fuente: Realizada en esta investigación.

Inicialmente se estableció una hipótesis nula de que los factores estudiados no tienen una incidencia significativa sobre las eficiencias de inhibición. Mediante el análisis de varianza (Tabla 15) se determinó que sí existen dos factores, el tipo de metal y la concentración del ácido, ya que poseen un valor-P menor que 0,05, lo cual indica que tienen incidencia estadística sobre la eficiencia de inhibición, como lo muestra el diagrama de Pareto (Figura 22) estandarizado para la eficiencia de inhibición de la

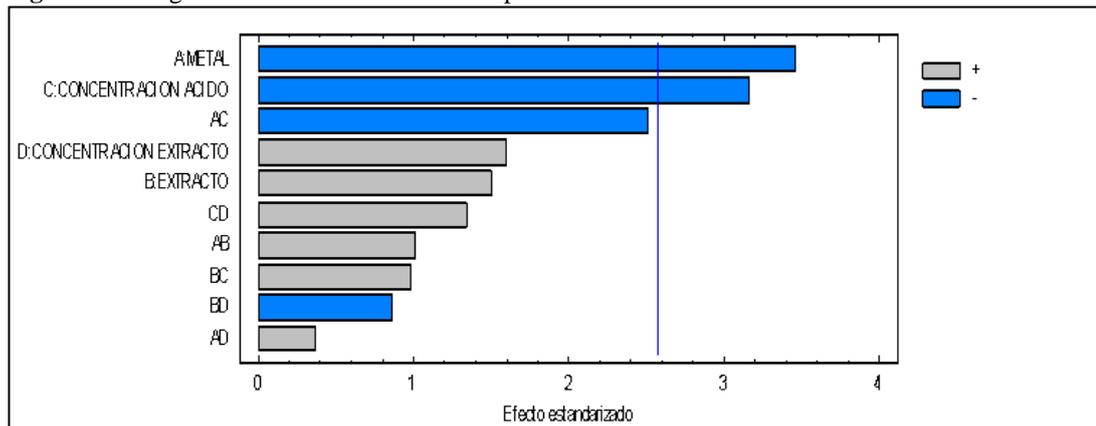
corrosión. Así mismo, mediante el ANOVA, se determinó que los demás factores y sus interacciones no tienen incidencia estadística sobre la eficiencia de inhibición de la corrosión.

Tabla 15 Análisis de Varianza para la Eficiencia de Inhibición.

Fuente	Valor-P
A: TIPO DE METAL	0,0181
B: TIPO DE EXTRACTO	0,1932
C: CONCENTRACION ACIDO	0,0250
D: CONCENTRACION EXTRACTO	0,1720
AB	0,3579
AC	0,0537
AD	0,7292
BC	0,3726
BD	0,4275
CD	0,2388

Fuente: Realizada en esta investigación.

Figura 22. Diagrama de Pareto estandarizado para la eficiencia de inhibición de la corrosión.



Fuente: Realizado en esta investigación.

Los resultados obtenidos demuestran el potencial uso de los extractos de aguacate como inhibidores de corrosión en comparación con otros extractos dado su contenido de taninos, fenoles y grasas que permiten la obtención de altas eficiencias de la inhibición de la corrosión.

Diversos autores han trabajado con inhibidores de corrosión a partir de extractos de plantas, obteniendo resultados similares a los arrojados en la presente investigación, por lo cual se puede hacer una comparación con estos estudios. Las Tablas 16 y 17 muestran la comparación de las eficiencias de inhibición del estudio realizado con extracto de aguacate y otras plantas utilizadas como inhibidores de corrosión en acero al carbono y aluminio en medio ácido.

Tabla 16. Comparación de la investigación realizada con otras plantas en acero al carbono.

Planta.	Metal.	Medio Corrosivo.	Eficiencia Notable	Autor
<i>Persea americana.</i>	Acero al Carbono	HCl 1M y 0.5 M:	98.1% y 97.7%	Berrocal y Altamiranda, 2013
<i>Lasianthera africana.</i>	Acero al Carbono	HCl 0.5 M	94,05%	Eddy et al. 2009
<i>Grongronema latifolium.</i>	Acero al Carbono	HCl 0.5 M	90 %	Eddy y Ebenso, 2010
<i>Aloe vera</i>	Acero al Carbono	HCl 0.4 M	75%	Eddy y Odoemelan, 2011
<i>Acacia senegal</i>	Acero al Carbono	HCl 0.6 M	91, 07%	Gargy y Tak, 2010
<i>Heinsia critana</i>	Acero al Carbono	HCl 0.1 M	52.01 %	Eddy, 2010

Fuente: Realizada en esta investigación.

Tabla 17. Comparación de la investigación realizada con otras plantas en aluminio.

Planta.	Metal.	Medio Corrosivo.	Eficiencia Notable	Autor.
<i>Persea americana.</i>	Aluminio	HCl 0.5 M	70.7 %	Berrocal y Altamiranda, 2013
<i>Justicia gendarussa.</i>	Aluminio	HCl 150 ppm	91,6%	Satapathy et al. 2009
<i>Vernonia amygdalina</i>	Aluminio	HCl 0.2 M	49.5 %	Avwiri e Igho. 2003
<i>Opuntia</i>	Aluminio	HCl 2 M	96%	El-Etre. 2003

Fuente: Realizada en esta investigación.

La comparación nos demuestra que el extracto de aguacate posee altas eficiencias de inhibición de la corrosión del acero al carbono, igual o mayores a las realizadas con estudios similares alrededor del mundo. Para el aluminio, pese a que la eficiencia de inhibición fue menor, los datos obtenidos son notables comparados con los estudios de la bibliografía consultada.

4.3. PRUEBAS ELECTROQUIMICAS

Con el fin de evaluar la eficiencia del inhibidor se calculó la velocidad de corrosión con el software Gamry Echem Analyst 5.58, a partir de las gráficas de las polarizaciones potencioestáticas de cada uno de los ensayos.

El ajuste de Tafel que se utilizó, parte de la simplificación de la ecuación de Butler Volmer, para potenciales próximos a E_{corr} . Cerca a E_{corr} , la grafica de corriente vs potencial, se aproxima a una línea recta, cuya pendiente posee unidades de resistencia (ohms). Esta pendiente es llamada resistencia a la polarización, cuyo valor combinado con los estimados de los coeficientes β_a y β_c (Coeficiente Betta de Tafel anódico y

catódico, respectivamente, expresado en v/década), producen una estimación de la corriente de corrosión, de la cual es posible derivar la velocidad de corrosión.

Si se aproximan los términos exponenciales en la ecuación de Butler Volmer con los primeros dos términos de la expansión de la serie de potencia ($e^x = 1+x +x^2/2\dots$) y simplificando se obtiene la ecuación de Stern-Geary:

$$I_{corr} = \left(\frac{1}{R_p} \right) \left(\frac{\beta_a \times \beta_b}{2.303 \times (\beta_a + \beta_b)} \right) \quad (\text{Ec.13})$$

La rutina matemática del cálculo usa una minimización no lineal chi-cuadrada para ajustar los datos experimentales de la región seleccionada (región de la curva obtenida que presenta comportamiento lineal) a la ecuación 13. El ajuste utiliza 4 parámetros ajustables, I_{corr} , E_{corr} , β_a y β_c . El complejo algoritmo de minimización, realiza 150 iteraciones estimando los 4 parámetros. Evaluando después de cada estimación la razón de bondad de ajuste del modelo. Cada estimación de los parámetros utiliza el algoritmo de Marquardt para la convergencia rápida. El proceso se repite hasta que el ajuste pare de mejorar o hasta que se completen las 150 iteraciones (Gamry Echem Analyst 5.58, 2009).

4.3.1 Parámetros electroquímicos y Curvas de Tafel para el Acero al Carbono.

Las curvas de polarización anódica y catódica del acero al carbono en HCl 0.5 M, con diferentes concentraciones de extracto de aguacate, fueron trazadas a 5mV/10min y se muestran en la Figura 23. Los parámetros electroquímicos, potencial de corrosión (E_{corr}), densidad de corriente de corrosión (I_{corr}), constante anódica de Tafel β_a , constante catódica de Tafel β_c , velocidad de corrosión y eficiencia de inhibición fueron calculadas y se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Parámetros Electroquímicos de la corrosión del Acero al carbono en solución ácida de HCl 0.5M, en presencia y ausencia de extracto de aguacate.

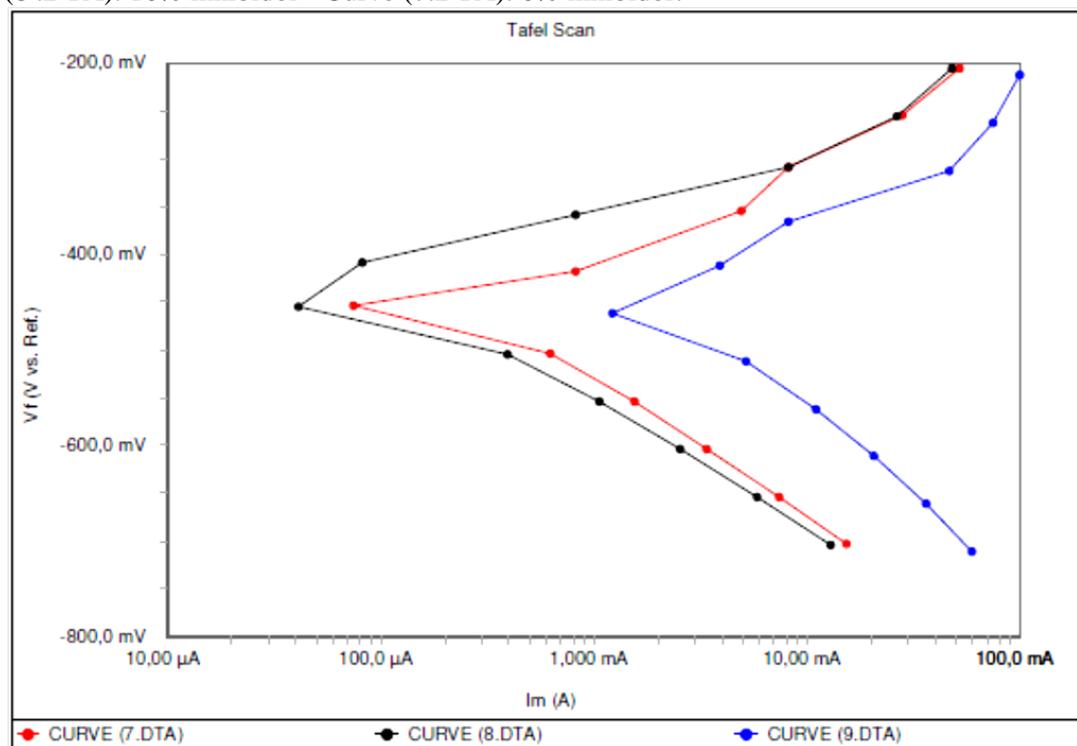
Concentración Inhibidor (%p/v)	β_a mV/década	β_c mV/década	I_{corr} (μA)	E_{corr} (mV)	Velocidad de Corrosión (mm/año)	Eficiencia de Inhibición
0%	115,00	0,19	4,18	-450	6,07	----
5%	0,12	0,18	2,61	-446	1.12	81.55%
10%	0,06	0,11	0,05	-435	0,118	98.06%

Fuente: Realizada en esta investigación.

La eficiencia de corrosión fue calculada a partir de los valores experimentales de velocidad de corrosión, utilizando la ecuación 18.

Una inspección a la Tabla 18 revela que el potencial de corrosión E_{corr} cambia hacia valores menos negativos a medida que aumenta la concentración del inhibidor. Sin embargo, el potencial de corrosión es casi independiente de la concentración del inhibidor. Por otro lado, la adición de aguacate a la solución disminuye marcadamente la corriente de corrosión; este comportamiento refleja la habilidad del extracto para inhibir la corrosión del acero al carbono en solución ácida HCl 0.5M. Así mismo, se observa que la constante de Tafel anódica y catódica disminuye con la adición del extracto de aguacate, siendo menores para la mayor concentración del inhibidor 10% p/V. Este comportamiento es consecuente con la polarización que se observa en las curvas de Tafel de la Figura 23 y sugiere que el extracto inhibe la corrosión del acero al carbono en este medio corrosivo, mediante la adsorción de sus moléculas en los sitios anódicos y catódicos y consecuentemente actúa como inhibidor mixto bajo las condiciones de estudio.

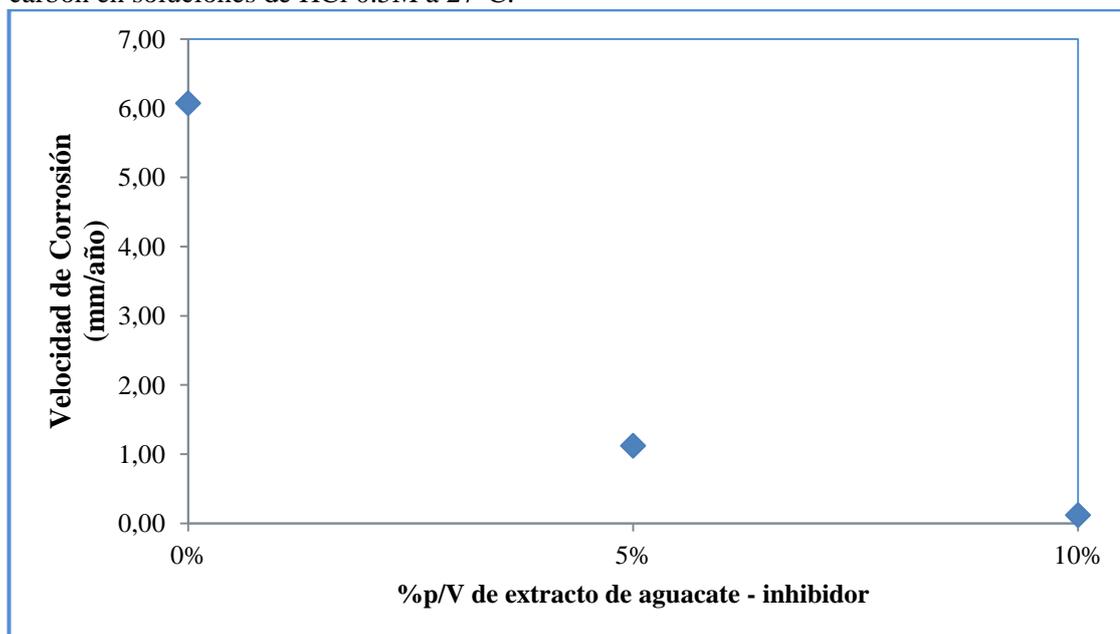
Figura 23. Curvas de Tafel para la corrosión del Acero al carbono en medio ácido HCl 0.5 M en presencia y ausencia de extracto de Aguacate a 27°C. Curve (7.DTA): 5% inhibidor - Curve (8.DTA): 10% inhibidor - Curve (9.DTA): 0% inhibidor.



Fuente: Realizada en esta investigación.

La Figura 24 muestra el efecto de la concentración del inhibidor sobre la velocidad de corrosión del acero al carbono en HCl 0.5 M al adicionar diferentes cantidades de extracto de aguacate. Los resultados de los ensayos para el acero al carbón, confirman la inhibición de los procesos de corrosión, por la disminución de la velocidad de corrosión, a medida que aumenta la concentración del inhibidor en la solución. En cuanto al comportamiento del acero al carbón en solución acida de HCl al 0.5 M, se evidenció la más alta velocidad de corrosión de este estudio, igual a 6.07 mm/año (sin adición de extracto). El efecto del inhibidor (aguacate) en ácido clorhídrico 0.5 M redujo la velocidad de corrosión en un 81.55% (concentración de inhibidor 5% p/v), alcanzando valores de hasta 98,1% de reducción, con una concentración de inhibidor del 10% p/v.

Figura 24. Efecto de la concentración de inhibidor sobre la velocidad de corrosión del acero al carbón en soluciones de HCl 0.5M a 27°C.



Fuente: Realizada en esta investigación.

4.3.2. Parámetros electroquímicos y Curvas de Tafel para el Aluminio.

Las curvas de polarización anódica y catódica del Aluminio en HCl 0.5 M, con diferentes concentraciones de extracto de aguacate, fueron trazadas a 5mV/10min y se muestran en la Figura 25. Los parámetros electroquímicos, potencial de corrosión (E_{corr}), densidad de corriente de corrosión (I_{corr}), constante anódica de Tafel β_a , constante catódica de Tafel β_c , velocidad de corrosión y eficiencia de inhibición fueron calculadas y se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Parámetros Electroquímicos de la corrosión del Aluminio en solución ácida de HCl 0.5M, en presencia y ausencia de extracto de aguacate.

Concentración Inhibidor (%p/v)	β_a V/década	β_c V/década	I_{corr} (mA)	E_{corr} (mV)	Velocidad de Corrosión (mm/año)	Eficiencia de Inhibición
0%	63,00	120	270	-716,00	0,587	---
5%	62,10	113	259	-712,00	0,562	4,07
10%	57,60	102	222	-711,00	0,482	17,78

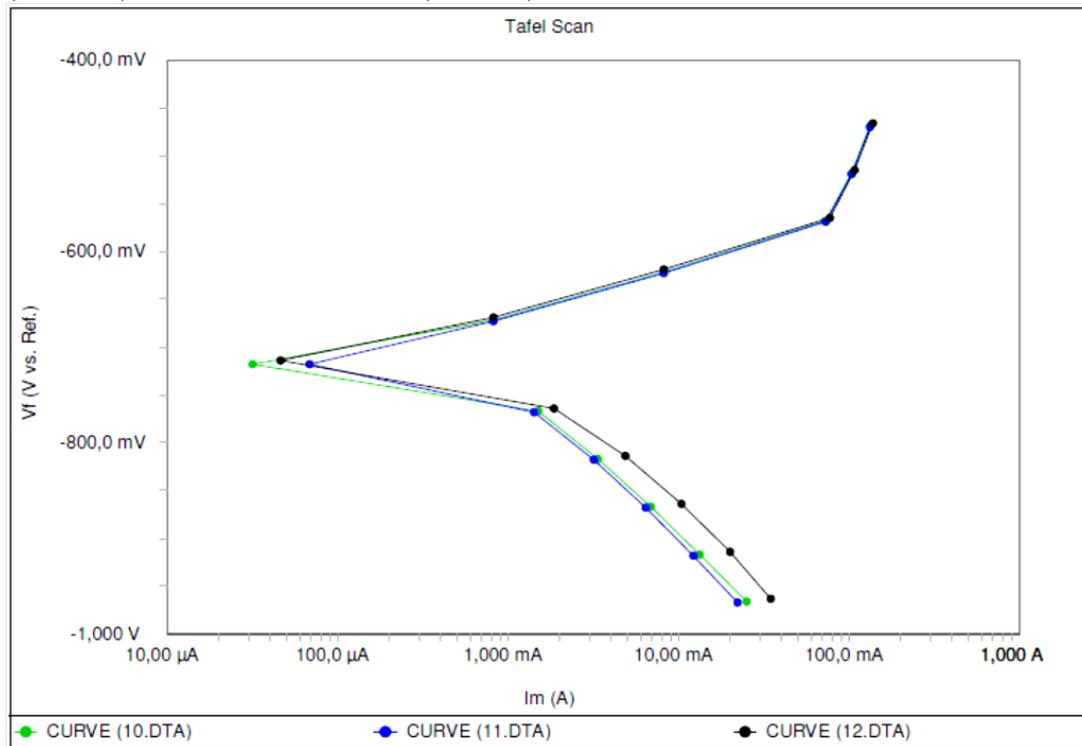
Fuente: Realizada en esta investigación.

La eficiencia de corrosión fue calculada a partir de los valores experimentales de velocidad de corrosión mediante la ecuación 18.

Una inspección a la Tabla 19 revela que el potencial de corrosión E_{corr} cambia hacia valores menos negativos a medida que aumenta la concentración del inhibidor. Sin embargo, el potencial de corrosión es casi independiente de la concentración del inhibidor. Por otro lado, la adición de aguacate a la solución disminuye levemente la corriente de corrosión comparado con los resultados obtenidos para el acero al carbono; este comportamiento sugiere que el extracto de aguacate puede inhibir la reacción de corrosión para el aluminio, pero no deben esperarse tan buenos resultados bajo las condiciones de concentración de ácido e inhibidor estudiadas.

Pese a que las pendientes anódica y catódica de Tafel para este caso, disminuyen con la adición de extracto de aguacate, denotando una polarización de las curvas (Ver Figura 25) y por tanto una disminución de la velocidad de corrosión, la eficiencia de inhibición del proceso corrosivo no es muy óptima, en comparación con los datos experimentales obtenidos para el acero al carbono. Como se observa en esta misma figura, las curvas catódicas se ven más polarizadas, es decir que las moléculas del extracto de aguacate actúan sobre los sitios donde se dan las reacciones catódicas de corrosión, inhibiendo levemente este proceso.

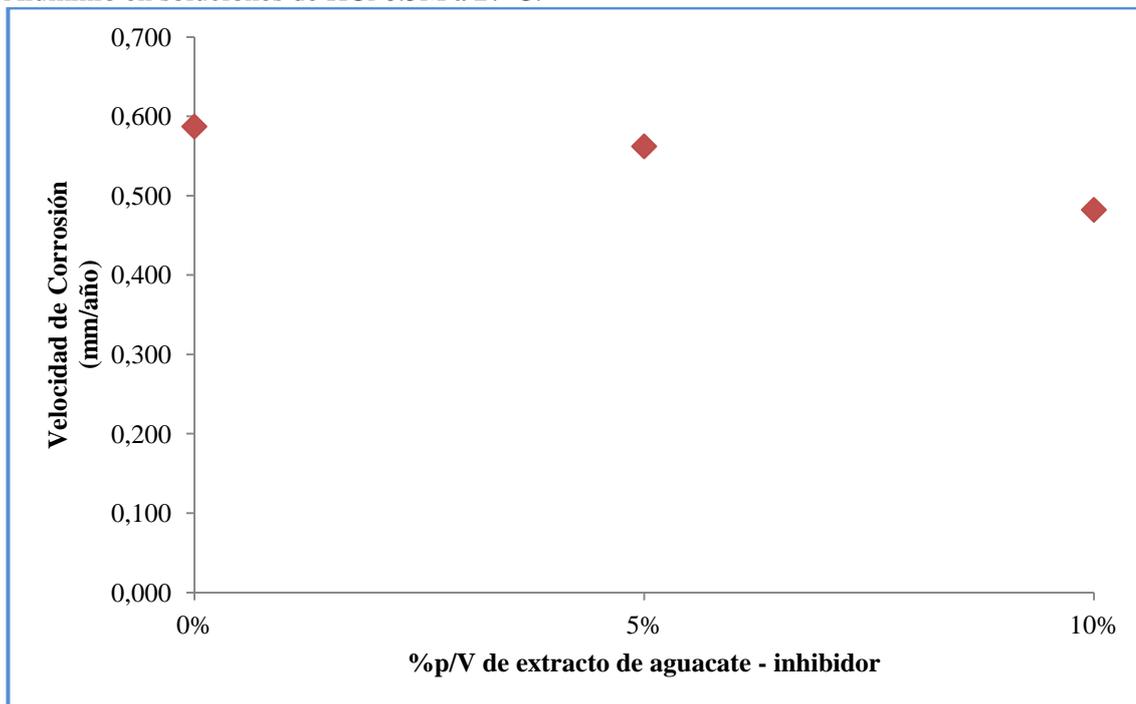
Figura 25. Curvas de Tafel para la corrosión del Aluminio en medio ácido HCl 0.5 M en presencia y ausencia de extracto de Aguacate a 27°C. Curve (10.DTA): 5% inhibidor - Curve (11.DTA): 10% inhibidor - Curve (12.DTA): 0% inhibidor.



Fuente: Realizada en esta investigación.

La Figura 26 muestra el comportamiento de la velocidad de corrosión del aluminio en soluciones de HCl al 0.5 M a diferentes concentraciones del inhibidor. En estas condiciones, la velocidad de corrosión se ve levemente reducida (4.1%) con una concentración del inhibidor del 5%. Al aumentar, la concentración hasta un 10%, la el proceso inhibitorio se ve levemente favorecido, reduciendo la velocidad de corrosión en un 17.9%.

Figura 26. Efecto de la concentración de inhibidor sobre la velocidad de corrosión del Aluminio en soluciones de HCl 0.5M a 27°C.



Fuente: Realizado en esta investigación.

Al igual que en las pruebas gravimétricas o de pérdida de peso se evidencia una menor efectividad del aguacate para inhibir la corrosión del aluminio, contrario a lo sucedido con el acero al carbono. La diferencia radica en la forma en que los constituyentes de los extractos actúan sobre el tipo de metal. Existe una mayor reactividad del acero al carbono con los taninos del extracto de aguacate, ya que estos son capaces de formar quelatos con los iones férricos y ferrosos del acero provocando un bloqueo en los sitios de formación de micro-ánodos, que se generan cuando la superficie metálica entra en contacto con el ácido clorhídrico y por lo tanto, retardan la disolución del metal (Ostovari et al., 2009).

La ausencia de iones aluminio en solución, los quelatos no pueden formarse para posteriormente ser absorbidos en la superficie del metal, lo que conlleva a una disminución de las eficiencias de inhibición para este metal.

5. CONCLUSIONES

- La obtención de los extractos se realizó a través de pasos sencillos y fáciles, lo que supone que su producción a escala industrial no representaría mayores inconvenientes.
- A partir del estudio fitoquímico se establece que el extracto de aguacate posee mayor concentración de taninos que en el extracto de tabaco. La presencia de estas sustancias en el aguacate promueve la formación de quelatos con los iones férricos y ferrosos que se desprenden del acero al entrar en contacto con la solución ácida.
- En el estudio de pérdida de peso, la velocidad de corrosión de los blancos fue mucho mayor que la de los cupones de prueba sumergidos en solución en presencia de extractos de aguacate y tabaco. Esto sugiere que ambos extractos actuaron como inhibidores de corrosión.
- El análisis del estudio de pérdida de peso, permitió establecer que el aguacate actúa con mayor eficiencia en el acero al carbono que en el aluminio, se obtuvo un porcentaje de inhibición de hasta el **98.1%**. Esto se debe a una mayor reactividad del acero al carbono con los taninos del extracto de aguacate.
- Para el caso del aluminio en la prueba de pérdida de peso, se obtuvo una eficiencia máxima de inhibición del **70.69%** con extracto de aguacate al 10% v/v. En todos los casos el extracto de aguacate superó la eficiencia del tabaco.
- En general se las eficiencias de inhibición aumentaron con la concentración del extracto en el medio corrosivo. Este comportamiento se atribuye al aumento de la superficie recubierta, debido al incremento del número de moléculas de extracto adsorbidas en la superficie metálica.

- Al comparar las eficiencias de inhibición del extracto de aguacate en acero al carbono y aluminio con otros estudios de pérdida de peso realizados con los mismos metales y medio corrosivo, se halla que los porcentajes obtenidos son bastante altos (**98.1** y **97.7%**), lo que revela el alto potencial que posee el aguacate para ser usado como inhibidor de corrosión.
- En cuanto a las pruebas electroquímicas, la adición de aguacate a la solución disminuyó marcadamente la corriente de corrosión; este comportamiento refleja la habilidad del extracto para inhibir la corrosión del acero al carbono en solución ácida HCl 0.5M.
- En el caso del acero al carbono, el extracto de aguacate disminuye las constantes anódicas catódicas, siendo menores para la mayor concentración del inhibidor 10% p/V. Este comportamiento sugiere que el extracto inhibe la corrosión del acero al carbono en este medio corrosivo, mediante la adsorción de sus moléculas en los sitios anódicos y catódicos y consecuentemente actúa como inhibidor mixto bajo las condiciones de estudio.
- En cuanto a la prueba electroquímica para el aluminio, la adición de extracto de aguacate disminuyó levemente la corriente de corrosión (**17.08%**) y consecuentemente no se obtuvieron excelentes porcentajes de inhibición, en comparación con los resultados del acero al carbono (**98.06%**).
- Existe buena concordancia entre los resultados de las pruebas electroquímicas y la prueba de pérdida de peso, en ambos estudios el extracto de aguacate, obtuvo mejores eficiencias de inhibición en el acero al carbono que en el aluminio.
- La eficiencia de inhibición del extracto de aguacate para el acero al carbono en medio ácido es bastante notable según los resultados obtenidos con porcentajes mayores al 90%. Este extracto tiene el potencial para ser utilizado como inhibidor de corrosión a nivel industrial. Las eficiencias de inhibición para el caso del aluminio,

no son tan notorias, sin embargo, el extracto logró disminuir la velocidad de corrosión en todos los casos estudiados.

6. RECOMENDACIONES

- Este estudio no realizó pruebas termométricas, por lo que se recomienda realizar estudios que permitan establecer la influencia del aumento de la temperatura en el proceso de inhibición de la corrosión del extracto de aguacate en medio ácido.
- Llevar a cabo ensayos que pongan a prueba la biodegradabilidad del extracto de aguacate, y uso a largo plazo en sistemas cerrados dinámicos, como por ejemplo sistemas de enfriamiento a escala piloto, entre otros.
- Probar con extractos de otras partes de la planta del aguacate, como las hojas, el tallo, la semilla o la cáscara de la fruta, de manera que se aproveche al máximo este recurso.
- Esta investigación es la primera en poner a prueba la eficiencia de inhibición del extracto de aguacate en la corrosión del acero al carbono y el aluminio en medio ácido. Se sienta un precedente, en el que se comprueba el alto potencial que tiene el aguacate para este fin. Se recomienda, continuar investigando y estudiando métodos para la creación de un inhibidor de corrosión industrial a partir del extracto de aguacate.
- Realizar el estudio con frutos de aguacate en estado de descomposición, no aptos para la alimentación y evaluar la eficiencia de inhibición.

REFERENCIAS

Abdallah, M., Radwan, M., Shahera, Shohayeb, S., Abdelhamed, S. (2010). Use of some natural oils as crude pipeline corrosion inhibitors in sodium hydroxide solutions. *Chem. Technol. Fuels Oils*. 46: 354-362.

Abdel, A., Abd, B., Sidahmed, I., El-Zayady, A., Saadawy, M. (2006). Inhibitive action of some plant extracts on the corrosion of steel in acidic media. *J. Corros. Sci. Eng.* 48: 2765–2779.

Abdel-Gaber, A., Khamis, E., Abo-ElDahab, H., Adeel, S. (2008). Inhibition of aluminium corrosion in alkaline solutions using natural compound. *Mater. Chem. Phys.* 109: 297-305.

Abdullah, D. (2011). A review: plant extracts and oils as corrosion inhibitors in aggressive media. *Industrial Lubrication and Tribology*. 63 (4) 227–233.

Acosta Moreno, M. C.(2011). Evaluación y escalamiento del proceso de extracción de aceite de aguacate utilizando tratamiento enzimático. Tesis Publicada, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

Ahmad, S. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review. *Cem. Concr. Compos.* (25) 459–471.

Ahmad, Z. (2006). Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control, (1): 1-8

Al-Qasmi, A. 2010. Natural Products as Corrosion Inhibitors of Some Metals in Aqueous Media. Tesis Publicada, Umm Al-Qura University, Arabia Saudi.

Al-Turkustani, A., Arab, S., Al-Qarni, L. (2011). Medicago Sativa plant as safe inhibitor on the corrosion of steel in 2.0M H₂SO₄ solution. *Journal of Saudi Chemical Society* 15: 73-82.

Ameer, M., Khamis, E., Al-Senani, G. (2000). Adsorption studies of the effect of thiosemicarbazides on the corrosion of steel in phosphoric acid. *Adsorption Science & Technology*. 18: 177-94.

Amitha, B. & Bharathi J. (2012) Green Inhibitors for Corrosion Protection of Metals and Alloys: An Overview. *International Journal of Corrosion* (2012): 1-15.

Anthony, N., Malarvizhi, E., Maheshwari, P., Rajendran, S., Palaniwamy, N. (2004). Corrosion Inhibition by caffeine – Mn⁺² system. *Indian J. Chem. Technol.* (11): 346-350.

Anuradhaa, K., Vimalab, R., Narayanasamy, B., Arockia, J., Rajendran, S. (2008). Corrosion inhibition of carbon steel in low chloride media by an aqueous extract of hibiscus rosa-sinensis linn. *Chem. Eng. Commun.* 195: 352-366.

Ávila, J. & Genescá, J. (2002) “Más allá de la herrumbre”. Fondo de Cultura Económica, México D. F. Tercera Edición. p. 20.

Benali, O., Larabi, L., Tabti, B., Harek, Y. (2005). Influence of 1-methyl-2-mercaptoimidazole on corrosion inhibition of carbon steel in 0.5M H₂SO₄. *Anti-Corros Methods Mater.* 52: 280-5.

Bothi, P., Sethuraman, M. (2008). Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media. *Mater Lett.* 62: 113 –11.

Botti, R., Sethuraman, M. (2009). Studies on the Inhibition of Mild Steel Corrosion by Rauwolfia serpentina in Acid Media. *J. Mater. Eng. Perform.* 19 (5):761–766.

Bouyanzer, A., Hammouti, B. (2004). A study of anti-corrosive effects of Artemisia oil on steel. *Pigm resin technol* . 33 (5): 287–292.

Chaieb, E., Bouyanzer, A., Hammouti, B., Benkaddour, B. (2005). Inhibition of the corrosion of steel in 1 M HCl by eugenol derivatives. *Appl. Surf. Sci.* 246: 199-206

Chen, D., Howe, K., Dallman, J., Bruce, C. (2008). Corrosion of aluminium in the aqueous chemical environment of a loss-of-coolant accident at a nuclear power plant. *Corros. Sci.* 50:1046–1057.

Chetouani, A., Hammouti, B., Benkaddour, M. (2004). Corrosion inhibition of iron in hydrochloric acid solution by jojoba oil. *Pigm resin technol.* 1(33): 26-31.

CONPES, Consejo Nacional de Política Económica y Social, Departamento Nacional de Planeación. 2011. Política Para El Desarrollo Comercial De La Biotecnología A Partir Del Uso Sostenible De La Biodiversidad.

Dahmani, M., Et-Touhami, A., Al-Deyab, S., Hammouti², B., Bouyanzer, A. (2010). Corrosion Inhibition of C38 Steel in 1 M HCl: A Comparative Study of Black Pepper Extract and Its Isolated Piperine. *Int. J. Electrochem. Sci.* 5:1060 – 1069.

Davis, J. (2000). Corrosion: understanding the basics. Estados Unidos: ASM international. p. 1-5.

Dong, L., Yuanhua, L., Yigang, Ding., Dezhi, Z. (2011). Corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid solution by rice bran extracts. *Anti-Corros. Methods Mater.* 58(4): 205-210.

Dong,L., Yuanhua, L., Yigang, D., Dezhi,Z. (2011). Corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid solution by rice bran extracts *Anti-Corros. Methods Mater.* (58): 205–210.

Ebenso, E.,Oguzie, E. (2005). Corrosion inhibition of mild steel in acidic media by some organic dyes *Mater Lett.* 59: 2163-5.

Eddy, N. (2010). Adsorption and inhibitive properties of ethanol extract of *Garcinia kola* and *Cola nitida* for the corrosion of mild steel in H₂SO₄. *Pigm resin technol.* 28 (1): 348–354.

Eddy, N., Odiongenyi, A. (2010). Corrosion inhibition and adsorption properties of ethanol extract of *Heinsia crinata* on mild steel in H₂SO₄. *Pigm resin technol.* 39 (5): 288–295.

Eldredge, G., Warner,J., Uhlig, H. (1948). *The Corrosion Handbook*. Wiley, New York, p. 905.

El-Etre, A. (2003). Inhibition of aluminum corrosion using *Opuntia extract*. *J. Corros. Sci.* 45: 2485–2495.

El-Rehim, S., Hassan, H., Amin, M.A. (2001). Synergistic effect of combining ionizing radiation and oxidizing agents on controlling degradation of Na-alginate for enhancing growth performance and increasing productivity of zea maize plants. *Mater. Chem. Phys.* 70:64–72.

El-Sayed, E., Al-Odwani, A., Ahmed, Al-Tabtabaei, M. (2006). Process design and performance of an MSF distillation test unit for corrosion studies. *Desalination* 201: 23-34.

Farooqi, I. Hussain, A. Quraishi, M. Saini, P. (1999). Study of low cost eco-friendly compounds as corrosion inhibitors for cooling systems. *Anti-Corros. Methods Mater.* 46 (5): 328-331.

Figueroa, H. (2011, 15 de Julio). Aguacates de El Carmen, a Agroexpo. *El Universal*.

Forsala, I., Lakhrissib, L., Najib, K., Abirouc, S., Touhamia, M., Lakhrissib, B., Addouc, M. (2010). The Efficiency of Corrosion Inhibitor as Given by electrochemical Impedance Spectroscopy Tafel Polarization and Weight-Loss Measurements *Spectrosc. Lett.* 43 (2):136–143.

Fraunhofer Von, J. inventor; Inhibitrol Inc, titular. Coatings Including Tobacco Products As Corrosion Inhibitors. Us patent: 20080295728. 2008 abril 12.

Gamry Echem Analyst 5.58, 2009. “Quantitative Corrosion Theory” y “Tafel Fit”.

Gómez, F. & Alcaraz, D. (2004) Manual básico para ingenieros. Murcia, España: Universidad de Murcia.. p. 62-65.

Gomma, G. (1998). Corrosion of low carbon steel in sulphuric acid solution in the presence of pyrazole-halides mixture, *Mater. Chem. Phys.* 55:241-6.

Gudze, M., Melchers, R. (2008). Operational based corrosion analysis in naval ships. *Corros. Sci.* 50:3296–3307.

Hall, V., Rocha, M. & Rodriguez, E. (2002). Plantas medicinales. Centro Nacional de información de medicamentos. Consultado el 25 de marzo de 2012: <http://sibdi.ucr.ac.cr/boletinespdf/cimed27.pdf>

Hazwan Hussin M, Jain Kassim M. (2011). The corrosion inhibition and adsorption behavior of *Uncaria gambir* extract on mild steel in 1M HCl. *Mater. Chem. Phys.* 125: 461–468.

Huu, N. (2004). The inhibition of copper corrosion in aqueous environments heterocyclic compounds. Tesis de doctorado. Universidad Tecnológica de Queensland.

Kalaiselvi, P., Chellammal, S., Palanichamy, S., Subramanian, G. (2010). *Artemisia pallens* as corrosion inhibitor for mild steel in HCl médium. *Materials Chemistry and Physics*.120: 643–648.

Kelly, R., Scully, J., Shoesmith, D. & Buchheit, R. (2002). *Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering*. New York, USA: Marcel Dekker, Inc. 50-52.

Kharchenko, U., Makarenko, N., Safronov, P., Karabtsov, A., Kovekhova, A., Zemnukhova, L. (2008). Effect of Wastes Formed in Processing of Vegetable Raw Material on the Corrosion of Steel in Corrosive Media. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 81 (9): 1484–1489.

Lahhit, N., Bouyanzer, A., Desjobert, J., Hammouti, B., Salghi, R., Costa, J., Jama, C., Bentiss, F., Majidi, L. (2011). Fennel (*Foeniculum Vulgare*) Essential Oil as Green Corrosion Inhibitor of Carbon Steel in Hydrochloric Acid Solution. *Portugaliae Electrochimica Acta* 29(2): 127-138.

Lebrini, M., Robert, F., Roos, C. (2011). Alkaloids Extract from *Palicourea guianensis* Plant as Corrosion Inhibitor for C38 Steel in 1 M Hydrochloric Acid Medium. *Int. J. Electrochem. Sci.*6: 847 – 859

Lecante, F., Robert, P., Blandinières, P., Roos C., (2011). Anti-corrosive properties of *S. tinctoria* and *G. ouregou* alkaloid extracts on low carbon steel. *Curr. Appl Phys.* 11: 714-724.

Mantenimiento L A, (2001), Recuperado el 25 de mayo de 2012. Disponible en: <http://mantenancela.blogspot.com/2011/09/corrosion-y-su-control-parte-i.html>.

Nahle, A., Abu, I., Abdel, I., Al-Khayat, M. (2010). UAE *Neem* Extract as a Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in HCl Solution. *Int J Corros.*

Nagarajana, P., Princya, J., Ezhilarasia, J., Kavitha, D., Sulochana, N. (2009). Natural Product Extract as Eco-friendly Corrosion Inhibitor for Commercial Mild Steel in 1M HCl-Part II. *J. Ind. Council Chem.* 2 (26): 153-157.

Noor, E. (2009). Potential of aqueous extract of Hibiscus sabdariffa leaves for inhibiting the corrosion of aluminum in alkaline solutions. *J Appl Electrochem* 39:1465–1475.

Obi-Egbedi, O., Obot, I., Umoren, S. (2010). Spondias mombin L. as a green corrosion inhibitor for aluminium in sulphuric acid: Correlation between inhibitive effect and electronic properties of extracts major constituents using density functional theory. *Arabian J. Chem* (xxx): xxx

Oguzie, E. (2008). Evaluation of the inhibitive effect of some plant extracts on the acid corrosion of mild steel. *J. Corros. Sci. Eng.* 50: 2993–2998.

Oguzie, E., Onuoha, G., Onuchukwu, A. (2004b). Inhibitory mechanism of mild steel corrosion in 2M sulphuric acid solution by methylene blue dye. *Mater. Chem. Phys.* 89: 305-11.

Oguzie, E., Unaegbu, C., Ogukwe, C., Okolue, B., Onuchukwu, A. (2004c). Inhibition of mild steel corrosion in sulphuric acid using indigo dye and synergistic halide additives, *Mater. Chem. Phys.* (84): 363-8.

Okafor, P., Ebenso, E. (2007). Inhibitive action of Carica papaya extracts on the corrosion of mild steel in acidic media and their adsorption characteristics. *Pigm resin technol.* 36 (8): 134–140.

Okafor, P., Ebenso, E., Ekpe, E. (2010). *Azadirachta Indica* Extracts as Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Acid Medium. *Int. J. Electrochem. Sci.* 5: 978 – 993

Okafor, P., Ikpi, M., Uwaha, I., Ebenso, E., Ekpe, E., Umoren, S. (2008) Inhibitory action of *Phyllanthus amarus* extracts on the corrosion of mild steel in acidic media. *Corros. Sci.* 50: 2310–2317.

Omuro, K., Cruz, I., Fatibello, O. (2002). Flow injection spectrophotometric determination of isoproterenol using an avocado (*Persea americana*) crude extract immobilized on controlled-pore silica reactor. *Arabian J. Chem.* 57: 135-143.

Pinilla, P., Bastidas, j. & mora, E. (2002). Corrosión del cobre en medio ácido y su inhibición mediante compuestos cíclicos nitrogenados. Tesis Publicada, Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.

Rahim, A. & Kassim. (2008). Recent development of vegetal tannins in corrosion protection of iron and steel. *Recent patents on materials science.* (1): 223- 231.

Redacción Agroeconómica (2010, 10 de Mayo). Aguacate con más mercado. El Universal, p xx.

Restrepo, C., Simonoff, J., Zimmerman, R. (2009). Causes, cost consequences, and risk implications of accidents in US hazardous liquid pipeline infrastructure. *Int. J. Crit. Infrastruct. Prot.* (2) 38-50.

Rizzo, G., (2004). Investigation of Potential Environmental Impacts due to the use of Phosphate-based Corrosion Inhibitors in the District of Columbia. *United States Environmental Protection Agency*. Consultado el 20 de febrero de 2012. http://www.epa.gov/dclead/Impacts_report_final.pdf

Roberge, P. (1999). Handbook of corrosion engineering. Estados Unidos: McGraw Hill.
Sathiyathan, R., Maruthamuthu, S., Selvanayagam, M., Mohanan, S., Palaniswamy, N. (2005). Corrosion inhibition of mild steel by ethanolic extract of *Rinicius communis* leaves. *Ind. J. Chem. Tech.* 12: 356- 360.

Satapathy, A., Gunasekaran, G., Sahoo, S., Amit, K., Rodrigues, P. (2009). Corrosion inhibition by *Justicia gendarussa* plant extract in hydrochloric acid solution. *Corrosion Science*. 51: 2848–2856.

Satri, V. (2011). Green Corrosion inhibitors. Theory and Practice. New Jersey: Winston Revie. p 167.

Sethuraman, M., Bothi, P. (2005). Corrosion inhibition of mild steel by *Datura metel* in acidic medium, *Pigm resin technol*. 34: 237-331.

Silveira, R., Cassel, E. & Schermann, D. (2012). BlackWattle Tannin As Steel Corrosion Inhibitor. BlackWattle Tannin As Steel Corrosion Inhibitor. 2012: 1-19.

Shuduan Deng & Xianghong Li. (2012). Inhibition by *Jasminum nudiflorum* Lindl. leaves extract of the corrosion of aluminium in HCl solution. *Corros. Sci*. 64: 253–262.

Umoren, S., Obot, I., Ebenso, E., Obi, N. (2009). The Inhibition of aluminium corrosion in hydrochloric acid solution by exudate gum from *Raphia hookeri*. *Desalination*. 247:561–572.

Umoren, S., Obot, I., Ebenso, E., Okafor, P., OGBOBE, O., Oguzie, E. (2006). Gum arabic as a potential corrosion inhibitor for aluminium in alkaline medium and its adsorption characteristics. *Anti-Corros. Methods Mater*. 53 (5): 277–282.

Vashi, E., Kadiya, H. (2009). Corrosion Study of Metals in Marine Environment. *Journal of Chemistry*. 4: 1240-1246

Xianghong Li, Shuduan Deng & Hui Fu. (2012). Inhibition of the corrosion of steel in HCl, H₂SO₄ solutions by bamboo leaf extract. *Corros. Sci*. 62: 163–17.

Yaro, A., Khadom, A., Ibraheem, H. (2011). Peach juice as an anti-corrosion inhibitor of mild steel. *Anti-Corros. Methods M* 58 (3): 116–124.

ANEXOS

Anexo A. 1 prueba fotoquímica a las muestras de extractos de aguacate y tabaco.



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827

TABACO

PARÁMETRO	RESULTADO	LIMITE DETECCION	MÉTODO
ACEITES Y GRASAS%	NO DETECTABLE	0.10	EXTRACCION SOXHLCT
SAPONINAS%	NO DETECTABLE	0.10	PRUEBA DE LA ESPUMA
TANINOS%	1.25		GELATINA - SAL
FENOLES%	0.98		FOTO COLIVIMETRIA

AGUACATE

PARÁMETRO	RESULTADO	LIMITE DETECCION	MÉTODO
ACEITES Y GRASAS%	4.88		EXTRACCION SOXHLCT
SAPONINAS%	NO DETECTABLE	0.10	PRUEBA DE LA ESPUMA ABUNDANTE
TANINOS%	2.01		GELATINA - SAL
FENOLES%	1.26		FOTO COLIVIMETRIA



Facultad de Ciencias Farmacéuticas
Unidad de Prestacion de Servicio
Rafael Ruiz Arango
Campus de Zaragocilla, Área de la Salud
Teléfonos: 6698277
email: pserviciofcqf@yahoo.es
web: www.unicartagena.edu.co
Cartagena de Indias, D.T. y C. - Colombia

Anexo B. Datos de prueba de pérdida de peso de los cupones de prueba.

Tabla B.1: Datos Prueba de pérdida de peso para el Aluminio inmerso en HCl 0.5 M

EXTRACTO	TIEMPO	24h	48h	72h	96h	168h	192h	216h	240h	264h	Pendiente g/h
	Concentración	W1 (g)	W2 (g)	W3 (g)	W4 (g)	W5 (g)	W6 (g)	W7 (g)	W8 (g)	W9 (g)	
AGUACATE	10%	0.045	0.148	0.205	0.311	0.648	0.696	0.717	0.721	0.728	0.0977
AGUACATE	5%	0.075	0.128	0.176	0.315	0.703	0.721	0.778	0.784	0.8	0.108
TABACO	10%	0.04	0.137	0.167	0.292	0.864	0.909	0.938	1.003	1.017	0.1444
TABACO	5%	0.059	0.153	0.188	0.366	1.259	1.288	1.308	1.321	1.345	0.1968
BLANCO	0%	0.858	0.998	1.032	1.096	1.499	1.541	1.824	2.183	2.501	0.202

Tabla B.2: Datos Prueba de pérdida de peso para el Aluminio inmerso en HCL 1 M

EXTRACTO	TIEMPO	24h	48h	72h	96h	168h	192h	216h	240h	264h	Pendiente g/h
	Concentración	W1 (g)	W2 (g)	W3 (g)	W4 (g)	W5 (g)	W6 (g)	W7 (g)	W8 (g)	W9 (g)	
AGUACATE	10%	0.005	0.016	0.02	0.029	0.06	0.075	0.081	0.086	0.089	0.0119
AGUACATE	5%	0.004	0.011	0.02	0.032	0.067	0.079	0.087	0.098	0.11	0.0144
TABACO	10%	0.006	0.011	0.022	0.033	0.07	0.083	0.191	0.199	0.309	0.0361
TABACO	5%	0.004	0.012	0.047	0.057	0.105	0.119	0.14	0.219	0.246	0.0306
BLANCO	0%	0.008	0.017	0.053	0.081	0.179	0.207	0.229	0.263	0.313	0.0406

Tabla B.3: Datos Prueba de Pérdida de Peso para el Acero al carbono inmerso en HCl 1M

EXTRACTO	TIEMPO	24h	48h	72h	96h	168h	192h	216h	240h	264h	Pendiente g/h
	Concentración	W1 (g)	W2 (g)	W3 (g)	W4 (g)	W5 (g)	W6 (g)	W7 (g)	W8 (g)	W9 (g)	
AGUACATE	10%	1.07	1.201	1.26	1.261	1.265	1.269	1.28	1.289	1.31	0.0212
AGUACATE	5%	1.282	1.325	1.327	1.328	1.418	1.419	1.443	1.457	1.492	0.026
TABACO	10%	1.198	1.29	1.295	1.3	2.295	2.32	2.405	2.507	2.61	0.209
TABACO	5%	1.268	1.336	1.34	1.344	1.683	1.748	2.068	2.156	2.375	0.1458
BLANCO	0%	2.207	3.821	6.167	7.185	10.162	10.37	10.56	10.185	11.204	1.117

Tabla B.4: Datos Pérdida de Peso en Acero al carbono inmerso en HCl 0.5M

TIEMPO		24h	48h	72h	96h	168h	192h	216h	240h	264h	Pendiente g/h
EXTRACTO	Concentración	W1 (g)	W2 (g)	W3 (g)	W4 (g)	W5 (g)	W6 (g)	W7 (g)	W8 (g)	W9 (g)	
AGUACATE	10%	0.048	0.151	0.234	0.355	0.69	0.768	0.808	0.856	0.871	0.1161
AGUACATE	5%	0.125	0.237	0.329	1.281	2.483	2.719	2.896	2.946	2.959	0.4339
TABACO	10%	0.127	0.271	0.339	0.504	2.395	2.543	2.645	2.732	2.844	0.415
TABACO	5%	0.203	0.345	0.43	0.65	1.616	1.923	2.124	2.298	2.424	0.3234
BLANCO	0%	2.065	2.701	2.724	3.165	5.045	6.156	6.392	6.906	7.495	0.7444