

**ESTUDIO DE LA EFICIENCIA INHIBIDORA DE CORROSIÓN CON UN IMPACTO
FAVORABLE AL MEDIO AMBIENTE A PARTIR DEL RESIDUO DE CAFÉ PARA SU
APROVECHAMIENTO EN EL SECTOR INDUSTRIAL**

NÉSTOR ALONSO AGUILAR MARTÍNEZ
JERSON JAVIER CARABALLO LAREUS

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. & C.

2016

**ESTUDIO DE LA EFICIENCIA INHIBIDORA DE CORROSIÓN CON UN IMPACTO
FAVORABLE AL MEDIO AMBIENTE A PARTIR DEL RESIDUO DE CAFÉ PARA SU
APROVECHAMIENTO EN EL SECTOR INDUSTRIAL**

**NÉSTOR ALONSO AGUILAR MARTÍNEZ
JERSON JAVIER CARABALLO LAREUS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**DIRECTOR
PhD. LUIS MARCOS CASTELLANOS GONZÁLEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. & C.**

2016

Cartagena de Indias D, T y C. 11 de julio del 2016.

Señores.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

Facultad de Ingeniería Mecánica.

Comité Evaluador de Trabajo de Grado.

Cordial saludo

Por medio de la presente nos permitimos someter a su consideración el trabajo de grado titulado **“ESTUDIO DE LA EFICIENCIA INHIBIDORA DE CORROSIÓN CON UN IMPACTO FAVORABLE AL MEDIO AMBIENTE A PARTIR DEL RESIDUO DE CAFÉ PARA SU APROVECHAMIENTO EN EL SECTOR INDUSTRIAL.”**, de los estudiantes NÉSTOR ALONSO AGUILAR MARTÍNEZ y JERSON JAVIER CARABALLO LAREUS, para optar por el título de Ingeniero Mecánico.

Cordialmente,

NÉSTOR ALONSO AGUILAR MARTÍNEZ

C.C. 1.143.383.407

JERSON JAVIER CARABALLO LAREUS

C.C. 1.143.374.357

Cartagena de Indias D, T y C. 11 de julio del 2016.

Señores.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

Facultad de Ingeniería Mecánica.

Comité Evaluador de Trabajo de Grado.

Cordial saludo

Por medio de la presente nos permitimos someter a su consideración el trabajo de grado titulado **“ESTUDIO DE LA EFICIENCIA INHIBIDORA DE CORROSIÓN CON UN IMPACTO FAVORABLE AL MEDIO AMBIENTE A PARTIR DEL RESIDUO DE CAFÉ PARA SU APROVECHAMIENTO EN EL SECTOR INDUSTRIAL.”**, de los estudiantes NÉSTOR ALONSO AGUILAR MARTÍNEZ y JERSON JAVIER CARABALLO LAREUS, en el que me desempeño como director.

Cordialmente,

PhD. LUIS MARCOS CASTELLANOS GONZÁLEZ

Director de trabajo de grado.

Nosotros, NÉSTOR ALONSO AGUILAR MARTÍNEZ y JERSON JAVIER CARABALLO LAREUS, mayores de edad y domiciliados en la ciudad de Cartagena D. T. y C. e identificados como consta al pie de la presente, de manera libre y espontánea, manifestamos en este documento nuestra voluntad de ceder a la **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR** los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado “**ESTUDIO DE LA EFICIENCIA INHIBIDORA DE CORROSIÓN CON UN IMPACTO FAVORABLE AL MEDIO AMBIENTE A PARTIR DEL RESIDUO DE CAFÉ PARA SU APROVECHAMIENTO EN EL SECTOR INDUSTRIAL.**” producto de nuestra actividad académica para optar al título de **INGENIERO MECÁNICO** de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la ley 23 de 1982. Con todo, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la ley 23 de 1982. En concordancia suscribimos este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entregamos al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

Dado en la ciudad de Cartagena de Indias D. T. y C., a los 11 días del mes de Julio de 2016.

NÉSTOR ALONSO AGUILAR MARTÍNEZ
C.C. 1.143.383.407

JERSON JAVIER CARABALLO LAREUS
C.C. 1.143.374.357

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Cartagena de Indias D.T. y C., 11 de Julio de 2016

DEDICATORIA NÉSTOR AGUILAR

No seas sabio en tu propia opinión; Teme a Jehová, y apártate del mal; Porque será medicina a tu cuerpo, Y refrigerio para tus huesos. Honra a Jehová con tus bienes, Y con las primicias de todos tus frutos. Proverbios 3 Vers. 7-9

A mi padre Jorge Luis Aguilar Payares, por sus consejos y reprensiones, hombre soñador, audaz y valiente, quien me enseñó que el trabajo duro tiene excelentes recompensas, a ser autónomo de mis decisiones y hacerme responsable de sus consecuencias, gracias por todo padre mío, es un orgullo ser tu hijo.

A mi mama Vicky María Martínez Atencio por tu infinito apoyo a lo largo de toda mi vida, por protegerme y guiarme a ser un hombre de bien, hoy tengo la oportunidad de cumplir este sueño.

A mis tías queridas Magola Aguilar Payares, Judith Aguilar Payares, Sol Teresa Aguilar Payares, mis segundas madres por su apoyo incondicional, estoy alcanzando un logro más en mi vida, Dios las bendiga hoy y siempre.

A mi compañero Jerson Caraballo Lareus, compañero de mil batallas, por tu entrega a esta investigación y perseverancia durante todo este proceso, compartimos muchas experiencias que por siempre tendré en mi memoria.

A nuestro directo, PhD Luis Marcos Castellanos por su apoyo incondicional durante esta investigación, por su orientación que me ha dado un norte en mi formación profesional.

A todos mis compañeros y docentes que me han acompañado en mi formación profesional a lo largo de mi carrera.

Néstor Alonso Aguilar Martínez

DEDICATORIA JERSON CARABALLO

A Dios le doy las gracias por la vida, por brindarme la sabiduría para sobrellevar los propósitos que he afrontado en mi vida, por la oportunidad de alcanzar esta gran meta, que se convierte en un pilar grande para la realización de nuevos objetivo.

A mis padres Fernando Caraballo y Bertha Lareus, por el gran apoyo que me brindan en cada sueño u objetivo trazado en mi vida. Por siempre estar ahí cuando más los necesito en mis alegrías, problemas y triunfos. Ellos se han convertido en motor que me ha ayudado avanzar en mi vida.

A mi compañero Néstor Aguilar por su dedicación, acompañamiento y compromiso con esta investigación que surgió como un sueño y que hoy es hecha realidad. Por las experiencias Académicas y de vida que hemos podido compartir durante nuestra formación como profesional.

A nuestro directo, PhD Luis Marcos Castellanos, más que un docente que nos ha apoyado en esta investigación lo considero como un padre académico, que ha influido de manera positiva a mi formación integral como profesional.

A todos mis compañeros y docentes que me han acompañado en mi formación profesional a lo largo de mi carrera.

Jerson Javier Caraballo Lareus

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros agradecimientos a:

PhD. Luis Marco Castellanos González, por todo el apoyo y conocimiento incondicional brindado durante el proceso de formación integral como estudiantes de pregrado. Sus recomendaciones así como cada una de sus instrucciones fueron de mucha importancia para el desarrollo satisfactorio de la investigación y agradecerle ante todo por su confianza puesta en nosotros para llevar a cabo este proceso.

Al **Msc. Pedro Meza Castellar**, por su colaboración y conocimiento brindando durante todo el desarrollo de la investigación, proporcionándonos información importante para llevar a cabo este trabajo.

A todos los docentes e instructores de laboratorio de la Universidad Tecnológica de Bolívar que contribuyeron en nuestra formación como profesionales íntegros.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	15
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	16
3. OBJETIVO GENERAL.....	17
4. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	18
5. JUSTIFICACIÓN.....	19
6. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	20
6.1. ESTADO DEL ARTE.....	20
7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	22
7.1. CORROSIÓN.....	22
7.2. POTENCIAL DE CORROSIÓN.....	23
7.3. IMPACTO ECONÓMICO DE LA CORROSIÓN.....	24
7.4. MECANISMO DE LA CORROSIÓN.....	25
7.5. MORFOTIPOS DE LA CORROSIÓN.....	26
7.5.1. Por la naturaleza de las sustancia corrosiva.....	26
7.5.2. Por los mecanismos de corrosión.....	27
7.5.3. Por la aparición del metal corroído.....	28
7.6. INHIBIDOR DE CORROSIÓN.....	30
7.7. CLASIFICACIÓN DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN.....	31
7.8. INHIBIDORES ANÓDICOS.....	32
7.9. INHIBIDORES CATÓDICOS.....	32
7.10. INHIBIDORES MIXTOS.....	32
7.11. INHIBIDORES DE CORROSIÓN A BASE DE EXTRACTO DE PLANTAS.....	33
7.12. CONSIDERACIONES A EMPLEAR INHIBIDORES.....	33
7.13. VELOCIDAD DE CORROSIÓN.....	34
7.14. EFICIENCIA DE INHIBICIÓN.....	34
8. METODOLOGÍA.....	35

8.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	35
8.2. LUGAR DE REALIZACIÓN Y TIEMPO DEL PROYECTO.....	35
8.3. DISEÑO EXPERIMENTAL UTILIZADO.....	35
8.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	37
8.4.1. Obtención de los extractos de residuo de café.....	37
8.4.2. Probetas utilizadas.....	37
8.4.3. Concentración de los extractos.....	37
8.4.4. Pruebas de pérdida de masas.....	37
8.5. DIAGRAMA DE PARETO.....	39
8.6. HIPÓTESIS.....	40
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
9.1.CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA.....	40
9.2.DETERMINACIÓN DE LAS VELOCIDAD DE CORROSIÓN.....	41
9.3.EFICIENCIA DE INHIBICIÓN DE LOS EXTRACTOS.....	43
9.4. ANÁLISIS DE VARIANZA Y DIAGRAMA DE PARETO.....	45
10. CONCLUSIONES.....	48
11. RECOMENDACIONES.....	49
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
13. ANEXOS.....	53

LISTADO DE FIRUGA

Figura 1. Curvas de corrientes anódicas y catódicas por la corrosión de un metal.....	23
Figura 2. Clasificación de los inhibidores de corrosión de acuerdo a su origen.....	31
Figura 3. Recipientes para las pruebas de pérdida de masa.....	38
Figura 4. Ejemplo diagrama de Pareto.....	39
Figura 5. Formula de la cafeína, un alcaloide estimulante.....	40
Figura 6. Velocidades de corrosión promedio de cada probeta.....	42
Figura 7. Diagrama de Pareto estandarizado para la eficiencia de inhibición.....	46

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Factores evaluados en el diseño experimental.....	35
Tabla 2. Corridas experimentales.....	36
Tabla 3. Velocidades de corrosión promedio.....	41
Tabla 4. Eficiencia de inhibición (Primera semana).....	43
Tabla 5. Eficiencia de inhibición (Segunda semana).....	44
Tabla 6. Análisis de varianza para la eficiencia de inhibición.....	45
Tabla 7. Análisis de varianza para la eficiencia de inhibición, excluyendo interacciones.....	45
Tabla 8. Optimización de respuesta.....	46

1. INTRODUCCIÓN

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 los diversos métodos para evitar o prevenir la destrucción o degradación de los metales, el uso de inhibidores de corrosión es uno de los métodos más prácticos para proteger los metales de la corrosión, también es uno de los más implementados de la industria (Tejada, Meza, Altamiranda & Berrocal, 2014). Sin embargo la mayoría de estos inhibidores son tóxicos y generan un gran riesgo al medio ambiente y a los seres humanos.

Por este motivo el desarrollo de inhibidores de corrosión ambientales a partir del extracto de productos naturales, es una alternativa para disminuir la toxicidad presente en el ambiente, y también contribuye al reemplazo de los inhibidores tradicionales.

El uso de compuestos naturales suelen ser de interés, por su abundante disponibilidad, no son tóxicos y son ambientalmente amigables. Entonces algunos extractos de plantas, frutos, semillas, cáscaras y raíces que contengan taninos, alcaloides, grasas y aceites, carbohidratos, entre otros compuestos fitoquímicos con presencia de nitrógeno, oxígeno y fósforos han demostrado tener una alta eficiencia al momento de disminuir la velocidad de corrosión (Deng & Li, 2012).

Es por ello que esta investigación tiene como objeto el estudio de inhibidores de corrosión ambientales a partir de los residuos de café de la tienda Juan Valdez de la ciudad de Cartagena y comparar su eficiencia en medios ácidos y salinos para acero al carbono, mediante la técnica de pérdida de masa estática.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La costa caribe es una de las zonas más afectadas por el fenómeno de la corrosión, esto es debido a que tenemos todos los factores ambientales como: grandes sectores industriales, elevada salinidad, elevadas temperaturas y alta humedad, según la norma UNE ISO 14713 esta zona del país ocupa la categoría C5 que influyen un riesgo de corrosión muy elevando.

Debido a esto las industrias han tomado medidas para mitigar y prevenir el proceso de corrosión en sus plantas de operación. Para precaver el daño por corrosión de tuberías, tanques de mezclado, tubos en espiral, y otras superficies metálicas, la formación de ácidos necesita ser inhibida por el uso de una solución efectiva de inhibidores de corrosión (Finšgar y Jackson, 2014).

Los inhibidores más implementados en la industria son los de compuestos sintéticos, la mayoría de ellos pueden ser demasiado costosos y peligrosos debido a su alta toxicidad, para los seres humanos y el medio ambiente. Los inhibidores sintéticos pueden llegar a las aguas naturales y ser distribuidos en los ecosistema afectando especies sensibles a sus componentes (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 se han venido desarrollando inhibidores naturales a base de extractos de plantas, raíces, frutos, tallos y hojas, como una alternativa de solución, debido a que estos han demostrado tener sustancias que ayudan en el proceso de inhibición. Esta investigación ha llevado a evaluar la eficiencia de inhibición del residuo de café de la tienda Juan Valdez.

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Se puede obtener sustancia inhibidora de corrosión a partir del extracto de residuo de café?

3. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la eficiencia inhibidora de la corrosión del residuo del café mediante pruebas de pérdida de masa para su aprovechamiento en el sector industrial.

4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una caracterización fitoquímica para establecer las sustancias inhibidoras que posee el residuo de café.
2. Calcular la velocidad de corrosión a partir de pruebas de pérdida de masa para la determinación de la eficiencia inhibidora.
3. Hacer uso de software estadísticos para el análisis de varianza de los datos obtenidos mediante el ensayo de pérdida de masa.
4. Determinar por medio de un diagrama de Pareto en que medio es más eficiente el inhibidor de corrosión a base de residuos de café.
5. Elaborar un artículo científico para la publicación en una revista científica.

5. JUSTIFICACIÓN

Actualmente se avanzan investigaciones en pro del desarrollo de inhibidores de corrosión no tóxicos y amigables al ambiente, que contribuyan a los problemas de corrosión presentes en la zona industrial de la ciudad de Cartagena. Debido a las causas y posibles soluciones en el problema fenómeno de la corrosión se justifica el presente trabajo de acuerdo a los siguientes aspectos.

- a. Hasta la fecha no se reportan investigaciones sobre el uso de residuos de café como inhibidor de corrosión, siendo así una investigación de carácter innovador.
- b. El inhibidor de corrosión a base de residuo de café generara un gran ahorro económico para las industrias que deseen emplearlos.

Este trabajo permite a los estudiantes de pregrado desarrollar investigaciones, para lograr un progreso satisfactorio en la creación de las competencias propias de un Ingeniero Mecánico.

6. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

6.1. ESTADO DEL ARTE

Actualmente los desarrollos de inhibidores de corrosión de metales apuntan a inhibidores a base de extractos de plantas en medios ácidos y salinos, estos han demostrado ser la mejor alternativa para el desarrollo de inhibidores por ser amigables al medio ambiente y mostrar buenos resultados a la hora de probar su eficiencia.

Los peligros de la mayoría de los inhibidores orgánicos sintéticos se conocen comúnmente y las nuevas legislaciones ambientales, como la Ley de Control de Sustancias Tóxicas de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos y la Directiva de Restricción de Sustancias Peligrosas de la Unión Europea, generan la necesidad de desarrollar inhibidores de corrosión ambientalmente amigables, que no contengan metales pesados como el cromo y plomo o compuestos orgánicos. Debido a esta razón se ha sugerido el uso de extractos de plantas como inhibidores de corrosión. La mayoría de los inhibidores naturales no son tóxicos, son biodegradables y son abundantes en la naturaleza. (Tejada, Meza, Altamiranda & Berrocal, 2014). Los estudios más recientes de inhibidores naturales entre los que se encuentran:

El extracto de hojas de Neem se encontró altamente eficiente para inhibir la corrosión del acero al carbono en soluciones de HCl 1,0 M, alcanzando eficiencias de alrededor de 87% a temperatura ambiente, con una concentración de 3g/L del extracto (Nahle *et al.*, 2010).

El extracto de hojas de *Olea europaea L*, conocida como olivo, se usó como inhibidor de la corrosión para superficies de acero en una solución de salmuera. Las características inhibidoras se investigaron mediante impedancia electroquímica (EIS) y curvas de polarización potenciodinámicas. El mecanismo de inhibición de incrustaciones se atribuyó a la formación del complejo de cafeato de calcio, que se adsorbe en la superficie del acero en una etapa temprana, envenenando los núcleos cristalinos alrededor de ellos.

Las curvas de polarización potenciodinámicas indicaron que el extracto de hoja de olivo puede inhibir la corrosión del acero y la acumulación de cal (Abdel-Gaber *et al.*, 2011).

El extracto de *Tagetes erecta*, conocida como Flor de la maravilla, utilizado como inhibidor de corrosión en solución de 0,5 M de H₂SO₄ por medio de gravimetría, polarización potenciodinámica y mediciones espectroscópicas de impedancia electroquímica; el extracto actuó como un inhibidor de tipo mixto, es decir, catódico y anódico; la adsorción del inhibidor en la superficie de acero dulce siguió la isoterma de adsorción de Langmuir, lo que indicó la adsorción monocapa. Los parámetros de activación que rigen la adsorción mostraron que el inhibidor se adsorbió físicamente (Mourya *et al.*, 2014).

El extracto de corteza de patilla se usó como inhibidor de la corrosión de acero dulce en soluciones de HCl y H₂SO₄. La adsorción siguió el modelo de la isoterma de Temkin. El extracto se comportó como un inhibidor de tipo mixto en ambos medios; siendo el mejor en HCl que en solución de H₂SO₄ (Odewunmi *et al.*, 2014).

El efecto inhibidor del extracto de *Aniba rosaeodora* sobre la corrosión del acero C38 en HCl 1,0 M se estudió usando técnicas de polarización potenciodinámica y espectroscopia de impedancia electroquímica. Los estudios de polarización mostraron que el extracto es un inhibidor de tipo mixto cuya eficacia de inhibición aumentó con la concentración de inhibidor (Chevalier *et al.*, 2014).

El extracto de hojas de *Silybum marianum* ha sido evaluado como un inhibidor de la corrosión de acero inoxidable 304 en solución de HCl 1,0 M por medio de mediciones de pérdida de peso, polarización potenciodinámica y espectroscopia de impedancia electroquímica. Las curvas de polarización potenciodinámicas indicaron que el extracto de *S. marianum* se comporta como inhibidor de tipo mixto (Soltani *et al.*, 2014).

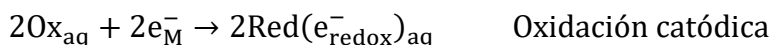
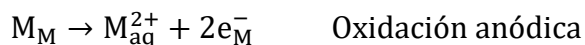
La acción de inhibición del extracto de la hoja de *Aloe vera* como protección contra la corrosión del acero inoxidable en solución 1,0 M de H₂SO₄ fue estudiada mediante técnicas electroquímicas y por microscopía de barrido electrónico. Los resultados de polarización lineal y la espectroscopia de impedancia electroquímica demostraron la eficacia del extracto a medida que aumentó la concentración (Mehdipour *et al.*, 2014).

7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

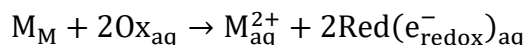
7.1. CORROSIÓN

La corrosión es la degradación o destrucción que sufren los metales a causa de una reacción química o electroquímica con el ambiente al que se encuentra expuesto (agua, atmósfera, aerosol marino, sustancias ácidas) (Pancorbo. 2010).

El proceso básico de la corrosión metálica en solución acuosa consiste en la disolución anódica de metales y la reducción catódica de oxidantes presentes en la solución:



En la fórmula, M_M es el metal en el estado de enlace metálico, M_{aq}^{2+} es el ion metálico hidratado en solución acuosa, e_M^- es el electrón en el metal, Ox_{aq} es un oxidante, $2RED(e_{redox}^-)_{aq}$ es un reductor, y e_{redox}^- es el electrón redox en el reductor. La reacción global a la corrosión es la escribirse como sigue:



Estas reacciones son procesos de transferencia de carga que se producen a través de la interfaz entre el metal y la solución acuosa. Por lo tanto, dependen de la potencial interfacial que corresponde esencialmente a lo que se denomina el electrodo potencial de los metales en términos electroquímica. En términos físicos, el electrodo potencial representa el nivel de energía de los electrones, llamado el nivel de Fermi, en un electrodo sumergido en el electrolito.

7.2. POTENCIAL DE CORROSIÓN

Un electrodo de metal que se corroe en solución acuosa tiene un potencial de electrodo, que se llama el potencial de corrosión. Como una cuestión de rutina, el potencial de corrosión se encuentra en el rango entre el potencial de equilibrio de la disolución anódica del metal y la de la reducción catódica oxidante. Proviene de la cinética de la corrosión metálica que, en el potencial de corrosión, la corriente de oxidación anódica de la disolución de metal es igual a la corriente reducción catódica del oxidante. La cinética de la corrosión se describen generalmente por el potencial de electrodo frente a la reacción de la curva de corriente tanto de la oxidación anódica y la reducción catódica. Electroquímicos la llaman curva de polarización de las reacciones de corrosión. Que el punto de intersección de las curvas de polarización anódica y catódica representa el estado de corrosión, es decir, el potencial de corrosión y la corriente de corrosión.

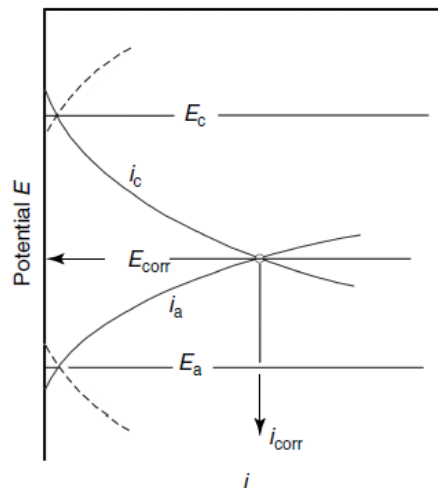


Figura 1. Curvas de corrientes anódicas y catódicas por la corrosión de un metal

La velocidad de corrosión de los metales puede ser controlada por el ánodo o la reacción catódica. En la mayoría de los casos de la corrosión metálica, la reducción de iones de hidrógeno catódica controla la velocidad de la corrosión metálica en una solución de ácido, mientras que, en solución neutra, la reducción de oxígeno catódica controla preferentemente la velocidad de corrosión. Por el potencial de corrosión sale lejos del potencial de equilibrio de la reacción catódica, la velocidad de corrosión se controla por la reacción catódica.

7.3. IMPACTO ECONÓMICO DE LA CORROSIÓN

La corrosión afecta la economía, los gastos generados por el control y prevención de este problema son enormes y se estima que corresponden del 2% al 4% del producto interno bruto de un país industrializado (Huu, 2004; abdel-gaber *et al.*, 2006). Los riesgos más prominentes, tanto económicos como ambientales y sociales, se presentan en las grandes instalaciones industriales, como centrales eléctricas o plantas de procesos químicos. La corrosión, en muchos casos, es la causante de las paradas de plantas de procesos, disminuye la eficiencia de funcionamiento de los equipos (abdel-gaber *et al.*, 2006) y causa accidentes como incendios, explosiones y liberación de productos tóxicos a la atmósfera, al agua o a la tierra (chen *et al.*, 2008; restrepo *et al.*, 2009).

La corrosión es para la mayoría de los utilizadores de los metales, una fuente continua de preocupación que puede llegar a manifestarse hasta en la vida cotidiana. Entre las consecuencias de la corrosión cuyos efectos vemos diariamente se puede señalar como ejemplos:

- 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.

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.).

7.4. MECANISMO DE LA CORROSIÓN

La corrosión de los metales es un fenómeno natural. En efecto, salvo raras excepciones (el oro, el hierro de origen meteorítico), los metales están presente en la tierra en forma de óxidos, en los minerales, (como la bauxita si es aluminio, la hematita si es hierro, etc.). Desde la prehistoria, toda la metalurgia ha consistido en reducir los óxidos en bajos hornos y luego en altos hornos, para fabricar el metal. La corrosión, de hecho, es el regreso del metal a su estado natural, el óxido.

Los materiales y en especial los metales, son obtenidos a partir de especies minerales estables en las condiciones naturales. Por tanto, al ser expuestas a las condiciones ambientales, una vez extraídos, tienden a estabilizarse química y energéticamente. El paso espontáneo de estos materiales a su estado natural combinado, es llamado CORROSION.

Puede definirse corrosión a la reacción química o electroquímica de un metal o aleación con el medio que lo rodea y que provoque un deterioro de dicho material. La federación europea de corrosión distingue entre: a) corrosión con oxidación del metal y formación de cationes metálicos; b) disolución de un metal en otros metales o sales fundidas. Así, problemas puramente mecánicos como ruptura por sobrecarga, desgaste, erosión, cavitación etc. No se englobarían dentro de la corrosión propiamente dicha. Tampoco los cambios de fase pueden clasificarse como corrosión por que no interviene un medio agresivo. Sin embargo, si se dan formas de corrosión en las que se superpone el efecto de la corrosión y un efecto mecánico, como por ejemplo en los procesos de corrosión-erosión, de corrosión bajo tensión o de corrosión-cavitación cuando desprende la capa de óxido que cubre el metal.

7.5. MORFOTIPOS DE LA CORROSIÓN

Es posible clasificar los procesos de corrosión recurriendo a distintos criterios. Por la naturaleza de la sustancia corrosiva, el mecanismo de la corrosión, la morfología del ataque (ataque uniforme, localizado, etc.); por el medio que la produce (corrosión por ácidos, atmosférica, por suelos, aerosol marino, etc.); por las condiciones físicas que la motivan (por cavitación, por corrientes vagabundas, etc.).

7.5.1. Por la naturaleza de la sustancia corrosiva. La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca, para la primera se requiere un líquido o humedad, mientras que, para la segunda, las reacciones se desarrollan con gases a altas temperaturas.

Corrosión humedad o electroquímica: es la que se da en la mayoría de los casos y es producida por líquidos. Existe corrosión electroquímica cuando los materiales metálicos se hallan en contacto con medios de conductividad electrolítica, en particular con el agua, disoluciones salinas o la humedad de la atmosfera y de los suelos. En consecuencia, la presencia de moléculas de agua sobre la superficie es la condición necesaria para que ocurra este tipo de corrosión.

Corrosión seca: cuando un metal trabaja a temperatura elevada, salvo casos muy excepcionales, no es posible la existencia de una película líquida conductora sobre su superficie (electrolito). En estas condiciones la reacción de corrosión tiene lugar a través de un mecanismo diferente al electroquímico, consistente en una reacción química directa entre el metal y un gas agresivo que normalmente es oxígeno.

7.5.2. Por los mecanismos de corrosión. Estos comprenden las reacciones químicas, las reacciones electroquímicas y las microbiológicas.

Corrosión química: se produce en aquellos casos en que el metal reacciona con un medio no iónico (por ejemplo, oxidación en aire a alta temperatura, reacción con una solución de yodo o con tetracloruro de carbono, etc.)

Corrosión electroquímica: considerado desde el punto de vista de la participación de iones metálicos, todos los procesos de corrosión son electroquímicos. Sin embargo, es usual designar corrosión electroquímica a la implica un transporte simultáneo de electricidad a través de un electrolito.

Corrosión precoz: este término es aplicado a un tipo de corrosión puntal que ocurre después de un recubrimiento de pintura a secado al tacto, dándose además simultáneamente las siguientes condiciones: a) una delgada película de pintura (espesor <40mm) b) un sustrato a baja temperatura c) alta humedad ambiente. La severidad del problema tiende a aumentar a medida que la actividad (tendencia a corroerse) superficial del metal aumenta.

Corrosión erosión: el movimiento de un flujo, generalmente en régimen turbulento, sobre una superficie metálica aumenta la velocidad de la corrosión hasta alcanzar un valor máximo debido al desgaste del mecanismo. El ataque se llama corrosión por erosión. La importancia relativa del desgaste mecánico y de la corrosión es a menudo difícil de determinar y varía considerablemente de una situación a otra. El papel de la erosión se atribuye generalmente al desprendimiento de películas superficiales protectoras.

Corrosión por corrientes vagabundas: se produce por la descarga a tierra normalmente, si bien no exclusivamente, de corrientes continuas dispersas existentes en algunas zonas y generadoras por instalaciones de cubas electrolíticas, ferrocarriles o tranvías eléctricos, soldadores eléctricos, etc., produciéndose la descomposición del material generalmente bajo tierra por un proceso electrolítico.

7.5.3. Por la apariencia del metal corroído. La corrosión puede ser uniforme entonces el metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie, o bien, puede ser localizada, en cuyo caso solamente resultan afectadas pequeñas áreas.

Ataque generalizado o uniforme: es la forma más benigna de la corrosión y el tipo más comúnmente encontrado, caracterizado por el adelgazamiento progresivo y uniforme del componente metálico. El ataque se extiende en forma homogénea sobre toda la superficie metálica, es decir, la pérdida de espesor será muy parecida en cada punto de la superficie del material y su penetración media es igual en toda la superficie.

Corrosión atmosférica (seca y húmeda): el medio agresivo en el que se originan más del 50% de las pérdidas totales, es atribuibles a fallos por la existencia de fenómenos de corrosión, es la atmosfera. ¿El motivo? Se calcula que más del 80% el material metálico está expuesto a la atmosfera, donde existe una capa de humedad que actúa como electrolito, generando, por lo tanto, una corrosión de carácter electroquímico.

Ataque selectivo o localizado: es el que se da solamente en una zona muy concreta de la superficie del metal, manifestándose por la aparición de picaduras o perforaciones aisladas. Puede ser de dos tipos: corrosión por aireación diferencial y corrosión bimetálica o ataque galvánico.

Corrosión por aireación diferencial: producida en aquellos lugares que favorezcan la acumulación puntual de agua/humedad en los ambientes secos o de aire o en los medios sumergidos, también puede producirse en el interior de conductos por la obstrucción o las alteraciones del flujo, que puedan producir zonas más aireadas dentro de la propia tubería.

Ataque por picadura o punto pitting: constituye un caso límite de ataque localizado, en el que este se concentra en áreas muy reducidas. Se presenta en formas de perforaciones en una superficie relativamente inatacada y se desarrolla de tal manera que su ancho es comparativamente menor que su profundidad, propagándose en el interior del metal formando galerías. Con frecuencia, la picadura se produce bajo una capa de producto de corrosión y, de hecho, algunas veces se inicia debido a una variedad de ataque por aireación diferencial.

Corrosión por cavitación: es la producida por la formación y el colapso de burbujas en la superficie del metal (en contacto con un líquido) de dos sustancias en contacto, de la que una o ambas son metales. Este movimiento genera una serie de picaduras en la superficie del metal, que son ocultadas por los productos de la corrosión y solo son visibles cuando estas son eliminadas.

Corrosión selectiva de las aleaciones: la corrosión por disolución selectiva se produce en las aleaciones polifásicas, al efectuarse la separación de uno de los elementos de la aleación siendo el ejemplo más común la eliminación de cinc en las aleaciones de cobre-cinc (latones 30/70), conocido con el nombre de descincificación del latón (Cu-Zn).

Corrosión por crevice: se produce en pequeñas cavidades, intersticios o huecos formados por el contacto entre una pieza de metal con otra, igual o diferente a la primera, o más comúnmente con un elemento no metálico. En las fisuras de ambos metales, que también pueden ser huecos existentes en la masa del objeto, se deposita la solución que facilita la corrosión de la pieza.

Corrosión intergranular (IGC): afecta a los bordes de los granos que componen la estructura sólida de los metales y se presentan como una franja estrecha de ataque que se propaga a lo largo de los límites de grano. Este ataque debilita enormemente el metal y sin, que aparentemente lo parezca, se extiende hasta inutilizar el material afectado.

(Pancorbo. 2010).

7.6. INHIBIDOR DE CORROSIÓN

Un inhibidor es una sustancia que frena la reacción de corrosión en los metales. Los inhibidores de corrosión se añaden comúnmente en pequeñas cantidades a los ácidos, aguas, vapor y muchos otros entornos de refrigeración de forma continua o intermitente para reducir la intensidad de la corrosión que podría poner en peligro la vida de diseño de una estructura deseada (P. Roberge. 2006).

Formas de protección de un inhibidor de corrosión:

- El inhibidor se adsorbe químicamente (quimisorción) en la superficie del metal y forma una fina película protectora con efecto inhibidor o por la combinación entre los iones y de inhibidor superficie metálica (Dariva and Galio. 2014).
- El inhibidor lleva una formación de una película de protección del óxido de metal común.
- El inhibidor reacciona con un componente corrosivo potencial presente en medios acuosos y el producto es un complejo.

7.7. CALIFICACIÓN DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN

Los inhibidores de corrosión pueden ser químicos, sintéticos o naturales y pueden ser clasificadas por:

- La naturaleza química como orgánico o inorgánico
- el mecanismo de acción como anódica, catódica o una mezcla anódica-catódica y por adsorción.

En general, los inhibidores inorgánicos tienen acciones catódica o anódica. Los inhibidores orgánicos tienen ambas acciones, anódica y catódica y la protegida por una película de adsorción.

Los inhibidores inorgánicos: sales de cromatos, fosfatos y molibdatos. 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 (Tansuğ *et al.*, 2014). La Figura xx muestra los tipos de inhibidores de corrosión de acuerdo con su origen reportados en la literatura.

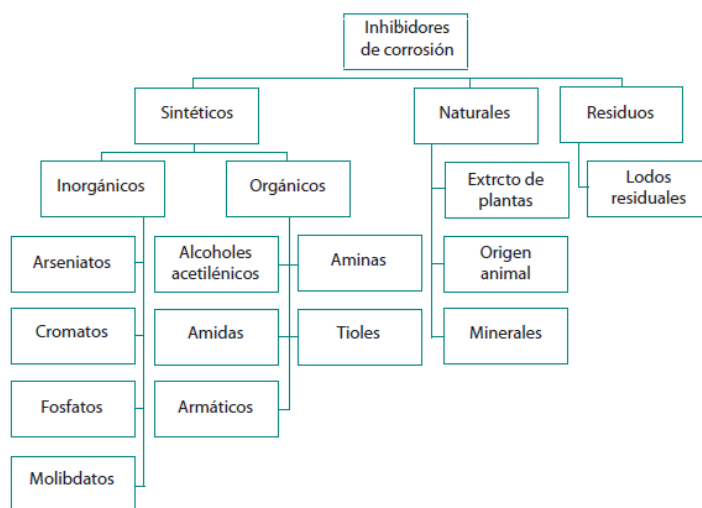


Figura 2. Clasificación de los inhibidores de corrosión de acuerdo con su origen¹

¹ *Uso de extractos de plantas como inhibidores de corrosión*, L. P Tejada Benítez, P.J. Meza Castellar E.D. Altamiranda Percy M.J. Berrocal Bravo 2104.

7.8. INHIBIDORES ANÓDICOS

Inhibidores anódicos (también llamados inhibidores de pasivación) actúan mediante una reacción anódica de reducción, es decir, bloquea la reacción del ánodo y apoya la reacción natural de la superficie de metal de pasivación. También, debido a la formación de una película adsorbida en el metal. En general, los inhibidores reaccionan con el producto de corrosión, formado inicialmente, lo que resulta en una película cohesiva e insoluble en la superficie de metal.

7.9. INHIBIDORES CATÓDICOS

Durante el proceso de corrosión, los inhibidores de corrosión catódica previenen la aparición de la reacción catódica del metal. Estos inhibidores tienen iones metálicos capaces de producir una corriente catódica de reacción debido a la alcalinidad, produciendo así compuestos insolubles que precipitan selectivamente en sitios catódicos.

Depositando sobre el metal una película compacta y adherente, lo que restringe la difusión de la especie reducida en estas áreas, Por lo tanto, el aumento de la impedancia de la superficie y la restricción de la difusión de las especies reducibles, es decir, la difusión de oxígeno y los electrones conductora en estas áreas. Estos inhibidores causan alta inhibición catódica.

7.10. INHIBIDORES MIXTOS

Se llaman así a aquellos capaces de inhibir o dificultar las reacciones anódicas y catódicas simultáneamente. También son conocidos como “formadores de película” debido a que protegen al metal mediante la formación de una delgada película hidrofóbica sobre la superficie del metal (Roberge, 2000). Por lo general son compuestos orgánicos con presencia de heteroátomos y grupos polares que contienen átomos de nitrógeno, azufre, oxígeno o fósforo, los cuales desplazan a las moléculas de agua de la superficie del metal dada su alta densidad electrónica y disponibilidad de electrones desapareados, facilitando la transferencia de electrones desde el inhibidor hacia el metal (Soylev & Richardson, 2008; Amitha & Basu, 2012).

7.11. INHIBIDORES DE CORROSIÓN A BASE DE EXTRATO DE PLANTAS

Inhibidores de corrosión verdes son biodegradables y no contienen metales pesados u otros compuestos tóxicos. Algunos grupos de investigación han reportado el uso exitoso de sustancias de origen natural para inhibir la corrosión de metales en medio ácido y alcalino. (Amitha & Basu, 2012).

En los extractos de plantas, están presentes un gran número de compuestos químicos, especialmente heterocíclicos, que inhiben la corrosión de manera eficiente (Sathiyathan et al., 2005; Oladele y Okoro, 2011). El efecto inhibidor se atribuye a la adsorción de estas sustancias orgánicas sobre la superficie del metal, que bloquea los sitios activos o forman una capa protectora (Abdel-Gaber et al., 2006; Singh et al., 2010; Anuradhaa et al., 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 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 juegan un papel clave en la inhibición debido a los pares de electrones libres que poseen (Abdullah, 2011). La disponibilidad de pares solitarios y electrones π en las moléculas del inhibidor facilita la transferencia de electrones desde el inhibidor hacia el metal, y forman un enlace covalente coordinado (Chauhan y Gunasekaran, 2007).

7.12. CONSIDERACIONES A EMPLEAR INHIBIDORES

Para todos los tipos de inhibidores, debemos tener en cuenta algunos factores ambientales, ya que las acciones algunos elementos tales como metales, pH, composición, impurezas, la agitación, la temperatura, la geometría del sistema, la concentración de inhibidor y la mezcla de uno o más inhibidores pueden cambiar el mecanismo anti-corrosivo.

Para el empleo de los inhibidores es bastante satisfactorio que ciertos factores deben ser vistos como la causa real de la corrosión, el costo beneficio X y las posibles interacciones del inhibidor con el medio ambiente, tales como la influencia de un catalizador, la deposición o contaminación. Cuatro aspectos fundamentales deben ser analizados para obtener un resultado satisfactorio de la utilización del inhibidor.

7.13. VELOCIDAD DE CORROSIÓN

Cantidad de masa perdida por un material en un intervalo de tiempo, calculándose mediante la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{m_i - m_f}{t} = \frac{\Delta m}{t} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

V_c: Velocidad de corrosión (gr/h), m_i: Masa inicial (gr), m_f: Masa final (gr), t: Tiempo (24 h)

7.14. EFICIENCIA DE INHIBICIÓN.

$$EI\% = \left[\frac{V_{\text{sin}} - V_{\text{con}}}{V_{\text{sin}}} \right] * 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$EI \geq 75\% \rightarrow \text{Aceptable}$$

Donde:

EI: Eficiencia inhibidora (porcentaje), V_{sin}: Velocidad de corrosión del metal con el inhibidor (g/h) y V_{con}: Velocidad de corrosión de metal sin inhibido (g/h)².

² "Corrosion inhibitory action of some plant extracts on the corrosion of mild steel in acidic media," *Arabian Journal of Chemistry*.

8. METODOLOGÍA

8.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de tipo cuantitativo apoyada en la aplicación de herramientas estadísticas para su desarrollo. Para el cumplimiento de los objetivos planteados se investiga la caracterización fitoquímica y pruebas de pérdida de masa a nivel de laboratorio con acero ASTM A-36 calidad estructural, extractos, concentración de extractos y medios electrolíticos corrosivos con el objeto de determinar la influencia de estos factores en la eficiencia de inhibición corrosiva.

8.2. LUGAR DE REALIZACIÓN Y TIEMPO DEL PROYECTO

Esta investigación se llevara a cabo en las instalaciones del laboratorio de caracterización de materiales de la facultad de ingeniería de la Universidad Tecnológica de Bolívar. Las pruebas de pérdida de masa se hacen por un periodo de 10 días y el proceso de investigación abarca 10 meses.

8.3. DISEÑO EXPERIMENTAL UTILIZADO

Para la toma de datos se implementara un diseño experimental 2^k considerando 4 factores (variables) de 2 niveles cada uno para desarrollar un total de 16 corridas.

Tabla. 1. Factores evaluados en el diseño experimental.

Factores	Representación	Niveles	Símbolo
Electrolito	A	HCl 10 M	+
		NaCl 3.5% p/v	-
Extracto	B	9 ml	+
		18 ml	-
Solvente	C	Agua	+
		Etanol	-
Tipo de residuo	D	Tipo A	+
		Tipo B	-

Cuya técnica de recolección será la observación en laboratorio mediante la cuantificación de los pesos inicial y final de las láminas, para el cálculo de las velocidades de corrosión, además de dos corridas donde se encontrara la velocidad de corrosión sin inhibidor en los dos electrolitos.

Tabla. 2. Corridas experimentales.

Corridas	Factores				Variables respuesta
	A	B	C	D	Velocidad de corrosión
1	+	+	+	+	
2	+	+	+	-	
3	+	+	-	+	
4	+	+	-	-	
5	+	-	+	+	
6	+	-	+	-	
7	+	-	-	+	
8	+	-	-	-	
9	-	+	+	+	
10	-	+	+	-	
11	-	+	-	+	
12	-	+	-	-	
13	-	-	+	+	
14	-	-	+	-	
15	-	-	-	+	
16	-	-	-	-	

8.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

8.4.1. Obtención de los extractos de residuo de café: La muestra para la preparación de las soluciones con el extracto del residuo de café, se tomaran a partir de dos diferentes tiendas JUAN VALDEZ de la ciudad de Cartagena. Se tomarán 100 gramos de residuo los cuales serán sumergidos en solventes (etanol 100 mL y agua 100 mL) durante un periodo de tiempo en un baño de maría a temperatura de ebullición. Posteriormente se realizará una filtración, para el almacenamiento de los mismos.

Se prepararán diferentes concentraciones de los extractos con el fin de evaluar su eficiencia inhibidora sobre diversas soluciones electrolíticas corrosivas (HCl y NaCl).

8.4.2. Probetas utilizadas: centrando esta investigación en el sector industrial se utilizarán láminas de acero ASTM A-36 de 4 mm de espesor, con dimensiones de 3 cm x 4 cm, análogamente se desbastara con lija en un orden ascendente dejando el metal al desnudo (libre de calamina) y lavadas con etanol al 95% v/v, dejándolas secar por un periodo de 5 minutos.

8.4.3. Concentración de los extractos: Para lograr las concentraciones de 5% p/v y 10% p/v de los extractos se adicionaran de 9 ml y 18 ml respectivamente en los recipientes, completando un volumen de 180 mL con la adición de los medios electrolíticos corrosivos. Los medios electrolíticos corrosivos serán preparados a partir de la dilución con agua destilada de HCl 38% p/v y NaCl. Para llegar a concentraciones HCl 10M y NaCl 3.5% p/v

8.4.4. Pruebas de pérdida de masa: Las pruebas de pérdida de masa se realizan a temperatura ambiente (entre 25 y 26 °C) mediante la inmersión de las probetas de acero (ASTM A306) de manera vertical por medio de un hilo de nylon las cuales serán atadas a un soporte horizontal en el porta probetas en recipientes de 180 mL de soluciones electrolíticas HCl 10M y NaCl 3.5% p/v, conteniendo concentración de extractos de residuo de café 5% v/v y 10% v/v, para un total de 16 corridas experimentales. Dos probetas serán sumergidas solamente con soluciones electrolíticas (HCl y NaCl), es decir, no contienen extractos de

inhibidores. Los cuales servirán de blanco para el cálculo de la eficiencia de inhibición a partir de las velocidades de corrosión.

Las láminas antes de sumergirlas en los recipientes fueron pesadas en una balanza electrónica de precisión 0.001, con el fin de determinar las masas iniciales (m_i), este proceso de inmersión se llevara a cabo durante un periodo de 24 horas, transcurrido este periodo, las láminas son retiradas de las soluciones corrosivas, lavadas con etanol 95% v/v y pesadas para determinar la cantidad de masa perdida (m_f). Posteriormente fueron nuevamente sumergidas en los medios electrolíticos corrosivos.

Figura 3. Recipientes para las pruebas de pérdida de masa.



Fuente: Néstor Aguilar & Jerson Caraballo.

Con los resultados obtenidos de las corridas se procederá a calcular las velocidades de corrosión y las eficiencias de inhibición, mediante las siguientes expresiones.

$$V_c = \frac{m_i - m_f}{t} = \frac{\Delta m}{t} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

V_c : Velocidad de corrosión (gr/h).

m_i : Masa inicial (gr).

m_f : Masa final (gr).

t : Tiempo (24 h)

$$EI\% = \left[\frac{V_{\text{sin}} - V_{\text{con}}}{V_{\text{sin}}} \right] * 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

$EI \geq 75\% \rightarrow$ Aceptable

Donde:

EI: Eficiencia de Inhibición (%).

V_{sin} : Velocidad de corrosión sin inhibidor (g/h).

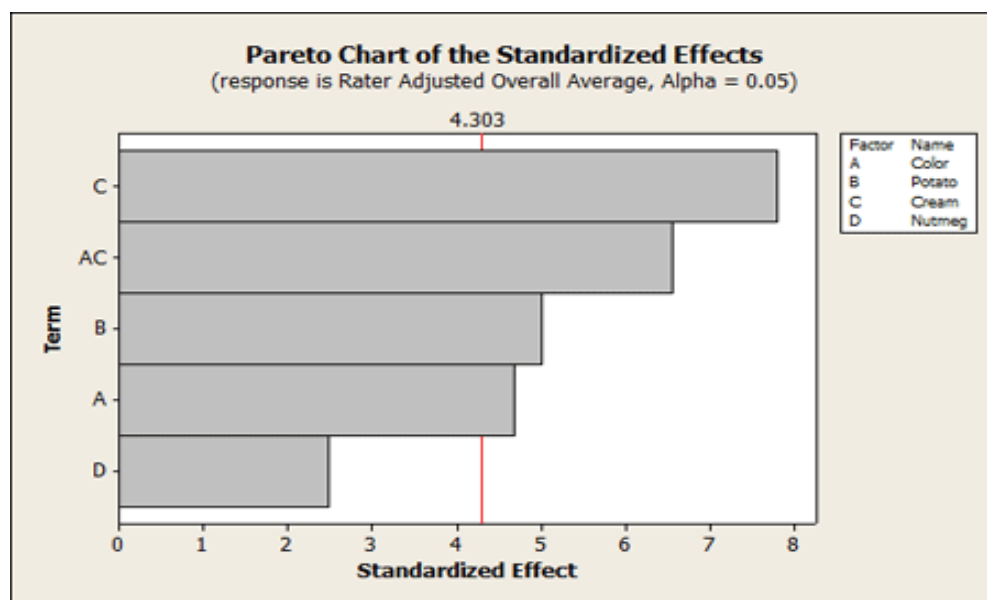
V_{con} : Velocidad de corrosión con inhibidor (g/h).

Con base a los resultados obtenidos, se realizará un análisis de varianza (ANOVA), mediante el uso del software Statgraphics Centurion XV, apoyado en un diagrama de Pareto para determinar qué factores son los que tienen estadísticamente mayor incidencia sobre la velocidad de corrosión y así identificar bajo qué condiciones presentan una mayor eficiencia inhibidora de corrosión los extractos de residuo de café.

8.5. DIAGRAMA DE PARETO

Un diagrama de Pareto es una comparación cuantitativa y ordenada de elementos o factores según su contribución a un determinado efecto, el objetivo es identificar los factores que más contribuyen al inhibir.

Figura 4. Ejemplo diagrama de Pareto. Fuente: Lou Johnson.



8.6. HIPÓTESIS

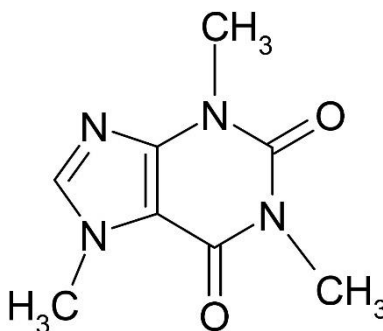
Debido a la caracterización fitoquímica del café reportado por la literatura consultada, se espera que la eficiencia inhibidora de los residuos de café sean de un 75% como mínimo, esperando que a los procesos sometidos este no afecten mucho sus propiedades, debido a que la cafeína tiene presencia de alcaloides los cuales tienen la capacidad de inhibir la corrosión en medios ácidos y salinos.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1. CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA

De acuerdo a la caracterización fitoquímica del café consultada por la literatura, se encuentra que contiene varios alcaloides que contribuyen al sabor amargo del café como son la cafeína (2,1%), la trigonelina (0,6% a 1,3%) y otros en menor concentración como paraxantina, teobromina y teofilina (3 a 344 mg/kg). Siendo la cafeína de vital importancia por sus compuestos nitrogenados que constituyen (1,30% y el 3,23%) de los granos de café cultivados en Colombia. (Clarke, R.J.; Macre. R. 1985, Illy, A.; Viani, R. 2005, Puerta Q., G. I.; Gallego A., C. P.; Hincapié V., K. A. 2010). Siendo el nitrógeno fundamental en el proceso de inhibición y por ende en la disminución de la velocidad de corrosión.

Figura 5. Formula de la cafeína, un alcaloide estimulante. Fuente: Dani Conill.



CAFEINA

9.2. DETERMINACIÓN DE LAS VELOCIDAD DE CORROSIÓN

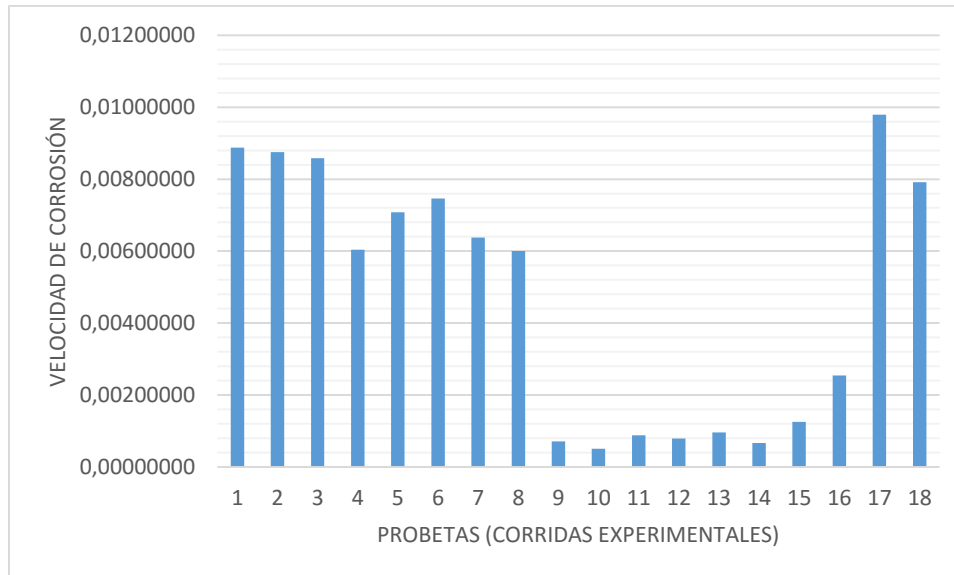
Los resultados de las velocidades de corrosión promedio que tuvieron las probetas a causa de los extractos de residuo de café añadidos en las soluciones electrolíticas durante los 10 días de monitoreo se muestran en la siguiente tabla a partir de los datos del ANEXO A.2, con la finalidad de determinar cuál de los extractos contribuyó de manera más eficiente a la disminución de la velocidad de corrosión.

Tabla 3. Velocidades de corrosión promedio.

Corridas	Factores				Velocidad de corrosión promedio
	A	B	C	D	
1	+	+	+	+	0,0088750
2	+	+	+	-	0,0087500
3	+	+	-	+	0,0085833
4	+	+	-	-	0,0060417
5	+	-	+	+	0,0070833
6	+	-	+	-	0,0074583
7	+	-	-	+	0,0063750
8	+	-	-	-	0,0060000
9	-	+	+	+	0,0007083
10	-	+	+	-	0,0005000
11	-	+	-	+	0,0008750
12	-	+	-	-	0,0007917
13	-	-	+	+	0,0009583
14	-	-	+	-	0,0006667
15	-	-	-	+	0,0012500
16	-	-	-	-	0,0025417
17	HCl				0,0097917
18	NaCl				0,0079167

Estos resultados también fueron graficados (Figura 6.) para facilitar el análisis y poder discutir con mayor precisión cual probeta tuvo mayor disminución en su velocidad de corrosión.

Figura 6. Velocidades de corrosión promedio de cada probeta.



Al comparar las velocidades de corrosión se puede observar que donde se pierde mayor masa y por consiguiente mayor aumento de la velocidad de corrosión, son en las corridas experimentales donde solo se encuentran las soluciones electrolíticas, siendo la más crítica la de HCl, debido a que el ácido es más agresivo por la liberación de hidrogeno gaseoso en la reacción catódica. Lo cual no se presenta en medios salinos, (Amin, Khaled., Mohsen & Arida, 2010; Sastri, 2011; Safak, Duran, Yurt & Türkoglu, 2012).

Basado en la gráfica y comparando los resultados de las velocidades de corrosión de las 16 corridas experimentales, donde se varia las concentraciones de los extractos respecto a las que solo tienen soluciones electrolíticas, se puede decir, que la probeta 10 (solución NaCl 3,5% p/v y extracto de residuo de café) fue la que registro una disminución considerable en su velocidad de corrosión, permitiendo mayor solubilización del acero, y así mayor interacción con los componentes fitoquímicos de los extractos facilitando la formación de complejos estables que se adhieren a la superficie del acero, lo cual repercute en la en la mejora y aumento la eficiencia de inhibición.

9.3. EFICIENCIA DE INHIBICIÓN DE LOS EXTRACTOS

Las eficiencias de inhibición son calculadas a partir de las velocidades de corrosión obtenidas durante la prueba de pérdida de masa. Empleando la ecuación 2 y los datos del ANEXO A.2.

Para la realización de un análisis de varianza (ANOVA) más óptimo se toman las eficiencias de los primeros cinco días (primera semana) y son convertidos en un resultado promedio, de igual forma se hace un resultado promedio con los cinco días de la (segunda semana), con el fin de hacer una réplica del diseño experimental y poder ver representativamente y estadísticamente mejor los resultados obtenidos.

En las siguientes tablas se muestran los resultados de las eficiencias.

Tabla 4. Eficiencias de inhibición (Primera semana).

Corridas	Factores				Variable respuesta
	A	B	C	D	Eficiencia de inhibición (%)
1	+	+	+	+	57,70
2	+	+	+	-	39,82
3	+	+	-	+	44,96
4	+	+	-	-	54,65
5	+	-	+	+	37,71
6	+	-	+	-	31,51
7	+	-	-	+	38,64
8	+	-	-	-	61,11
9	-	+	+	+	93,58
10	-	+	+	-	94,75
11	-	+	-	+	90,14
12	-	+	-	-	93,58
13	-	-	+	+	88,43
14	-	-	+	-	94,75
15	-	-	-	+	93,58
16	-	-	-	-	53,81

Tabla 5. Eficiencias de inhibición (Segunda semana).

Corridas	Factores				Variable respuesta
	A	B	C	D	Eficiencia de inhibición (%)
1	+	+	+	+	25,26
2	+	+	+	-	54,12
3	+	+	-	+	40,68
4	+	+	-	-	49,09
5	+	-	+	+	33,81
6	+	-	+	-	38,64
7	+	-	-	+	39,10
8	+	-	-	-	41,68
9	-	+	+	+	87,06
10	-	+	+	-	91,76
11	-	+	-	+	87,06
12	-	+	-	-	84,71
13	-	-	+	+	87,06
14	-	-	+	-	87,06
15	-	-	-	+	71,76
16	-	-	-	-	82,35

De acuerdo a las eficiencias tabuladas se puede decir, que representativamente la corrida experimental que mayor eficiencia mostro es la 10 (solución NaCl 3,5% p/v y extracto de residuo de café), alcanzado una eficiencia alta y que supera las expectativas respecto a la hipótesis planteada, esto da muestra que los extractos a base de residuo de café pueden trabajar con un comportamiento aceptable para los medios corrosivos salinos.

Con los anteriores datos se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para demostrar estadísticamente los resultados arrojados por la eficiencia, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

9.4. ANÁLISIS DE VARIANZA Y DIAGRAMA DE PARETO

Los datos de análisis de varianza (ANOVA) y el diagrama de Pareto son arrojados por el software Stargraphics Centurión XVI.

Tabla 6. Análisis de varianza para la eficiencia de inhibición.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Electrolito	15007,1	1	15007,1	153,92	0,0000
B:Extracto	364,013	1	364,013	3,73	0,0669
C:Solvente	8,1151	1	8,1151	0,08	0,7758
D:Tipo de residuo	42,5033	1	42,5033	0,44	0,5163
AB	12,1952	1	12,1952	0,13	0,7271
AC	441,174	1	441,174	4,52	0,0454
AD	147,335	1	147,335	1,51	0,2326
BC	9,8326	1	9,8326	0,10	0,7540
BD	38,7551	1	38,7551	0,40	0,5352
CD	1,42768	1	1,42768	0,01	0,9048
Error total	2047,5	21	97,5		
Total (corr.)	18119,9	31			

R-cuadrada = 88,7003 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 83,3195 por ciento
Error estándar del est. = 9,87421
Error absoluto medio = 5,66347
Estadístico Durbin-Watson = 1,95405 (P=0,3833)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,0897846

Los datos del ANOVA nos permite establecer que los factores que afectan a la eficiencia de inhibición son el electrolito (medio corrosivo) y la interacción AC (electrolito y solvente), pero se puede ver claramente que las demás interacciones no afectan de manera significativa por lo cual al excluir esas interacciones se obtienen datos más detallados y precisos.

Tabla 7. Análisis de varianza para la eficiencia de inhibición, excluyendo interacciones.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Electrolito	15007,1	1	15007,1	177,83	0,0000
B:Extracto	364,013	1	364,013	4,31	0,0482
C:Solvente	8,1151	1	8,1151	0,10	0,7591
D:Tipo de residuo	42,5033	1	42,5033	0,50	0,4845
AC	441,174	1	441,174	5,23	0,0310
AD	147,335	1	147,335	1,75	0,1984
Error total	2109,71	25	84,3884		
Total (corr.)	18119,9	31			

R-cuadrada = 88,357 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 85,5626 por ciento
Error estándar del est. = 9,18631
Error absoluto medio = 5,67332
Estadístico Durbin-Watson = 1,95657 (P=0,4531)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,0584273

Al realizar la exclusión de las interacciones AB, BC, BD, CD se puede apreciar resultados más significativos en donde se nota que el electrolito sigue siendo un factor influyente, y ahora el factor de los extractos se vuelve relevante estadísticamente en el diseño experimental, sin dejar de lado la interacción AC (electrolito y solvente).

Las interacciones nos permiten tener respuestas más óptimas sobre en qué niveles se presenta mayor eficiencia.

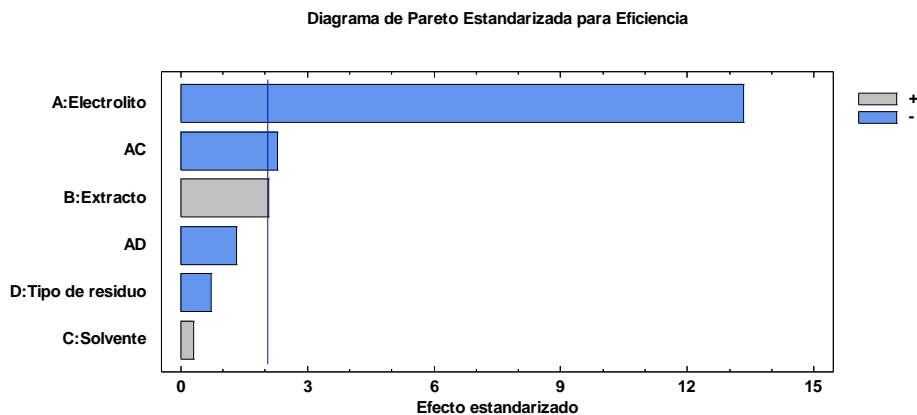
Tabla 8. Optimización de respuesta.

Meta: maximizar Eficiencia

Valor óptimo = 94,9224

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Electrolito	-1,0	1,0	-1,0
Extracto	-1,0	1,0	1,0
Solvente	-1,0	1,0	1,0
Tipo de residuo	-1,0	1,0	1,0

Figura 7. Diagrama de Pareto estandarizado para la eficiencia de inhibición.



Como se puede observar en el diagrama de Pareto (Figura 7.), los factores que poseen mayor influencia sobre la eficiencia de inhibición (Valor P por debajo de 0,05 y tamaño de la barra por encima de la línea vertical que representa el 95% de la confiabilidad de los resultados) fue el electrolito (medio corrosivo).

Los anteriores resultados demuestran que los extractos a base de residuo de café son más eficientes en medios salinos (NaCl 3,5% p/v), sin embargo al momento de inhibir la corrosión la interacción entre el factor AC y el factor (extracto) poseen una participación significativa sobre la eficiencia de inhibición de las probetas de acero calidad estructural. Lo cual muestra una concordancia con los resultados de la pruebas de pérdida de masa.

10. CONCLUSIÓN

Las pruebas de pérdida de masa dan muestra que donde se presenta mayor disminución de la velocidad de corrosión sobre las probetas de acero calidad estructural es en el medio corrosivo electrolítico de cloruro de sodio (NaCl 3,5% p/v).

El análisis de varianza (ANOVA) permitió conocer estadísticamente que factores son los que generan mayor influencia sobre la eficiencia de inhibición (electrolito, solvente, extracto, tipo de residuo), dando muestra que el electrolito, la concentración de los extractos y las interacciones de los factores AC (electrolito y solvente) son los más relevantes durante las corridas experimentales.

La respuesta óptima registrada por la interacción de los factores (valor óptimo) es cuando el electrolito se encuentra en su nivel bajo (NaCl 3,5% p/v), el extracto en su nivel alto (9 mL), el solvente en su nivel alto (Agua) y el tipo de residuo en su nivel alto (A).

Debido a las eficiencias altas encontradas para los extractos de residuo de café, algunas superior a los 90%, se puede demostrar la importancia de esta investigación, así como el potencial que estos extractos tienen comparados con otros inhibidores de origen natural, generando un aporte ambientalmente amigable sin afectar la seguridad alimenticia que otros productos pueden tener en el país. Además es un inhibidor que se puede obtener a bajo costo debido al aprovechamiento de un residuo que no se le brinda un uso adecuado.

11. RECOMENDACIONES

La presente investigación es un precedente en la temática de inhibidores de corrosión favorables al medio ambiente, mostrando una facilidad en su extracción y dando muestra de altas eficiencias. Para profundizar esta investigación en los inhibidores de corrosión a base de residuo de café con aplicación en el sector industrial se recomienda:

Realizar pruebas de pérdida de masa dinámicas, para saber el comportamiento de los extractos y el medio corrosivo cuando se encuentra en movimiento.

Realizar pruebas electroquímicas de electrodo para evaluar las eficiencias de inhibición bajo condiciones estáticas.

Realizar pruebas electroquímicas de electrodo rotatorio para evaluar las eficiencias de inhibición bajo condiciones dinámicas.

Realizar pérdidas de masa a diferentes temperaturas, que permita calcular isoterms de absorción, así como registrar mayor información del comportamiento termodinámico del inhibidor.

Para el desarrollo de esta investigación se tuvieron algunas limitantes, como la ausencia de equipos propios de un laboratorio de corrosión, para la realización de ensayos electroquímicos. Por tal motivo recomendamos a la Universidad Tecnológica de Bolívar, adquirir equipos y disponer instalaciones para un laboratorio de corrosión, que permita seguir avanzando con investigaciones que ayuden a mitigar el fenómeno de la corrosión presente en la costa caribe.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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-Gaber, A.M., Abd-El-Nabey, B., Khamis, E., Abd-El-Khalek, D. (2011). A natural extract as scale and corrosion inhibitor for steel surface in brine solution. *Desalination*, 278(1–3): 337-342.

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

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

Amitha, B. E. & Basu, B. (2012). Green Inhibitors for Corrosion Protection of Metals and Alloys: An Overview. *International Journal of Corrosion*, Volume 2012.

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

Amin, M., Khaled, K.F., Mohsen, Q. & Arida, H.A. (2010). A study of the inhibition of iron corrosion in HCl solutions by some amino acids. *Corrosion Science*, 52, 1684–1695.

Camila G. Dariva and Alexander F. Galio. *Corrosion Inhibitors – Principles, Mechanisms and Applications*, 2014.

Chauhan, L. y Gunasekaran,G.(2007). Corrosion inhibition of mild steel by plant extract in dilute HCl médium. *Corros. Sci.*, 49:1143–1161.

Clarke, R.J.; Macrae, R. Coffee. Vol. 1. Chemistry. Inglaterra : Elsevier Applied Science Publisher, 1985. 306p.

.Illy, A.; Viani, R. Espresso coffee: the science of quality. Ámsterdam : Elsevier, 2005. 398p.

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.

Chevalier, M., Robert, F., Amusant, N., Traisnel, M., Roos, C., Lebrini, M. (2014). Enhanced corrosion resistance of mild steel in 1 M hydrochloric acid solution by alkaloids extract from *Aniba rosaeodora* plant: Electrochemical, phytochemical and XPS studies. *Electrochimica Acta*, 131: 96-105.

Corrosion Basics—an Introduction, Second Edition, Pierre R. Roberge, ed. Houston, TX: NACE International, 2006, p. 521-522.

“Corrosion inhibitory action of some plant extracts on the corrosion of mild steel in acidic media,” *Arabian Journal of Chemistry*.

Deng, S. & Li, X. (2012). Inhibition by *Ginkgo* leaves extract of the corrosion of steel in HCl and H₂SO₄ solutions. *Corrosion Science*, 55, 407–415.

Electrochemical noise investigation of Aloe plant extract as green inhibitor on the corrosion of stainless steel in 1 M, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, In Press. H₂SO₄, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, In Press.

Finšgar, M., Jackson, J. (2014). Application of corrosion inhibitors for steels in acidic media for the oil and gas industry: A review. *Corrosion Science*, 86:17-41.

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

Lesly P. Tejada Benítez, Pedro J. Meza Castellar, Edgar D. Altamiranda Percy, María J. Berrocal Bravo. (2014) Uso de extractos de plantas como inhibidores de corrosión. Plant extracts used as corrosion inhibitors. Informador técnico (Colombia) 78(2): 155-164.

Mehdipour, M., Ramezanzadeh, B., Arman, S. (2014).

Mourya, P., Banerjee, S., Singh, M. (2014). Corrosion inhibition of mild steel in acidic solution by *Tagetes erecta* (Marigold flower) extract as a green inhibitor. Corrosion Science, 85: 352-363.

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, vol 2010.

Odewunmi, N., Umoren, S., Gasem, Z. (2014). Utilization of watermelon rind extract as a green corrosion inhibitor for mild steel in acidic media. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, In Press.

Oladele, S.K. y Okoro, H.K. (2011). Investigation of corrosion effect of mild steel on orange juice. African. Journal of Biotechnology, 10(16): 3152-3156.

Pancorbo. F. Alfaomega Grupo Editor. S.A. de C.V. México. Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación.

Puerta Q., G. I.; Gallego A., C. P.; Hincapié V., K. A. Informes del proyecto Estudio de la calidad y la composición química del café cultivado en Colombia, según los suelos y la altitud del cultivo. Calidad y Manejo Ambiental. Cenicafé, 2010. p.v.

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.

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.

Roberge, P. (2000). *Handbook of Corrosion Engineering*. New York: McGraw-Hill.

Safak, S., Duran B., Yurt, A. & Türkoglu, G. (2012). Schiff bases as corrosion inhibitor for aluminium in HCl solution. *Corrosion Science*, 54, 251–259.

Sastri, V. S. (2011). *Green Corrosion Inhibitors: Theory and Practice*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.

Soltani, N., Tavakkoli, N., Khayat Kashani, M., Mosavizadeh, A., Oguzie, E., Jalali, M. 2014. Silybum marianum extract as a natural source inhibitor for 304 stainless steel corrosion in 1.0 M HCl. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(5):3217-3227.

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.

Soylev, T.A. & Richardson, M.G. (2008). Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report. *Construction and Building Materials*, 22, 609–622

13. ANEXOS

Anexo A.1. Registro de pérdida de masa de las probetas de acero ASTM A-36.

Corridas	Factores				Masa (gr)										
	A	B	C	D	Inicial	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
1	+	+	+	+	42,42	42,3	42,28	41,77	41,69	41,6	41,04	40,79	40,61	40,33	40,29
2	+	+	+	-	42,5	42,35	42,16	41,99	41,91	41,83	41,21	40,93	40,67	40,49	40,4
3	+	+	-	+	42,38	42,26	42,05	41,88	41,82	41,75	41,22	40,9	40,8	40,4	40,28
4	+	+	-	-	42,59	42,5	42,3	41,81	41,79	41,7	41,56	41,3	41,25	41,2	40,68
5	+	-	+	+	42,39	42,24	41,99	41,93	41,79	41,64	41,08	40,88	40,74	40,72	40,69
6	+	-	+	-	42,39	42,25	42,08	41,83	41,74	41,64	41,14	40,93	40,73	40,63	40,6
7	+	-	-	+	42,16	42,08	41,94	41,64	41,56	41,48	41,19	41,02	40,85	40,65	40,63
8	+	-	-	-	42,61	42,51	42,4	42,27	42,22	42,17	41,71	41,48	41,33	41,26	42,19
9	-	+	+	+	42,36	42,35	42,34	42,33	42,32	42,3	42,29	42,28	42,26	42,24	42,2
10	-	+	+	-	42,72	42,71	42,7	42,69	42,68	42,67	42,66	42,65	42,63	42,62	42,6
11	-	+	-	+	42,65	42,63	42,6	42,58	42,57	42,55	42,53	42,5	42,48	42,46	42,44
12	-	+	-	-	42,54	42,53	42,52	42,5	42,49	42,48	42,46	42,43	42,4	42,38	42,35
13	-	-	+	+	42,07	42,04	42	41,99	41,97	41,95	41,92	41,9	41,88	41,86	41,84
14	-	-	+	-	42,4	42,39	42,38	42,36	42,35	42,36	42,35	42,33	42,32	42,29	42,25
15	-	-	-	+	42,2	42,19	42,18	42,16	42,15	42,14	42,12	42,11	42,1	42	41,9
16	-	-	-	-	42,65	42,61	42,58	42,55	42,35	42,51	42,49	42,46	42,4	42,38	42,36
17	HCL				42,62	42,25	41,98	41,68	41,56	41,44	40,87	40,65	40,54	40,32	40,27
18	NaCl				42,82	42,65	42,28	42,11	41,94	41,77	41,60	41,43	41,26	41,09	40,92

Anexo A.2. Velocidad de corrosión.

Corridas	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h	168 h	192 h	216 h	240 h
1	0,005000	0,000833	0,021250	0,003333	0,003750	0,023333	0,010417	0,007500	0,011667	0,001667
2	0,006250	0,007917	0,007083	0,003333	0,003333	0,025833	0,011667	0,010833	0,007500	0,003750
3	0,005000	0,008750	0,007083	0,002500	0,002917	0,022083	0,013333	0,004167	0,016667	0,003333
4	0,003750	0,008333	0,020417	0,000833	0,003750	0,005833	0,010833	0,002083	0,002083	0,002500
5	0,006250	0,010417	0,002500	0,005833	0,006250	0,023333	0,008333	0,005833	0,000833	0,001250
6	0,005833	0,007083	0,010417	0,003750	0,004167	0,020833	0,008750	0,008333	0,004167	0,001250
7	0,003333	0,005833	0,012500	0,003333	0,003333	0,012083	0,007083	0,007083	0,008333	0,000833
8	0,004167	0,004583	0,005417	0,002083	0,002083	0,019167	0,009583	0,006250	0,002917	0,003750
9	0,000417	0,000417	0,000417	0,000417	0,000833	0,000417	0,000833	0,000833	0,000833	0,001667
10	0,000417	0,000417	0,000417	0,000417	0,000417	0,000417	0,000417	0,000833	0,000417	0,000833
11	0,000833	0,001250	0,000833	0,000417	0,000833	0,000833	0,001250	0,000833	0,000833	0,000833
12	0,000417	0,000417	0,000833	0,000417	0,000417	0,000833	0,001250	0,001250	0,000833	0,001250
13	0,001250	0,001667	0,000417	0,000833	0,000833	0,001250	0,000833	0,000833	0,000833	0,000833
14	0,000417	0,000417	0,000833	0,000417	0,000000	0,000417	0,000833	0,000417	0,001250	0,001667
15	0,000417	0,000417	0,000833	0,000417	0,000417	0,000833	0,000417	0,000417	0,004167	0,004167
16	0,001667	0,001250	0,001250	0,008333	0,006667	0,000833	0,001250	0,002500	0,000833	0,000833
HCl	0,015417	0,011250	0,012500	0,005000	0,005000	0,023750	0,009167	0,004583	0,009167	0,002083
NaCl	0,007083	0,015417	0,007083	0,007083	0,007083	0,007083	0,007083	0,007083	0,007083	0,007083