

Evaluar el extracto de biomasa residual del limón como bio-inhibidor de la corrosión en tuberías de acero al carbono para transporte de CO<sub>2</sub>

Andrés Alexander Sánchez Prada

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Darío Yesid Peña Ballesteros

PhD en Corrosión

Codirector

Juan Carlos Orozco A.

Magister Ph.DC

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2025

### Dedicatoria

*A mi madre Luz Estalla Prada Motta que ha sido mi motivación durante toda mi vida, que a pesar de las dificultades y las adversidades siempre ha estado conmigo, gracias por el apoyo y amor incondicional querida madre.*

*A mi padre Jorge Eliecer Gutiérrez que a pesar de la distancia ha sido parte importante en la última etapa de mi carrera y para la construcción de mi proyecto de vida.*

*A mis hermanos Edwing, Carlos y Yessenia que, a pesar de las dificultades, han formado parte de mi crecimiento y construcción del ser humano que soy hoy.*

*A Xiomara Zareth Mendoza Yaruro quien me ha brindado paciencia y apoyo en los momentos difíciles y ha creído en mí y en mis capacidades, brindándome su cariño y compañía.*

*A todos mis amigos y compañeros en especial a Julián Torres, Daniel Toloza, Gabriel Hernández, Cristian Parra, Johan Bayona, Vanesa Guerrero y Elizabeth Montenegro por haber compartido risas, desafíos y éxitos a lo largo de este trayecto.*

*Agradezco a los profesores, técnicos y personal administrativo de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, del Grupo de Investigación (GIMBA) y del Grupo de Investigación de Corrosión (GIC) por compartir su conocimiento, apoyo y consejos en cada momento especialmente a la profesora Ana Emilsen Coy, quien me guió con valiosos consejos y enseñanzas que influirán en mi vida profesional y personal, más que impartir una clase fue y es mi consejera y amiga. Al profesor Darío Yesid Peña, con quien tuve el privilegio de desarrollar esta hermosa investigación para mi tesis de grado. A la profesora Elcy María Córdoba Tuta quien me aconsejó y me presentó la primera oportunidad de trabajo en GIMBA.*

*Al profesor Ángel Meléndez quien aparte de ser un excelente profesional y docente, como director de la escuela de Ingeniería Metalúrgica me brindó su apoyo en la parte final de mi carrera. Al profesor Jhon Fredy Palacios con quien desarrollé una gran empatía y fue el gestor de mi primer trabajo en campo. Agradezco también a la Ingeniera Química Viviana Rojas y la Ingeniera Ambiental Yury López quienes me colaboraron y guiaron en mi trabajo en el GIMBA. Quiero realizar una mención especial al Doctor en Ingeniería Química Adán Yovani León Bermúdez quien fue pieza fundamental en el desarrollo de mi proyecto de grado. Por último, agradezco a todas las personas que hicieron parte de mi proceso, cada uno brindándome su grano de arena para cumplir mis metas.*

*“Andrés Alexander Sánchez Prada”*

### **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander (UIS) y el Grupo de Investigación de Corrosión (GIC) por brindar la oportunidad de realizar este proyecto, proporcionar el entorno académico propicio para crecer tanto en el ámbito personal como en el profesional, culminando con éxito mi pregrado.

**Ingeniero Metalúrgico**

*Bondad de plata, cantor de acero, corazón de oro, temple de hierro, corteza y dureza de diamante; en tu vida lo más importante extraer conocimiento y aplicar ingenio por esa importancia benigna.*

*¡INGENIERO... SALUD!*

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	14
1. Objetivos .....	17
1.1 Objetivo general .....	17
1.2 Objetivos Específicos .....	17
2. Marco teórico y Estado del arte .....	18
2.1 Limoneno .....	18
2.2 Corrosión .....	19
2.3 Inhibidor .....	20
2.4 Arrastre por vapor .....	20
2.5 Técnicas electroquímicas .....	21
2.6 Estado del arte .....	22
3. Metodología .....	25
3.1 Revisión bibliográfica .....	25
3.2 Obtención del extracto .....	26
3.3 Determinación de la velocidad de corrosión .....	31
3.3.1 Solución de cloruro de sodio .....	31
3.3.2 Preparación de la muestra .....	33
3.3.3 Montaje celda electroquímica .....	34
3.3.4 Calculo de la velocidad de corrosión .....	35
3.3.5 Condiciones de operación .....	36

3.3.6 Rendimiento del inhibidor .....	36
3.3.7 Análisis superficial del acero al carbono a partir de microscopia electrónica de barrido (SEM) .....	37
3.3.8 Análisis de los cambios observados antes y después de la aplicación del inhibidor .....	37
4. Resultados y Discusión .....	38
4.1 Análisis electroquímico de la velocidad de corrosión del acero API N80Q a diferentes concentraciones de inhibidor .....	38
4.2 Gráficas de potencial de circuito abierto (OCP) y curvas potenciodinámicas. ....	38
4.3 Calculo de la eficiencia .....	43
4.4 Análisis morfológico y composicionales .....	43
4.4.1 Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS) .....	43
5. Conclusiones .....	47
6. Recomendaciones .....	49
Referencias Bibliográficas .....	50
Apendices .....	53

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Velocidad de degradación del material .....	42

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo del proyecto .....	25
Figura 2. Diagrama IR de d Limoneno Boughendjioua, .....	26
Figura 3. (b) Espectro FT-IR de (i) limoneno y (ii) polilimoneno catalizado por 10 % en peso de Mag-H+ .....	27
Figura 4. Extracción por arrastre con vapor .....	27
Figura 5. Filtración del aceite extraído por arrastre con vapor .....	28
Figura 6. Extracción por método soxhlet .....	28
Figura 7. Extracción por método de rotación .....	29
Figura 8. Rotoevaporación .....	29
Figura 9. Aceites extraídos por Rotoevaporación .....	30
Figura 10. Diagrama IR de limoneno 100% vs limoneno extraído .....	30
Figura 11. Diagrama IR de aceites entrados, comparados con el puro .....	31
Figura 12. (a): solución blanca, (b): solución madre .....	33
Figura 13. Cupón acero API N80Q con preparación metalográfica .....	34
Figura 14. Montaje celda electroquímica .....	35
Figura 15. Gráfica de potencial de circuito abierto (OCP), durante 30 minutos hasta alcanzar el equilibrio ( $\pm 5 \mu\text{m}$ $5 \pm 5 \text{ mV}$ ) para diferentes concentraciones de la solución (50 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 500 ppm y blanco). .....	39
Figura 16. Gráfica de curvas potenciodinámicas, durante 30 minutos hasta alcanzar el equilibrio ( $\pm 5 \mu\text{m}$ $5 \pm 5 \text{ mV}$ ) para diferentes concentraciones de la solución (50 ppm, 100 ppm, 200 ppm,	

500 ppm y blanco).....	40
Figura 17.. Norma ASTM G102-23 y ecuación de Faraday.....	42
Figura 18. Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS) de la muestra sin inhibidor de corrosión.....	44
Figura 19. Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS) de la muestra de acero API 80Q.....	45
Figura 20. Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS) de la muestra con 500ppm de inhibidor de corrosión.....	46

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Expresiones y medidas de la velocidad de corrosión. ....	53
Apéndice B. Fotografías, tablas y gráficos del SEM. ....	56
Apéndice C. Curvas potenciodinámicas anódicas. ....	62
Apéndice D. Reporte microanálisis SEM. ....	65

## Resumen

**Título:** Evaluar el extracto de biomasa residual del limón como bio-inhibidor de la corrosión en tuberías de acero al carbono para transporte de CO<sub>2</sub>\*

**Autor:** Andrés Alexander Sánchez Prada\*\*

**Palabras Clave:** Extracto, Biomasa, Bio-inhibidor, Corrosión, Fenólicos, Antioxidantes, D-limoneno, Extraer, Electroquímica, CO<sub>2</sub>, Morfológicos, Polarización lineal.

### Descripción:

Este trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar la capacidad del extracto de biomasa residual del limón (cáscaras) como un bio-inhibidor natural de la corrosión en tuberías de acero al carbono utilizadas en el transporte de CO<sub>2</sub>. La corrosión de los materiales metálicos en contacto con CO<sub>2</sub> es un problema crítico en la industria del transporte y almacenamiento de este gas, ya que puede causar daños a largo plazo en las infraestructuras y afectar su durabilidad y eficiencia. El extracto de biomasa residual de limón, rico en compuestos fenólicos y antioxidantes como el D-limoneno, ha mostrado propiedades que podrían ser aprovechadas como inhibidores de la corrosión en diversos entornos corrosivos. El trabajo se centrará en extraer los compuestos activos de la biomasa residual del limón y evaluar su efectividad mediante pruebas electroquímicas y de análisis superficial en condiciones controladas de exposición a CO<sub>2</sub>. En primer lugar, se realizaron la obtención y preparación de los compuestos activos de la biomasa residual de limón mediante métodos de extracción eficientes, luego se sometieron las muestras de acero al carbono a pruebas en un medio con CO<sub>2</sub> y con la adición del extracto para evaluar la reducción de la tasa de corrosión. Adicional a esto, se realizaron análisis electroquímicos y morfológicos con técnicas como la polarización lineal, para estudiar el comportamiento del material frente a la corrosión, además de análisis de la superficie del acero al carbono para observar los efectos del bio-inhibidor. Comparación de resultados: Posteriormente se compararon los resultados obtenidos con extractos de biomasa residual de limón con otros inhibidores comerciales, para determinar su eficiencia y viabilidad como alternativa ecológica y económica. Los resultados esperados permitieron determinar si el extracto de biomasa residual de limón puede ser un inhibidor eficaz de la corrosión en sistemas de transporte de CO<sub>2</sub>, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos y reduciendo la dependencia de inhibidores químicos sintéticos.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: PhD Darío Yesid Peña Ballesteros. Codirector: PhD Juan Carlos Orozco

### Abstract

**Title:** To evaluate residual lemon biomass extract as a corrosion bioinhibitor in carbon steel pipes for CO<sub>2</sub> transport\*.

**Author:** Andrés Alexander Sánchez Prada\*\*

**Key Words:** Extract, Biomass, Bio-inhibitor, Corrosion, Phenolics, Antioxidants, D-limonene, Extract, Electrochemical, CO<sub>2</sub>, Morphological, Linear polarization.

#### Description:

This research aims to evaluate the capacity of lemon waste biomass extract (peels) as a natural corrosion bioinhibitor in carbon steel pipes used in CO<sub>2</sub> transportation. The corrosion of metallic materials in contact with CO<sub>2</sub> is a critical problem in the CO<sub>2</sub> transportation and storage industry, as it can cause long-term damage to infrastructure and affect its durability and efficiency. Lemon waste biomass extract, rich in phenolic compounds and antioxidants such as D-limonene, has shown properties that could be exploited as corrosion inhibitors in various corrosive environments. The work focused on extracting the active compounds from lemon waste biomass and evaluating their effectiveness through electrochemical tests and surface analysis under controlled conditions of CO<sub>2</sub> exposure. First, the active compounds from residual lemon biomass were obtained and prepared using efficient extraction methods. Then, carbon steel samples were tested in a CO<sub>2</sub> medium with the addition of the extract to evaluate the reduction in corrosion rates. Additionally, electrochemical and morphological analyses were performed using techniques such as linear polarization to study the material's corrosion behavior, as well as surface analysis of the carbon steel to observe the effects of the bioinhibitor. Comparison of results: The results obtained with residual lemon biomass extracts were compared with those of commercial inhibitors to determine their efficiency and viability as an ecological and economical alternative. The expected results helped determine whether the residual lemon biomass extract can be an effective corrosion inhibitor in CO<sub>2</sub> transport systems, contributing to environmental sustainability by utilizing organic waste and reducing dependence on synthetic chemical inhibitors.

---

\* Thesis Work

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: PhD Darío Yesid Peña Ballesteros. Codirector: PhD Juan Carlos Orozco

## Introducción

Los problemas de corrosión son uno de los principales desafíos en la industria de los metales para el transporte del petróleo y gases, especialmente en ambientes que contienen CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono). La corrosión en tuberías de acero al carbono utilizadas para el transporte con CO<sub>2</sub> es un desafío crítico en la industria, ya que puede comprometer la integridad estructural de las infraestructuras y generar pérdidas económicas significativas. Este fenómeno se ve exacerbado por las condiciones agresivas del entorno, que incluyen la presencia de humedad, temperatura y la reacciones química con el CO<sub>2</sub>. Los métodos tradicionales de mitigación de la corrosión, como la aplicación de recubrimientos y el uso de inhibidores químicos, a menudo presentan desventajas, incluyendo toxicidad, impacto ambiental y costos elevados. Si bien los inhibidores a bajas concentraciones pueden mitigar la corrosión [Rodríguez et al., 2019], las variantes sintéticas suelen presentar riesgos ambientales y para la salud. Este problema se ha visto intensificado en los últimos años debido al creciente interés en el transporte y almacenamiento de CO<sub>2</sub> como parte de las estrategias de captura y almacenamiento de carbono para la mitigación del cambio climático (Shang & Zhu, 2021) y el uso de materiales con protección inadecuada, lo que provoca alteraciones estructurales en los metales. Esto afecta al CO<sub>2</sub> en el proceso de captura, aumentando los costos y los riesgos de seguridad debido a la degradación de las tuberías (Shamsa et al, 2021).

Alternativas naturales como los extractos de limón, ricos en compuestos fenólicos y ácidos orgánicos (Resano, 2022), forman complejos protectores con iones metálicos. Dada su naturaleza renovable y la disponibilidad el limón representa una opción prometedora para bio-

inhibidores sostenibles. El acero API N80 Q, utilizado con frecuencia en estas aplicaciones, es particularmente vulnerable a la corrosión cuando se expone a ambientes con CO<sub>2</sub>, lo que puede comprometer la integridad de las instalaciones industriales y resultar en importantes pérdidas económicas (Suarez, 2018).

La integración de CO<sub>2</sub> en el agua forma ácido carbónico que promueve procesos corrosivos agresivos en las superficies metálicas (Suarez, 2018). Este escenario ha impulsado la búsqueda de alternativas más ecológicas, más sostenibles y mucho más asequibles, donde los inhibidores de corrosión ecológicos derivados de extractos naturales han surgido como una opción prometedora (Gómez, 2016).

En este contexto, la valorización de desechos agroindustriales como los residuos de biomasa residual del limón para inhibidores de corrosión ecológicos ha surgido como una opción prometedora (Njoku et al., 2024). Para ser más específicos, el D-limoneno (1-Metil-4-(1-metiletetil)-ciclohexeno) es un terpeno que se encuentra en la cascara de los cítricos entre otras plantas, es un subproducto abundante de la industria del limón. La búsqueda de alternativas sostenibles ha llevado a considerar el uso de biomasa residual, un recurso abundante y subutilizado, como fuente de bio-inhibidores. El limón, en particular, genera grandes cantidades de residuos que contienen compuestos fenólicos y antioxidantes, los cuales tienen el potencial de actuar como inhibidores de la corrosión. Sin embargo, hasta la fecha, se carece de estudios que evalúen sistemáticamente la eficacia del extracto de biomasa residual del limón en la prevención de la corrosión del acero al carbono en condiciones simuladas de transporte de CO<sub>2</sub>.

Este proyecto de investigación se propone abordar esta laguna de conocimiento, evaluando el potencial del extracto de limón como una solución ecológica y económica para mitigar la corrosión en tuberías. La identificación de un bio-inhibidor efectivo no solo

contribuiría a la sostenibilidad ambiental, sino que también podría reducir costos y mejorar la seguridad en el transporte de CO<sub>2</sub>. En consecuencia, se plantea la necesidad de investigar las propiedades del extracto de biomasa residual del limón y su aplicación práctica en la industria.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Evaluar la eficacia del extracto de biomasa residual del limón como bio-inhibidor de la corrosión en tuberías de acero al carbono, en el contexto del transporte de CO<sub>2</sub>.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Extraer o separar el extracto de biomasa de las cáscaras de limón.

Evaluar diferentes concentraciones del extracto sobre un acero API N80Q utilizando técnicas electroquímicas.

Analizar el estado superficial de acero API N80Q posterior a los ensayos mediante Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).

## 2. Marco teórico y Estado del arte

### 2.1 Limoneno

El limoneno es una sustancia natural que se extrae del limón en general. Aparte del valor alimenticio e industrial de su fruto, el limonero se cultiva por su importancia para la obtención de aceites esenciales del fruto, con uso industrial como saborizante, aromatizante y cosmético, lo cual ha sido bien documentado por Guenther (1949). Como repelente lo reporta Newhan (1928) para el aceite del fruto y Rojas & Scorza (1990 y 1991) para el aceite de las hojas.

El método de extracción más antiguo y aún hoy en día usado, es el llamado "*di la scorzeta*" o exprimido de la cáscara del fruto, absorbido por una esponja natural o sintética (Shaw, 1979). Su extracción por arrastre con corriente de vapor es fácil, práctica, sencilla y económica y puede hacerse a partir de cualquier parte de la planta (Domínguez, 1979).

El aceite de limón contiene aproximadamente 2% de sustancias no volátiles, alrededor de 18 alcoholes, 16 aldehídos, 11 ésteres, 3 cetonas, 4 ácidos y 23 hidrocarburos. Esta sustancia posee un centro quiral por lo que existen 2 isómeros ópticos, el R-limoneno les da a las naranjas su olor tan característico, mientras que el S-limoneno a los limones. La obtención de limoneno se puede realizar por un arrastre de vapor de agua, ya que el aceite esencial tiene mayor densidad que el agua; el vapor de agua "arrastra" a este que se encuentra en las hojas, tallo o cáscaras de limón como se usara en este experimento. Este tipo de aceites tiene un punto de ebullición superior al del agua, pero la mezcla de aceite esencial más agua presenta un punto de ebullición inferior y por eso puede ser destilada. Al pasar por el condensador, los vapores se enfrían,

condensan y se transforman en un líquido formado por dos fases miscibles: fase orgánica (aceite esencial) y fase acuosa. En la fase orgánica, formada por el aceite esencial, se separa fácilmente de la acuosa al tener distinta densidad y ser miscibles.

## 2.2 Corrosión

La corrosión es el desgaste o la alteración de un metal o aleación, el proceso de deterioro del material metálico sucede mediante reacciones químicas y/o electroquímicas. Ocurre a través de reacciones de oxidación-reducción, que requieren electrodos (ánodo y cátodo), un electrolito conductor y una conexión eléctrica entre los electrodos (Salazar Jiménez & Jose Alberto, 2015). El fenómeno electroquímico es provocado por un flujo masivo generado por las diferencias químicas entre las piezas implicadas. Una corriente de electrones se establece cuando existe una diferencia de potenciales entre un punto y otro. Cuando desde una especie química se ceden y migran electrones hacia otra especie, se dice que la especie que los emite se comporta como un ánodo y se verifica la oxidación, y aquella que los recibe se comporta como un cátodo y se verifica la reducción. Hay varios tipos básicos de corrosión, que pueden ocurrir en situaciones individuales o combinadas los principales son: corrosión atmosférica, corrosión galvánica, corrosión por celdas de concentración (también se llama ataque de depósito o corrosión en grietas) y corrosión por tensión dinámica (también se conoce como celdas de esfuerzo, excepto que las tensiones son cíclicas) [3]. Lo cual genera costos directos e indirectos en las empresas e industrias y minimizar este fenómeno es parte importante de la industria y su desarrollo.

### **2.3 Inhibidor**

Un inhibidor de corrosión es una sustancia química que se añade a un medio para reducir la tasa de corrosión de un material, generalmente metales. Actúan formando una película protectora en la superficie del metal o modificando la química del entorno para hacer que las reacciones corrosivas sean menos probables. Los principales tipos de inhibidores de corrosión son los Inhibidores anódicos que disminuyen la velocidad de la reacción de oxidación en el ánodo, afectando la pérdida de electrones del metal, los Inhibidores catódicos que aumentan la resistencia de la reacción de reducción en el cátodo, afectando la ganancia de electrones y los Inhibidores de película que forman una película delgada sobre la superficie del metal, protegiéndolo de agentes corrosivos. Actualmente en la industria los inhibidores comunes son fosfatos, aminas, cromatos, borosilicato, compuestos de zinc, carboxílicos y sulfonatos, donde algunos de estos pueden afectar el medio ambiente o el costo de obtención es muy alto por lo cual es importante evaluar alternativas que minimicen los riesgos y contribuyan al medio ambiente. (García, 2014).

### **2.4 Arrastre por vapor**

Es el método de destilación a usar para extraer el aceite esencial del limón, el cual es el método más utilizado, en este se genera vapor en un hervidor y luego se inyecta al destilador por donde pasa a través del material botánico. El principio básico de la destilación de dos líquidos inmiscible entre sí, como el agua y un aceite esencial, es que cada uno ejerce su propia presión de vapor como si el otro componente estuviera ausente, cuando las presiones de vapor de cada

uno de los componentes alcanzan la presión del recinto, la mezcla hierve, razón por la cual aceites esenciales con puntos de ebullición de hasta 300°C evaporan a temperaturas cercanas al punto de ebullición del agua. El vapor de agua arrastra D-limoneno, componente del aceite esencial del limón, a pesar de que este tiene un punto de ebullición de 178°C a presión atmosférica estándar. El vapor y el aceite esencial son condensados en un alambique y separados. Los aceites esenciales obtenidos de esta forma son generalmente diferentes al aceite original encontrado en el material botánico en varios aspectos y suelen emplearse en manufactura de pinturas, gomas y productos textiles. Algunos químicos no volátiles en el vapor quedan en el destilador, estos son responsables del sabor más que del olor. Algunas sustancias muy volátiles se pierden en la destilación por arrastre de vapor y el proceso en sí puede producir cambios químicos, como la oxidación del aceite o la hidrólisis. (Cerutti & Neumayer, 2004).

Prácticamente la destilación por arrastre con vapor de agua es un método que se emplea para recuperar el aceite esencial residual de los desperdicios del proceso general de elaboración del aceite esencial limón y aunque la esencia obtenida es de una calidad claramente inferior a la obtenida por extracción en frío tiene una demanda que justifica su elaboración. Además, constituye el método aplicado para la recuperación de los constituyentes volátiles de otras partes del vegetal como hojas (nerolí de limón) y de tallos y brotes (pequeños granos de limón). (Quecaña, 2013).

## **2.5 Técnicas electroquímicas**

La electroquímica es una rama de la química que estudia la transformación entre energía eléctrica y la energía química, enfocándose en reacciones redox que ocurre en la interface entre conductores eléctricos e iónicos (Flower Paul & Theopold Klaus, 2023)

Para ellos usa métodos analíticos que utilizan la medición de potencial, corriente o carga para determinar la concentración de un analito o caracterizar su reactividad química, a través del estudio de reacciones redox en celdas electroquímicas (Gomez, 2016). Generando curvas potenciodinámicas las cuales son técnica electroquímica, que nos permite obtener información sobre los electrodos en estudio, como potencial de corrosión (Ecorr), la densidad de corriente (icorr) y la velocidad de corrosión (Soriano, 2022).

## **2.6 Estado del arte**

La producción de limón en Colombia ha crecido en los últimos años, impulsada por la demanda tanto interna como externa, donde su principal tipo de cultivo es el limón tahití (limón persa), el cual es más grande y más cultivado y apreciado, especialmente para la exportación, el limón criollo también se cultiva, pero en menor proporción. Las principales regiones productoras de limón en Colombia son: Valle del Cauca, Antioquia y Córdoba. En Colombia la producción anual de limón, aunque las cifras exactas pueden variar, se estima que produce alrededor de 200,000 a 300,000 toneladas de limón anualmente. Esta producción está en constante aumento debido a la implementación de mejores prácticas agrícolas y la expansión de la superficie cultivada.

El mayor mercado se encuentra en el consumo interno ya que el limón es un ingrediente esencial en la cocina colombiana, utilizado en bebidas, aderezos y platos. Y aunque no es el principal exportador de sur América se encuentra entre los cinco primeros con la incursión en exportar limón tahití a mercados como Estados Unidos y Europa, lo que ha incentivado su producción, con muchos desafíos aun como minimizar plagas y enfermedades en la plantación

dadas al clima variable del país, pero con proyectos por parte del gobierno y diversas organizaciones que han estado apoyando a los agricultores con capacitación y acceso a mercados, promoviendo el cultivo de limón como una alternativa viable. (Faostat; 2023)

Se cree que el limón (*Citrus limón*) se originó en el sudeste asiático donde le llaman el fruto de la felicidad e incluso le rinden culto, específicamente en la región que abarca India, Birmania y China, hace unos 2,500 años. Es un híbrido entre el cidro y la naranja agria. Los limones se introdujeron en el mundo árabe alrededor del siglo X, donde se cultivaron extensamente. Su cultivo se expandió a través de la Ruta de la Seda. Los limones llegaron a Europa durante las Cruzadas, alrededor del siglo XII. Inicialmente, se consideraban un símbolo de estatus y se usaban principalmente en jardines de lujo. Durante la Edad Media, se creía que los limones tenían propiedades curativas y se utilizaban para tratar diversas enfermedades. A medida que los exploradores europeos viajaban por el mundo, llevaron limones a América y otras regiones. En el siglo XVIII, se cultivaban en California y Florida. En el siglo XIX, se descubrió que el limón era efectivo contra el escorbuto, una enfermedad causada por la deficiencia de vitamina C, lo que aumentó su popularidad entre los marineros. Hoy en día, el limón es un cultivo importante en muchas partes del mundo, con México, India, Argentina y España como los principales productores.

El limón ha pasado de ser un lujo en jardines europeos a convertirse en un elemento básico en la cocina y la medicina en todo el mundo (Pinto O; 2020). El limón tiene un mercado grande en el mundo, por todas sus importaciones y exportaciones el movimiento económico que genera, en los últimos años la producción de limón fue creciendo sobre todo en Sudamérica por principal productor de limón que es la Brasil y la Argentina según datos de Faostat 2023. La cantidad de biomasa residual generada por la producción de limón puede variar según la región y

las prácticas agrícolas. Sin embargo, se estima que, de cada tonelada de limones cosechados, se genera entre 30% y 50% de residuos, que incluyen: cáscaras (son la parte más abundante de la biomasa residual), semillas (también generan una cantidad significativa de residuos) y hojas y ramas (durante la poda y el manejo del cultivo). Considerando la producción global de limón, que supera los 10 millones de toneladas anuales, esto podría significar que se generan entre 3 y 5 millones de toneladas de biomasa residual anualmente. Sin embargo, estos números pueden variar, y es importante considerar que parte de esta biomasa se puede utilizar para compostaje, producción de biocombustibles, o como materia prima para la industria (Faostat; 2023). Lo que nos permite abrir paso a investigar otros usos de estos residuos que nos generen utilidades y nos ayuden a inhibir la corrosión en aceros.

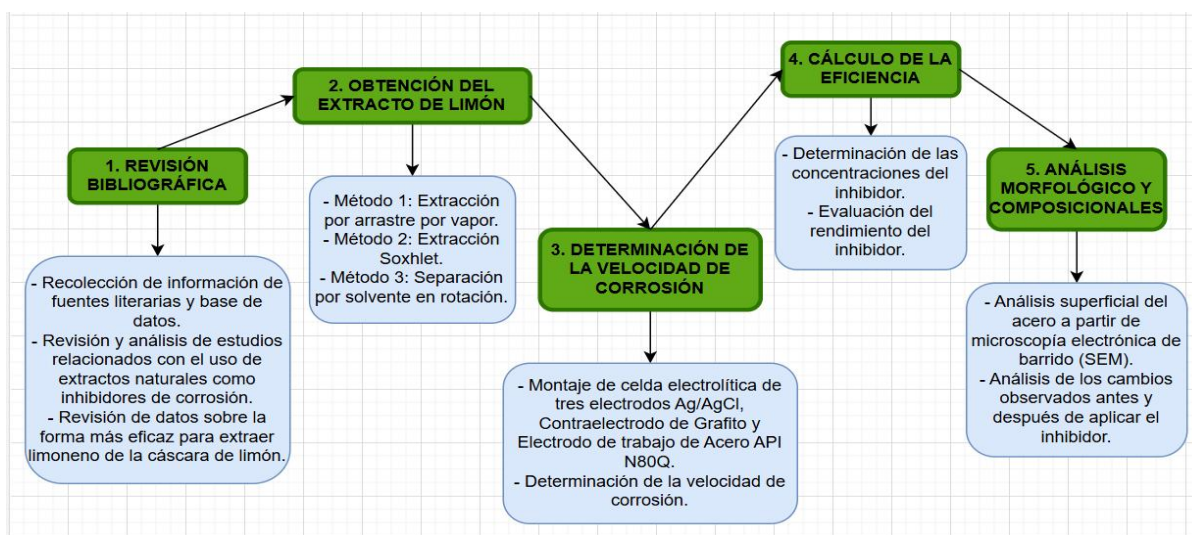
Por lo expuesto anteriormente, el limón internacionalmente es producido en todo el mundo, por lo que tiene un alto mercado. En el presente proyecto se desea aprovechar los residuos generados por el consumo de limón el cual en la cascara contiene (limoneno - Monoterpeno monocíclico) (Cerutti M, Neumayer F; 2004). principal componente en los aceites de limón y aprovecharlo en la problemática de corrosión, con el trabajo de investigación titulado “EVALUAR EL EXTRACTO DE BIOMASA RESIDUAL DEL LIMÓN COMO BIO-INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN EN TUBERIAS DE ACERO AL CARBONO PARA TRANPORTE DE CO<sub>2</sub>”

### 3. Metodología

Para llevar a cabo el desarrollo de este experimento se siguió la siguiente metodología representada por la Figura 1, en el cual se expresan los pasos a seguir de inicio a fin del proceso.

**Figura 1.**

*Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo del proyecto*



#### 3.1 Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión bibliográfica en la base de datos de experimentos tanto nacionales, como internacionales donde se trabaje con bio-inhibidores de corrosión, luego se realizó la búsqueda con extractos de limón y la forma más eficaz de extraer el aceite y por último se analizan la metodología más razonable para desarrollar el proyecto. Toda la información se analizó considerando que la problemática de la corrosión en el acero API N80Q expuesta a

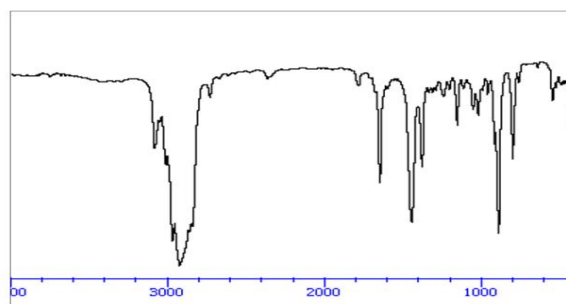
atmósferas de CO<sub>2</sub>. Simulando el posible fenómeno causado por la formación de especies ácidas en presencia de humedad, el cual representa un desafío en la integridad de estructuras metálicas, exaltando la importancia de estudiar inhibidores ecológicos como alternativas de protección medio ambiental y económica.

### 3.2 Obtención del extracto

Para la obtención del extracto de limón, se realizaron tres métodos de extracción diferentes (arrastre por vapor, soxhlet y roto evaporación), esto con el fin de obtener el limoneno con las características y grupos funcionales más similares o parecidos al espectro IR de referencia de la sustancia pura y así poder determinar qué tipo de extracción del aceite esencial de limón es más efectiva a nivel de laboratorio y pueda ser usada para inhibir la corrosión en los metales utilizados en ambientes sometidos a CO<sub>2</sub>.

#### Figura 2.

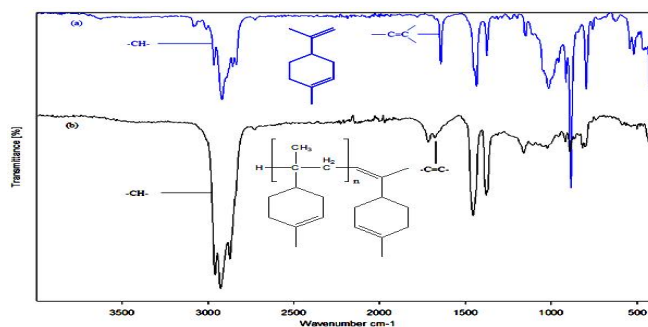
*Diagrama IR de d Limoneno Boughendjioua,*



*Nota.* Tomado de: Mezedjeri & Idjouadiene, (2020).

**Figura 3.**

(b) Espectro FT-IR de (i) limoneno y (ii) polilimoneno catalizado por 10 % en peso de Mag-H+



*Nota.* Tomado de: Derdar, Belbachir y Harrane, (2019).

Para iniciar se tomaron 3 kilogramos de cascara de limón Tahití, 1 kg por prueba: para la primera prueba con el método de arrastre por vapor se corto la cascara de limón en pequeños trozos (aproximadamente de 1 cm) y se realizo el montaje de acuerdo a las referencias bibliográficas.

**Figura 4.**

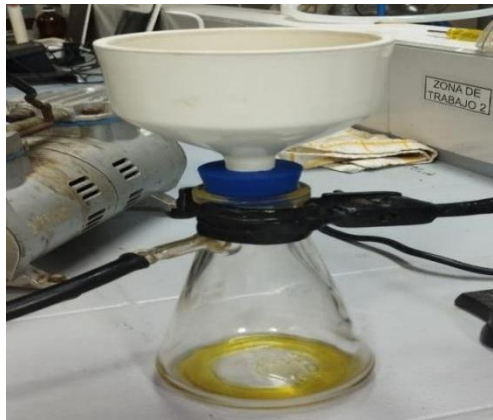
*Extracción por arrastre con vapor*



Luego de extraer el aceite se dispuso a filtrar la solución para separar el aceite de el agua y así obtener un aceite con mayor pureza.

**Figura 5.**

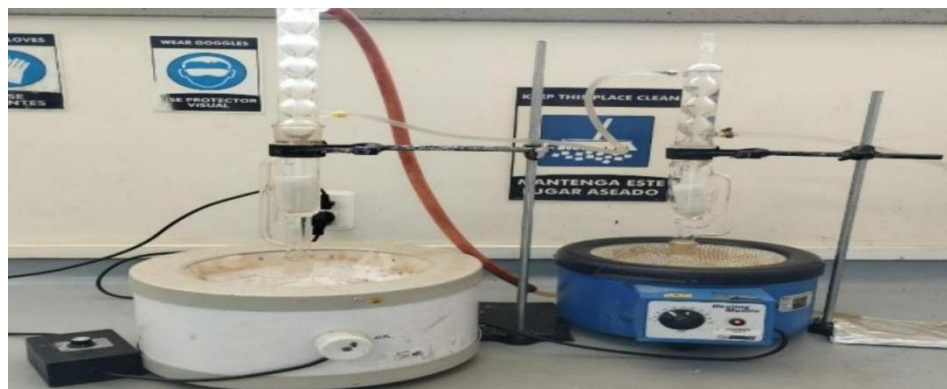
*Filtración del aceite extraído por arrastre con vapor*



Para el segundo ensayo se procede a cortar 1 kilogramo de limón a 1 centímetro y depositarlo en capsulas para el proceso Soxhlet de acuerdo a la bibliografía. La solución usada para la extracción es diclorometano ya que posee un punto de ebullición bajo (39.6 °C) el cual nos permite una separación más fácil del aceite de la solución.

**Figura 6.**

*Extracción por método soxhlet*



Para el tercer método de extracción del aceite esencial de limón se corta 1 kilogramo de cascara de limón a 1 cm y se deposita en frascos herméticos con tapa y se le agrega diclorometano para poner a rotar de 40 a 50 rpm durante 3 días.

**Figura 7.**

*Extracción por método de rotación*



Una vez obtenida la solución por el método Soxhlet y rotación, se llevó a cabo la eliminación del solvente mediante un rotoevaporador operando a la temperatura de ebullición mayor a la del del diclorometano (80°C a 120°C) para así obtener solo el aceite esencial de limón.

**Figura 8.**

*Rotoevaporación*



De los aceites obtenidos se puede observar que contiene más colorantes que pueden cambiar los grupos funcionales del aceite los aceites extraídos con diclorometano, que el que se extrajo por arrastre por vapor. Además, la textura y olor son un poco diferentes.

**Figura 9.**

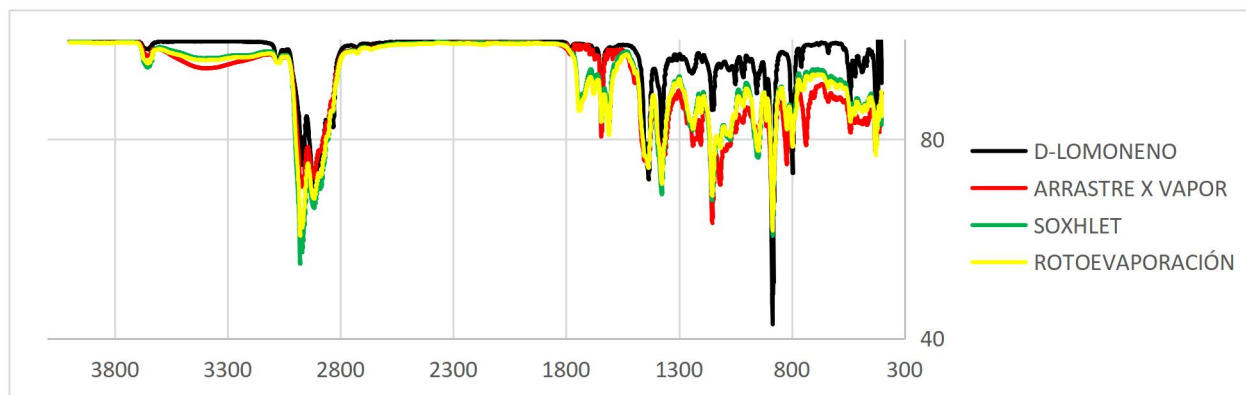
*Aceites extraídos por Rotoevaporación*



Para evaluar la eficiencia de la extracción de los aceites y observar los grupos funcionales se realiza una prueba de espectroscopia IR para observar los grupos funcionales que se lograron obtener con base en un aceite D-limoneno 100%.

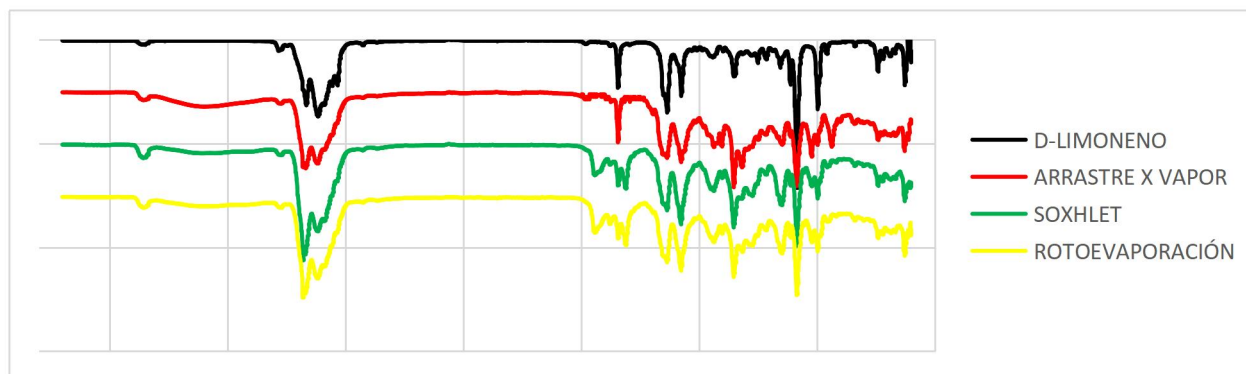
**Figura 10.**

*Diagrama IR de limoneno 100% vs limoneno extraído*



**Figura 11.**

*Diagrama IR de aceites entrados, comparados con el puro*



Se observó que los aceites extraídos cumplen con las características del aceite esencial de limón, asegurando así su disponibilidad para las pruebas electroquímicas para evaluar su efectividad como inhibidor de corrosión en acero API N80Q usado en tuberías para transporte de CO<sub>2</sub>.

### 3.3 Determinación de la velocidad de corrosión

Para la determinación de la velocidad de corrosión se planteo el siguiente procedimiento:

#### 3.3.1 Solución de cloruro de sodio

Se prepara 1 litro de solución con agua destilada y cloruro de sodio (NaCl) al 3% p/p para replicar las condiciones a las que estaría expuesto el acero en ambientes industriales la cual será nuestra solución **Blanco**.

$$30 \text{ g NaCl (3\%)} \rightarrow 100 \text{ ppm}$$

$$30 \text{ g NaCl} \rightarrow 100 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

$$30 \text{ g NaCl} \rightarrow 0.1 \text{ g (extracto)}$$

Se afora a un litro de solución con agua destilada

A esta solución se agregaron diferentes concentraciones del inhibidor disuelto en etanol, siguiendo una relación establecida para evaluar su efecto en la corrosión del inhibidor a diferentes concentraciones, se estableció una solución Madre la cual contiene 0,5 g de inhibidor disuelto en 10 ml de etanol aforada a 1 litro de solución con la salmuera.

Se uso la siguiente ecuación para obtener la cantidad de extracto para la concentración Madre (500 ppm).

$$C1 * V1 = C2 * V2$$

$$V1 = \frac{C2 * V2}{C1}$$

Se realizó para cada concentración de inhibidor y luego se afora a 500 ml de con la salmuera al 3% (Blanco). De esta forma se obtuvo la cantidad de solución para cada concentración 50 ppm = 0,05 g, 100 ppm = 0,1 g y 200 ppm = 0,2 g de inhibidor en solución.

$$V1 = \frac{200 * 500}{500}$$

$$V1 = 200 \text{ ml}$$

Como el ejemplo anterior se evidencia que para cada concentración se obtienen los ml de solución madre y luego se afora a 500 ml con la solución blanca.

**Figura 12.**

(a): solución blanca, (b): solución madre



### 3.3.2 Preparación de la muestra

Se utilizaron cuatro cupones de acero API N80Q con diámetro de 19.94 mm, ancho: 14,89 mm y profundidad: 2.76 mm, Los cuales para garantizar una superficie homogénea se realizó una preparación metalográfica siguiendo el protocolo de la norma ASTM G1-03.

Los cupones de acero se sometieron a un desgaste mecánico progresivo, se inició con papel abrasivo de carburo de silicio N° 80, 220, 400, y 600 considerando que, para análisis de corrosión localizada, se emplean pulidos más finos llegando hasta 1200 granos determinando que un acabado liso minimiza picaduras al reducir sitios susceptibles para su crecimiento (Sánchez, 2024).

**Figura 13.**

*Cupón acero API N80Q con preparación metalográfica*



### ***3.3.3 Montaje celda electroquímica***

El sistema experimental consiste en una celda de 3 electrodos que contiene un electrodo de referencia Ag/AgCl, un contra electrodo de grafito y un electrodo de trabajo acero API N80Q (ver Figura 5). Antes de las mediciones, la solución se saturó con CO<sub>2</sub> durante media hora, siguiendo el protocolo establecido de la norma ASTM G-102. Posteriormente, la celda fue conectada a un potencióstato/galvanostato (GAMRY 600), utilizando una jaula de Faraday para minimizar las interferencias causadas por el ruido y de campos eléctricos, garantizando así la precisión en la aplicación de las técnicas electroquímicas.

**Figura 14.***Montaje celda electroquímica*

### ***3.3.4 Cálculo de la velocidad de corrosión***

Para calcular la velocidad de corrosión se sigue la norma ASTM G102-23, que nos indica los procedimientos y ecuaciones necesarias para convertir datos de ensayos electroquímicos en tasas de corrosión cuantificables. Iniciando con el estudio del comportamiento electroquímico del acero por medio de las curvas de potenciodinámica. Para el ensayo se usó según la norma los potenciales de -500 a 1500 milivoltios (mV) con velocidad de barrido entre 0.6 mV/sg, para medir la corriente resultante. Para esto se debe tener en cuenta el comportamiento electroquímico de la celda que se define por la ley de Ohm:  $V=RI$ . A partir de las curvas potenciodinámicas se pueden identificar las constantes de Tafel, las cuales nos permiten determinar la cinética de la reacción electroquímica en el proceso de corrosión de los metales o aleaciones y hallar la

densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), por medio de la ecuación de Tafel que nos relaciona el potencial y la corriente mediante la formula:  $E=a+b \log(i)$  donde (E) es el potencial de corrosión, (i) es la corriente, (a) es una constante relaciona con las condiciones del sistema y (b) es la pendiente de Tafel, que proporciona información sobre la velocidad de corrosión y los mecanismos involucrados.

### ***3.3.5 Condiciones de operación***

Para el desarrollo del proyecto se tiene en cuenta las concentraciones de inhibidor de la corrosión (limoneno), seleccionaron cinco concentraciones diferentes (Blanco el cual no tiene concentración de inhibidor, 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm y 500 ppm), además de un sistema de control sin inhibidor (blanco). Estas concentraciones fueron elegidas con base a estudios previos que han utilizado concentraciones similares para evaluar la eficiencia de inhibidores naturales en ambientes con CO<sub>2</sub>.

### ***3.3.6 Rendimiento del inhibidor***

Uno de los principales objetivos de este trabajo de investigación es identificar que tan eficiente es el limoneno, extraído de la biomasa residual del cítrico por lo cual se debe calcular el rendimiento del inhibidor utilizando los resultados obtenidos en la determinación de la velocidad de corrosión.

### ***3.3.7 Análisis superficial del acero al carbono a partir de microscopía electrónica de barrido (SEM)***

La microscopía electrónica de barrido (SEM) aplicada al análisis de aceros permite obtener una información muy completa sobre la superficie, la composición, la microestructura y la naturaleza de los defectos o fases presentes. Teniendo en cuenta que este estudio no es invasivo, permite observar con gran detalle los cambios en la superficie del metal, ayudando a identificar la formación de películas protectoras generadas por el inhibidor y facilita la detección de alteraciones producidas por la corrosión, proporcionando información valiosa sobre cómo actúa el inhibidor en la protección del material.

### ***3.3.8 Análisis de los cambios observados antes y después de la aplicación del inhibidor***

Este análisis complementa el estudio morfológico al proporcionar un análisis elemental cualitativo y semi-cuantitativo de la composición química superficial del acero al carbono tratado con inhibidor. Esto nos permite identificar especialmente los elementos presentes en la interfaz metal-inhibidor, determinado la composición de las películas protectoras formadas y detectando la presencia de productos de corrosión o compuestos derivados de las interacciones entre el inhibidor y el sustrato metálico.

## **4. Resultados y Discusión**

### **4.1 Análisis electroquímico de la velocidad de corrosión del acero API N80Q a diferentes concentraciones de inhibidor**

El análisis electroquímico se logra a partir de determinar las condiciones a trabajo del bio-inhibidor (potenciales de -500 a 1500 milivoltios (mV) con velocidad de barrido entre 0.6 V/H) y sus concentraciones (Blanca, 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm y 500 ppm) de acuerdo con la metodología planteada. El ensayo para obtener las gráficas de resistencia a la polarización (OCP) y las respectivas curvas potenciodinámicas se obtienen por medio del potenciostato Gamry 600.

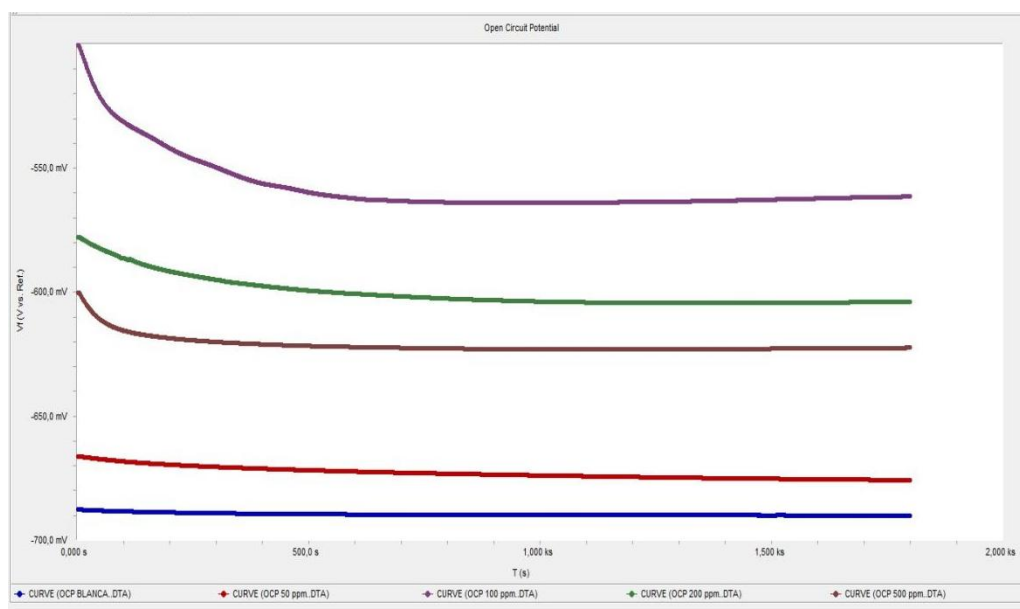
### **4.2 Gráficas de potencial de circuito abierto (OCP) y curvas potenciodinámicas.**

Con las condiciones de trabajo y concentraciones de bio-inhibidor ya establecidas se procede a realizar la curva de medición de potencial de circuito abierto, comprando cada una de ellas. Se midió el potencial de circuito abierto durante 30 minutos y pre burbujeado 15 minutos con CO<sub>2</sub>, permitiendo que el sistema alcanzara un estado estacionario antes de aplicar técnicas electroquímicas. El estado estacionario se alcanzó cuando las variaciones en el potencial fueron menores a  $\pm 5$  mV. Realizando el análisis muestra que todas las concentraciones muestran un comportamiento favorable, desde el punto de vista termodinámico para inhibir la corrosión dando un indicio que el aceite esencial de limón (limoneno) potencialmente ejerce una actividad de inhibición para proteger el metal contra la corrosión. A continuación se presentaran cada una

de las gráficas obtenida y un comparativo para observar con mayor claridad los resultados obtenido.

### Figura 15.

Gráfica de potencial de circuito abierto (OCP), durante 30 minutos hasta alcanzar el equilibrio ( $\pm 5$  ppm  $5 \pm 5$  mV) para diferentes concentraciones de la solución (50 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 500 ppm y blanco).

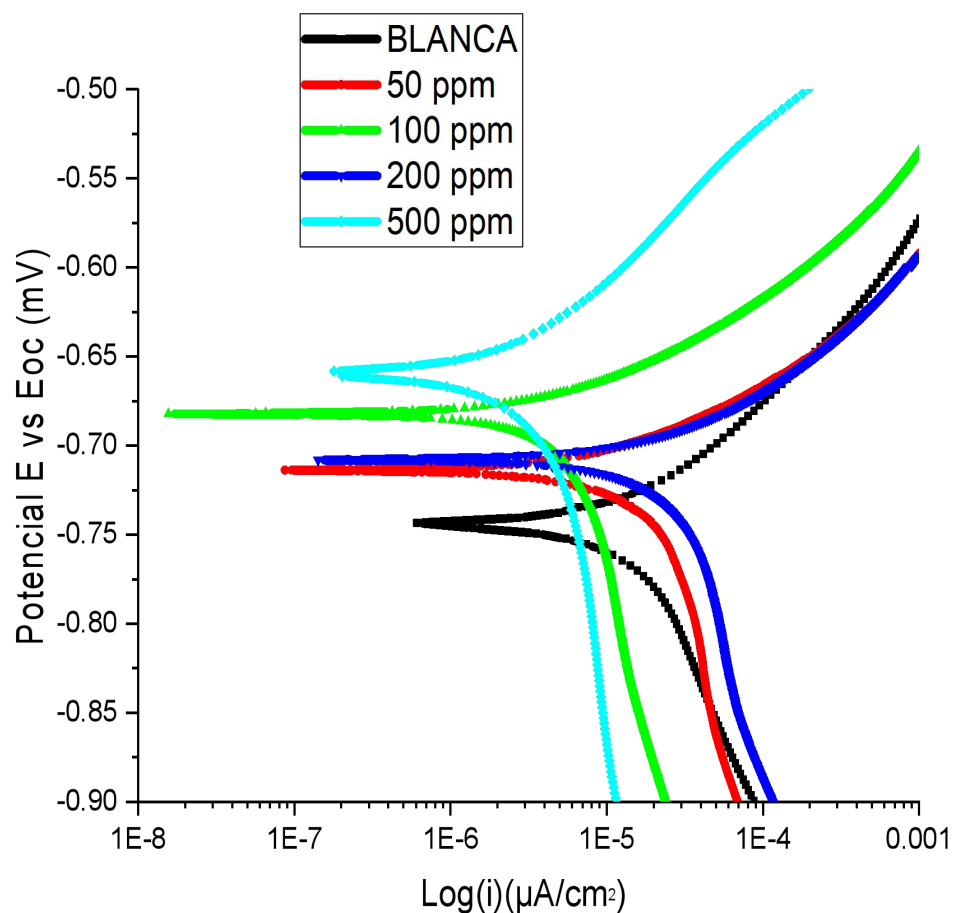


Las curvas potenciodinámicas muestran el comportamiento electroquímico del acero API N80 Q en presencia de diferentes concentraciones del inhibidor como se puede ver en la grafico 6, realizando un análisis se puede decir que a concentraciones altas de inhibidor la protección contra la corrosión es más favorable. Esta figura me permite identificar parámetros como el potencial de corrosión  $E_{cor}$ ,  $V_{corr}$ ,  $i_{corr}$ .

Se realizó un análisis de las pruebas electroquímicas para evaluar el inhibidor de corrosión derivado del extracto de biomasa residual del limón. El estudio se llevó a cabo utilizando las cinco concentraciones diferentes del inhibidor sobre acero API N80 Q.

**Figura 16.**

*Gráfica de curvas potenciodinámicas, durante 30 minutos hasta alcanzar el equilibrio ( $\pm 5$  pm  $5 \pm 5$  mV) para diferentes concentraciones de la solución (50 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 500 ppm y blanco)*



A partir de las curvas de polarización obtenidas en el potenciostato, se toma la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), para con esta calcular la velocidad de corrosión.

Los resultados sugieren un efecto protector del inhibidor sobre el acero API N80 Q. Al compararlos con la prueba realizada sin inhibidor, las tendencias observadas en los parámetros electroquímicos refuerzan la evidencia de una posible actividad inhibidora frente a la corrosión. Esto podría deberse a que el inhibidor protege el acero API N80Q y al modificar parámetros electroquímicos se observa un desplazamiento positivo del potencial de corrosión, reducción de la densidad de corriente de corrosión y aumento en la resistencia a la polarización, lo que sugiere menor velocidad de corrosión. Además, los cambios en las pendientes de Tafel indican una alteración en los mecanismos de corrosión. Finalmente, el inhibidor favorece la formación de una película protectora, reduciendo la interacción del acero con el medio corrosivo (Zavaleta-Gutierrez, Polo-Briceño, Siche, & Angelats-Silva, 2018)

En los datos obtenidos de densidad de corriente  $i_{corr}$  indica la velocidad de degradación del material, donde valores más altos indican una mayor tasa de corrosión. Usando la ecuación de Faraday se puede calcular la velocidad de corrosión. La velocidad de corrosión mide la tasa de degradación del material y se expresa en unidades de (mpy). Como se observa en la tabla 1, la concentración de 50 ppm presenta una velocidad de corrosión muy alta, lo que sugiere una baja efectividad del inhibidor en esta concentración y, por lo tanto, una menor protección contra la corrosión. Por otro lado, la concentración de 500 ppm muestra la velocidad de corrosión más baja, lo que indica que el inhibidor es posiblemente más eficiente en esta concentración, proporcionando una mejor protección contra la corrosión.

**Figura 17.**

*Norma ASTM G102-23 y ecuación de Faraday.*

### ASTM G102-23

Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements

Penetration Rate Unit (CR)	$i_{corr}$ Unit	$\rho$ Unit	$K_1$	Units of $K_1^A$
mpy	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$\text{g}/\text{cm}^3$	0.1288	mpy s g/ $\mu\text{A}$ cm
mm/yr <sup>B</sup>	A/m <sup>2B</sup>	kg/m <sup>3B</sup>	327.2	mm s kg/A m y
mm/yr <sup>B</sup>	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$\text{g}/\text{cm}^3$	$3.27 \times 10^{-3}$	mm s g/ $\mu\text{A}$ cm y

Valores de las constantes para la ecuación de Faraday

$$K = 3,27 \times 10^{-3} \quad i_{corr} = \quad EW = 55,84 \quad \rho = 7,87 \text{ g}/\text{cm}^3$$

$$\log_{10}(x) = 0,51$$

$$x = 10^{0,51} = 3,236 \mu\text{A}$$

$$CR = \frac{K * i_{corr} * EW}{\rho}$$

**Tabla 1.**

*Velocidad de degradación del material*

Concentraciones	log $i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$E_{corr}$ (V Vs Ag/AgCl)	$V_{corr}$ (mpy)
<b>Blanco</b>	1E-50	1.000023026	-0.74	0.9138955
<b>50ppm</b>	1E-65	1.000003454	-0.72	0.9138776
<b>100ppm</b>	1E-62	1.000002763	-0.67	0.9138769
<b>200ppm</b>	1E-51	1.000025329	-0.71	0.9138976
<b>500ppm</b>	1E-60	1.000002303	-0.67	0.9138765

En la tabla 1, se observa que, en la concentración de 50 ppm, la corriente de corrosión  $i_{corr}$   $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  es mayor que la del blanco, pero la velocidad de corrosión  $V_{corr}$  sigue siendo alta, lo que indica una protección parcial. La relación entre la corriente de corrosión  $i_{corr}$  y la velocidad de

corrosión  $V_{\text{corr}}$  no siempre es lineal, ya que otros factores como las pendientes anódicas  $\beta_a$  y catódica  $\beta_c$ , así como el potencial de corrosión  $E_{\text{corr}}$ , influyen en el proceso.

### **4.3 Calculo de la eficiencia**

El análisis de las pruebas electroquímicas para evaluar el inhibidor de corrosión del extracto de biomasa residual del limón sobre el acero API N80 Q mostró resultados prometedores en cuanto a la eficiencia del inhibidor como se observó por medio de la velocidad de corrosión. A través de las curvas potenciodinámicas y el método de extrapolación de Tafel, se determinaron parámetros claves como la densidad de corriente, potencial de corrosión y la velocidad de corrosión. Los resultados determinan que la concentración de 500 ppm del inhibidor, la cual contiene 0,05 g de aceite esencial de limón en solución ofrece una mejor protección contra la corrosión, al presentar menores valores de densidad de corriente, pendientes de Tafel más moderados y una velocidad de corrosión más baja en comparación con las demás concentraciones.

### **4.4 Análisis morfológico y composicionales**

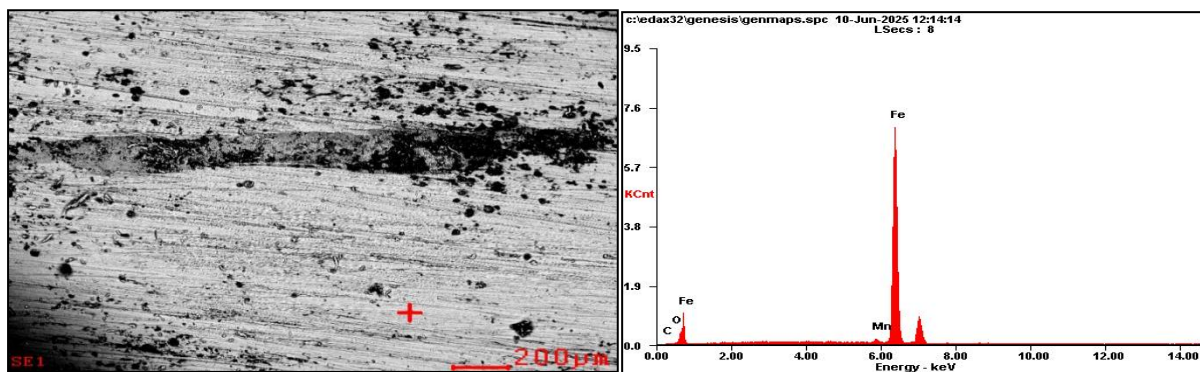
#### ***4.4.1 Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS)***

Los resultados de SEM fueron obtenidos mediante el microscopio de electrónico de barrido, equipado con un sistema de rayos X por energía dispersa de la marca Bruker. El análisis morfológico para el efecto del inhibidor de corrosión en el acero API N80, se realizó a 3

muestras utilizadas en las pruebas electroquímicas, la primera un blanco (sin inhibidor), una con sin someterse al ambiente agresivo y otra con 500ppm de inhibidor. En la figura 18 se observa la muestra sin inhibidor de corrosión, en una solución de NaCl más CO<sub>2</sub> por 30min. Donde se puede ver un daño sobre la superficie del metal, generado por la presencia de productos de corrosión adheridos a la superficie del material, como muestra la caracterización elemental mediante energía dispersiva de rayos X (EDS), con un contenido de C (1.94%), O (10.35), Cl (8.84%), Mn (1.31%), Fe (49.07%), realizando un comparación con la composición del material tuvo una disminución del material ya que su porcentaje de hierro del alrededor el 90%-98% expuesta NaCl y CO<sub>2</sub> convertido en ácido carboxílico paso a un 49.07%. También se puede decir que por la presencia de Cl hay posibilidad de presencia de productos clorados y por la presencia de oxígeno se puede decir que hay oxígeno.

**Figura 18.**

*Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS) de la muestra sin inhibidor de corrosión*

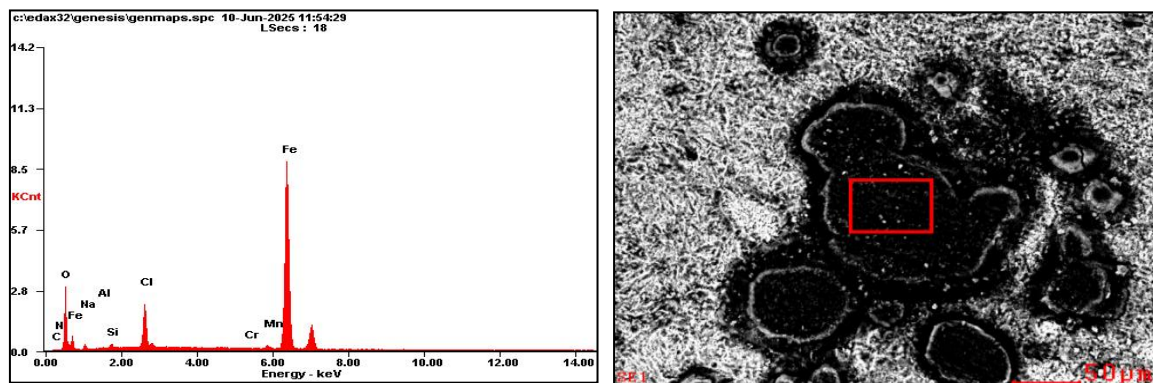


En la figura 19 se puede observar la muestra con acero sin someterse a un ambiente agresivo y sin inhibidor de corrosión, donde se puede ver que hay una menor corrosión que el anterior, aunque se pueden observar presencia de productos de corrosión. Mediante la

caracterización elemental EDS, podemos ver que el porcentaje de Fe es mayor aunque ya presenta algunos signos de corrosión por el oxígeno y demás elementos que se encuentran en el aire, además sin cloro lo que quiere decir que la presencia de productos clorados es menor.

**Figura 19.**

*Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS) de la muestra de acero API 80Q*

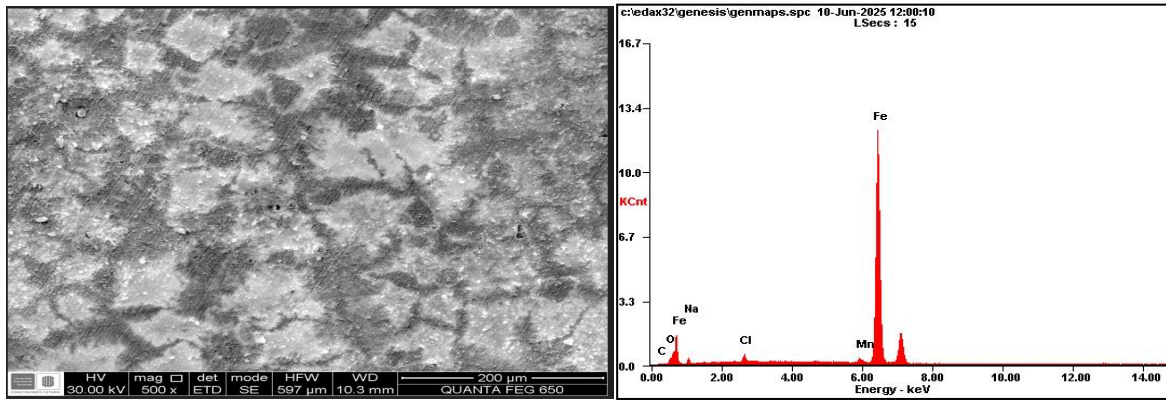


En la figura 20 se puede observar la muestra expuesta a una concentración de 500ppm de inhibidor, lo cual presenta un mecanismo por fenómeno de fisisorción sobre el material, revelando la formación de una película. Por medio de la caracterización EDS, podemos ver que hay presencia de Cl muy baja y la presencia de oxígenos disminuyo a una 7.27%, lo que se puede decir que a la concentración de 500ppm demuestra que el inhibidor de limón protege al material de la corrosión.

Al realizar la comparación de los EDS de la prueba del blanco de inhibidor de biomasa residual del limón, se evidencia que en estas pruebas la superficie del material presenta iones de cloro en su composición, lo cuales son causantes de la corrosión, mientras que la concentración de 500ppm no se observan estos compuestos, favoreciendo así la reducción de la velocidad de corrosión sobre el acero.

**Figura 20.**

*Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS) de la muestra con 500ppm de inhibidor de corrosión*



## 5. Conclusiones

A partir de los resultados del presente trabajo se puede concluir que la mejor forma de extraer el aceite esencial de limón es por medio de arrastre por vapor (nivel laboratorio) es un método exitoso, con gran potencial para su uso en diversos procesos y mayor concentración de sus componentes básicos sin impurezas.

El análisis electroquímico realizado en el presente estudio demostró que el extracto de biomasa residual de limón tiene una gran capacidad de inhibición del extracto de corrosión del acero API N80 expuesto a condiciones detonantes de CO<sub>2</sub> y cloruro de sodio, previniendo la formación de carbonatos, cloruros, óxidos e hidróxidos de hierro, además de ácidos que aumentan la velocidad de corrosión en el acero.

La concentración de 500 ppm presentó mejores efectos en cuanto a la ruptura y densidad de corriente de corrosión, es decir, la película formada por el extracto de biomasa residual actuaba como una barrera que impedía o reducía el proceso de corrosión en la superficie del acero API N80.

La biomasa residual del limón, en este caso la cascara residual, contienen compuestos como el D-limoneno el cual es un terpeno que actúan como agentes inhibidor, formando una película protectora sobre la superficie metálica y reduciendo la velocidad de corrosión. Para este estudio ha demostrado ser un inhibidor eficiente de la corrosión en acero API 80Q en medios ácidos, con mayor eficiencias a mayor concentración de inhibidor en condiciones experimentales controladas.

Los estudios electroquímicos sugieren que la adsorción de los compuestos activos sobre la superficie del acero es espontánea y favorecida por interacciones electrostáticas, lo que indica un proceso de fisisorción.

La biomasa residual del limón, al ser abundante y de bajo costo, ofrece una alternativa sostenible y económica frente a los inhibidores sintéticos tradicionales, con potencial para su implementación en industrias como la petroquímica, energética y de transporte. El aprovechamiento de residuos agroindustriales como la biomasa del limón no solo contribuye a la protección de materiales metálicos, sino que también promueve la sostenibilidad y el reciclaje de subproductos agrícolas.

## 6. Recomendaciones

Se recomienda investigar un proceso de extracción del aceite esencial de limón, a nivel industrial que permita optimizar recursos y acelerar el proceso de extracción del limoneno.

Se recomienda cambiar variables y concentración de inhibidor para así hallar la mejor concentración y eficacia del inhibidor en el acero.

Se recomienda desarrollar métodos para asegurar una aplicación uniforme del inhibidor anticorrosivo en la superficie del metal.

Recomiendo potenciar esta investigación para estudios posteriores donde se evidencie a que nivel de efectividad se puede usar el inhibir de corrosion a base de biomasa residual del limón.

### Referencias Bibliográficas

- Arenas, Y. A., & Zapata, R. B. (2016). Simulated control in Aspen Dynamics for the production of limonene epoxide at pilot scale/Control simulado en Aspen Dynamics para la producción de epóxido de limoneno a escala piloto. *Redes de Ingeniería*, 7(2), 127-138.
- Barrera Zapata, R. D. J. (2016). Control simulado en Aspen Dynamics para la producción de epóxido de limoneno a escala piloto.
- Boughendjioua, H., Mezedjeri, N. E. H., & Idjouadiene, I. (2020). Chemical constituents of Algerian mandarin (*Citrus reticulata*) essential oil by GC-MS and FT-IR analysis. *Current Issues in Pharmacy and Medical Sciences*, 33(4), 197-201.
- Cabrera, R. A., & Losada, R. A. (2010). *Evaluación de inhibidores de incrustaciones en tuberías de agua de producción en presencia de CO<sub>2</sub>* (Tesis de doctorado).
- Cerutti, M., & Neumayer, F. (2004). Introducción a la obtención de aceite esencial de limón. *Invenio: Revista de investigación académica*, (12), 149-155.
- Cravotta III, CA (2021). Herramientas interactivas de modelado de la calidad del agua PHREEQ-N-AMDTreat para evaluar el rendimiento y el diseño de sistemas de tratamiento para el drenaje ácido de minas. *Geoquímica Aplicada*, 126, 104845.
- Derdar, H., Belbachir, M. y Harrane, A. (2019). Síntesis ecológica de polilimoneno utilizando Maghnite-H<sup>+</sup>, una arcilla de montmorillonita intercambiada, como ecocatalizador. *Boletín de Ingeniería de Reacciones Químicas y Catálisis*, 14 (1), 69-78.
- Djouahri, A., Sebiane, S., Kellou, F., Lamari, L., Sabaou, N., Baaliouamer, A. y Boudarene, L. (2016). Efecto inhibidor sobre la corrosión del acero al carbono en medios ácidos,

- actividades antioxidante, antimicrobiana, anti-5-lipooxigenasa y anti-xantina oxidasa del aceite esencial de hojas de *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters. *Revista de investigación de aceites esenciales* , 29 (2), 169–178. <https://doi.org/10.1080/10412905.2016.1216014>
- Fernández, J. A. G. (1989). *Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas*. Editorial CSIC-CSIC Press.
- García Inzunza, R. (2014). Inhibidores de corrosión de acero en medios ácidos a partir de extractos naturales.
- Hammouti, B. (2009). Limonene as green inhibitor for steel corrosion in hydrochloric acid solutions. *Acta physico-chimica Sinica*, 25(7), 1254-1258.
- Ibarrab, J. R. R., González, R. I. C., Guevaraa, E. A., & Guatemala, G. M. (s.f.) *Extracción enzimática de limoneno en cáscara de limón*.
- López, G., Azar, M. C., Corredor, M. A., Eissner, W., Zeippen, C. J., Mendoza, C., ... & Sandoz, P. (1999). Decanato de Investigación y Desarrollo Académico MIRAI-Modulo de Información y Repositorio de Actividades de Investigación. In *Anales de la Universidad Metropolitana* (Vol. 7, pp. 231-239).
- Najem, A., Sabiha, M., Laourayed, M., Belfhaili, A., Benhiba, F., Boudalia, M., ... y Zarrouk, A. (2022). Nuevo inhibidor anticorrosivo ecológico de cáscaras de cítricos para acero dulce en HCl 1 M: Enfoques experimentales y teóricos. *Chemistry Africa* , 5 (4), 969-986.
- Pineda, J. E. D. (2003). Proceso para producir pectinas cítricas. *Revista universidad EAFIT*, 39(129), 21-29.
- Pinto Alcon, O. B. *Obtención de aceite esencial a partir de cáscaras de limón para la Industria Cosmética a nivel Bench Scale* (Tesis de doctorado).

Quecaña Aldunate, E. (s.f.) Extracción de aceite esencial de la cascara de limón: Modalidad de graduación (Investigación Aplicada).

Rodríguez, J. F., Rodríguez, E., Suárez, L. F., Velasco, K. T., Ramos, C., & Malagón, E. (2020). Eficiencia de un inhibidor verde extraído de la cáscara de la sandía en la corrosión del acero estructural A36 evaluado en medios ácido y salino. *Revista Ion*, 33(1), 33-38.

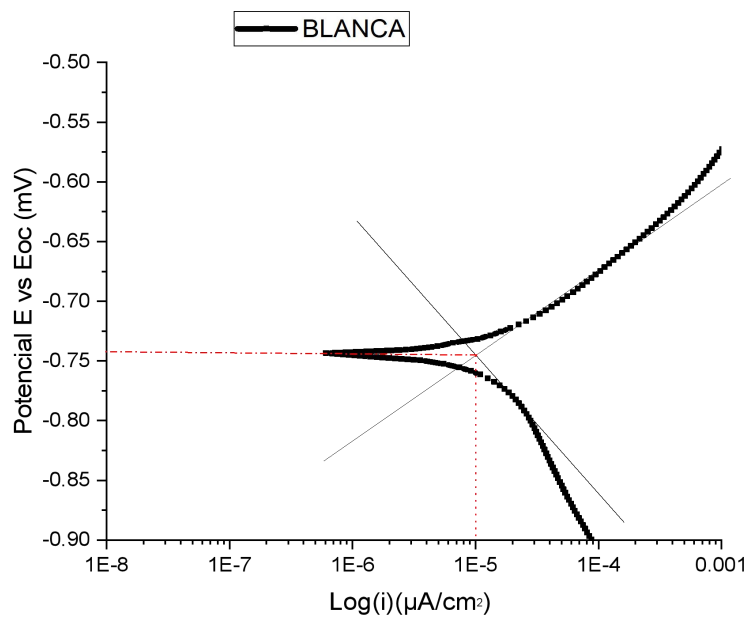
Trade Map, (2023) *Estadística de comercio para el desarrollo Internacional de las Empresas*

Villa, A. L. (2005). *Estudio cinético de la epoxidación catalítica de limoneno*.

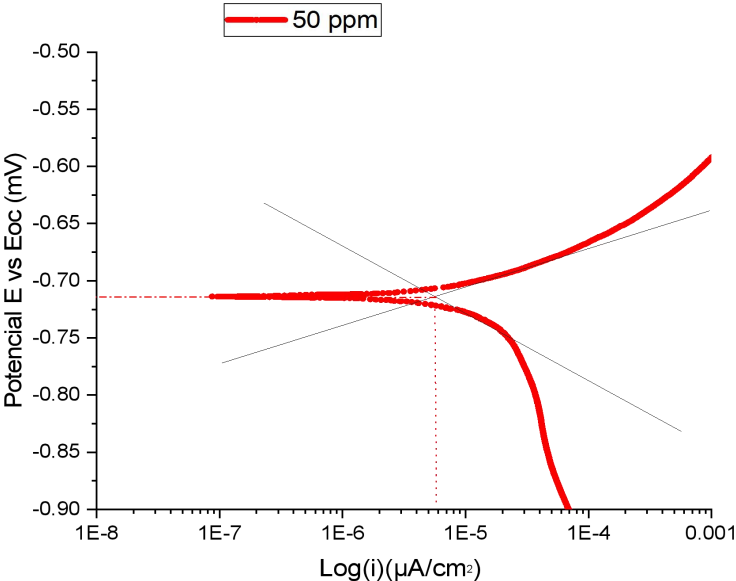
Zavaleta-Gutierrez, N. E., Polo-Briceño, E. R., Siche, R., & Angelats-Silva, L. M. (2018). Inhibición de la corrosión del acero ASTM A192 en solución de ácido clorhídrico por el mucilago de *Linum usitatissimum*. *Matéria* (Rio de Janeiro), 23, e12054.

## Apendices

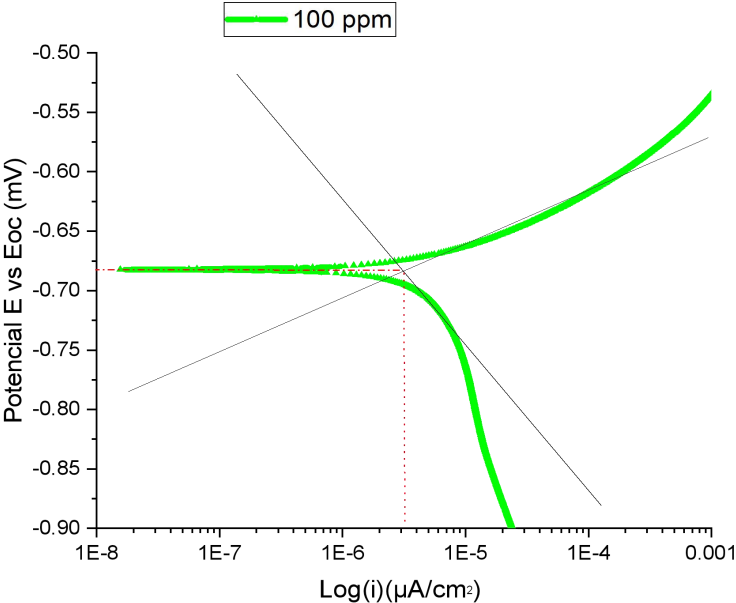
## Apéndice A. Expresiones y medidas de la velocidad de corrosión.



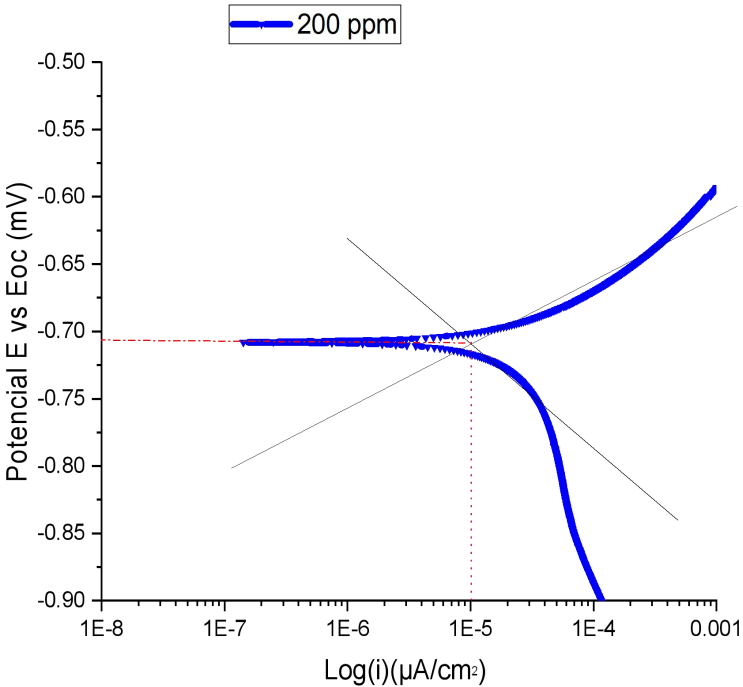
Gráfica de curvas potenciodinámicas, durante 30 minutos hasta alcanzar el equilibrio ( $\pm 5 \mu\text{m}$   $5 \pm 5 \text{ mV}$ ) para diferentes concentraciones de la solución (blanco).



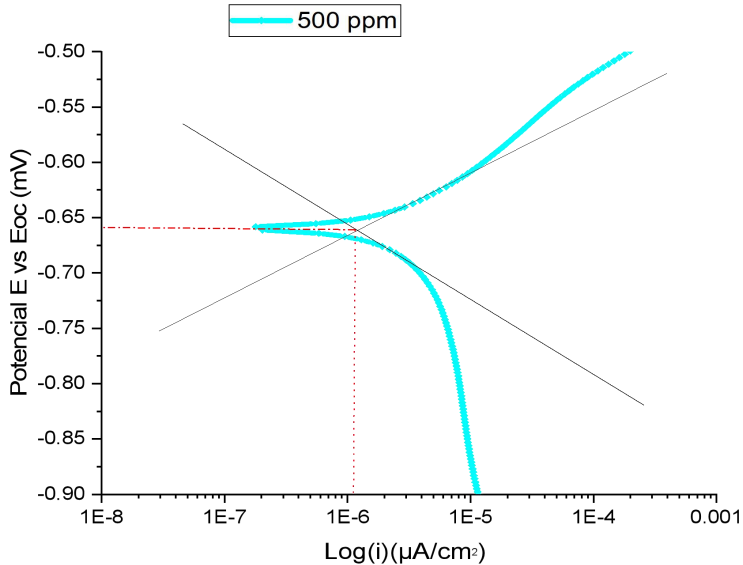
Gráfica de curvas potenciodinámicas, durante 30 minutos hasta alcanzar el equilibrio ( $\pm 5 \mu\text{m}$   $5 \pm 5 \text{ mV}$ ) para diferentes concentraciones de la solución (50 ppm ).



Gráfica de curvas potenciodinámicas, durante 30 minutos hasta alcanzar el equilibrio ( $\pm 5 \mu\text{m}$   $5 \pm 5 \text{ mV}$ ) para diferentes concentraciones de la solución ( 100 ppm).



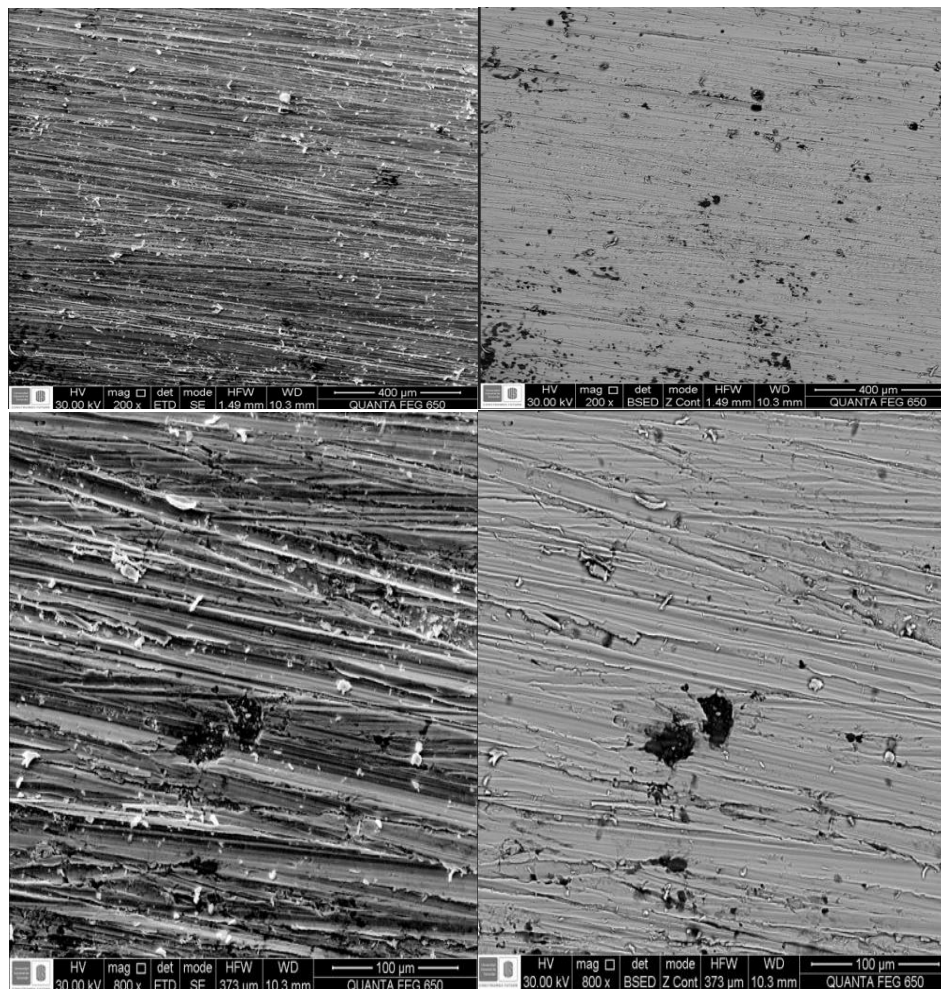
Gráfica de curvas potenciodinámicas, durante 30 minutos hasta alcanzar el equilibrio ( $\pm 5 \mu\text{m}$   $5 \pm 5 \text{ mV}$ ) para diferentes concentraciones de la solución (200 ppm).

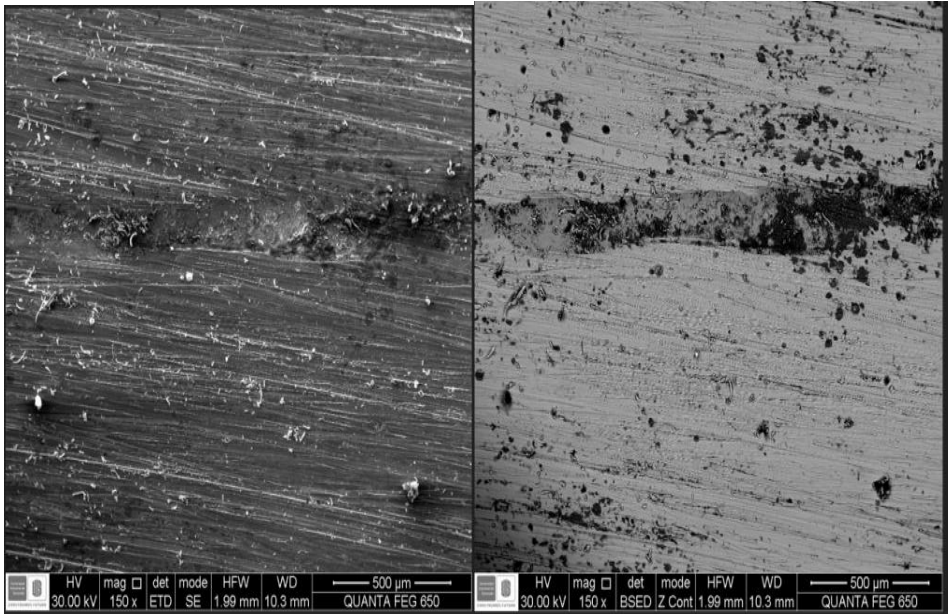
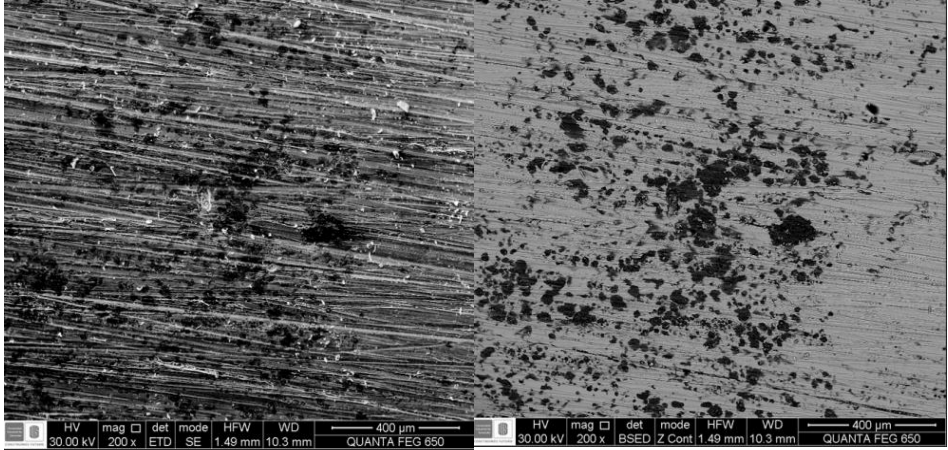


Gráfica de curvas potenciodinámicas, durante 30 minutos hasta alcanzar el equilibrio ( $\pm 5 \mu\text{m}$   $5 \pm 5 \text{ mV}$ ) para diferentes concentraciones de la solución ( 500 ppm ).

**Apéndice B. Fotografías, tablas y gráficos del SEM.****Muestra 1. acero base.**

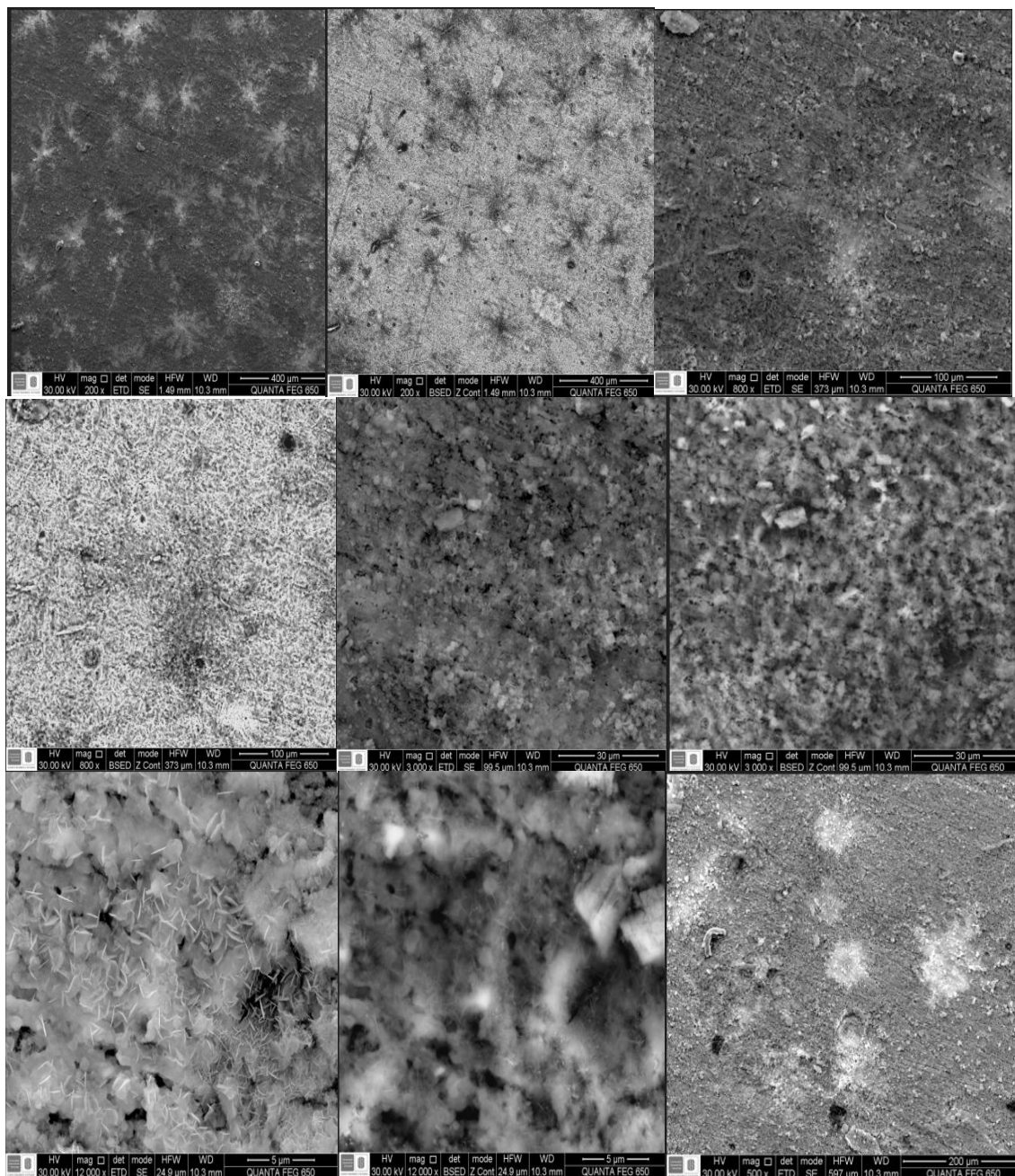
En este punto se pueden observar las microgrfias obtenidas en el SEM para el acero API 80Q previo a el sometimiento a un ambiente agresivo con salmuera y CO2.

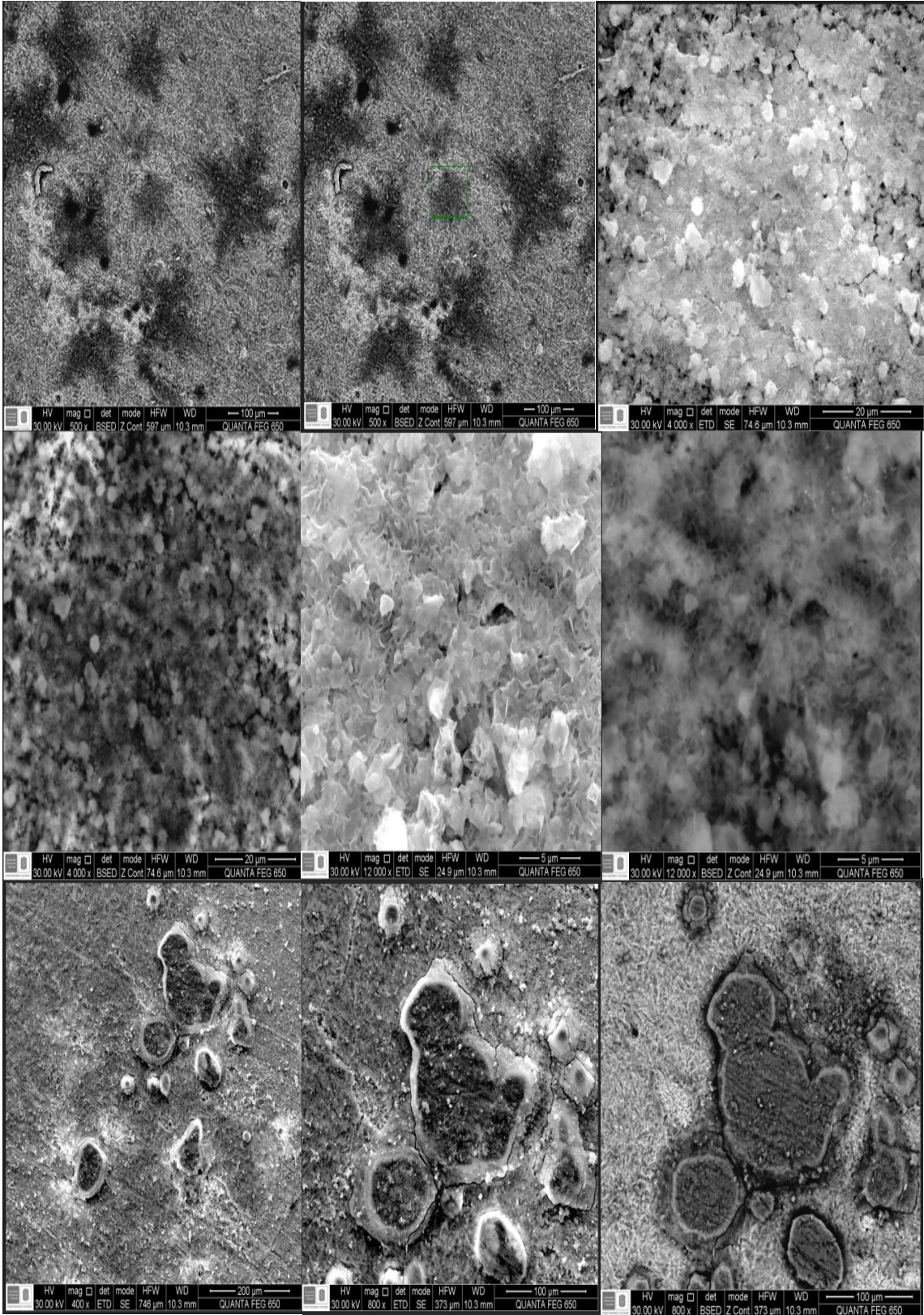




**Muestra 2.** acero sin inhibidor.

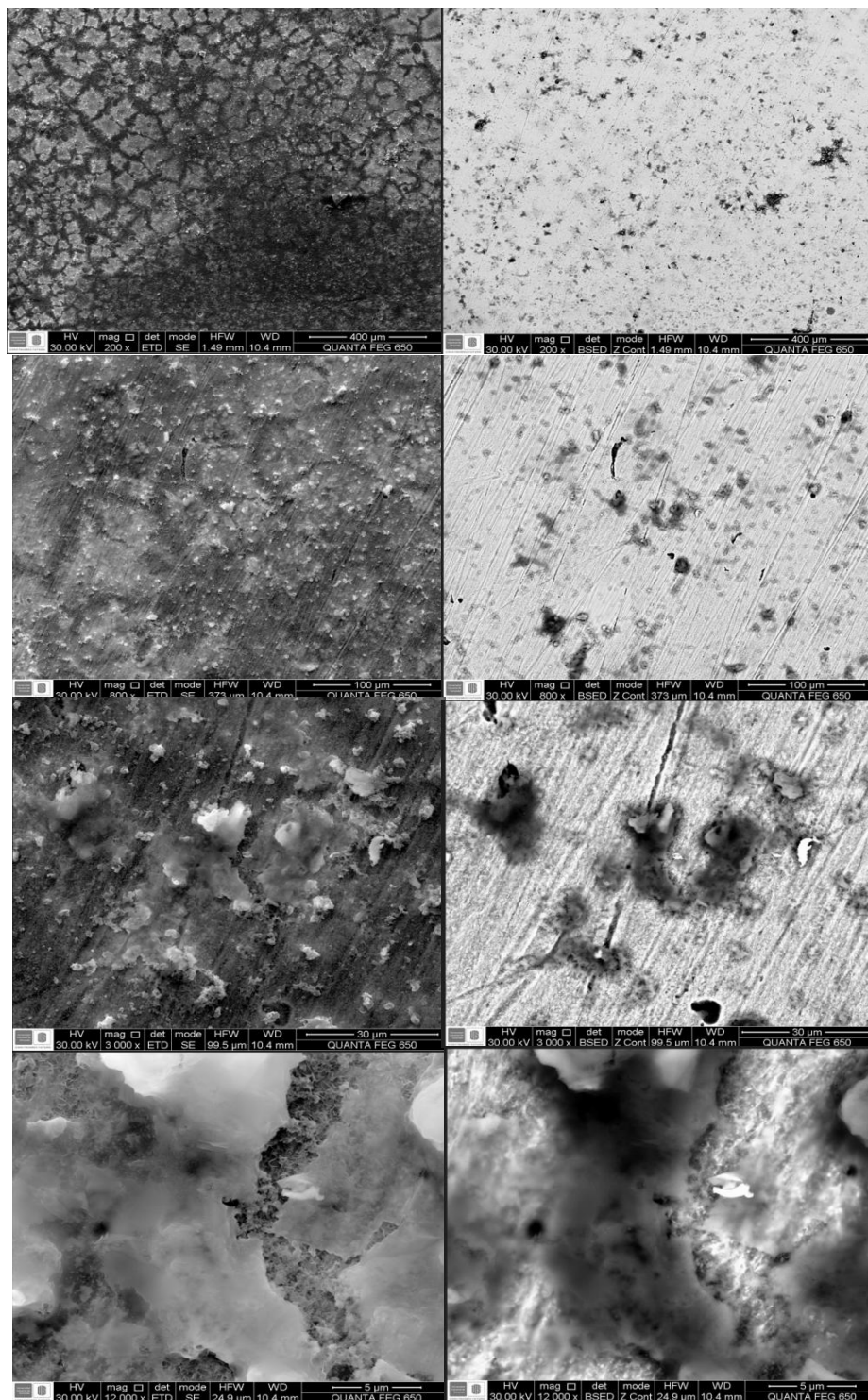
Aquí podemos encontrar el efecto causado por el ambiente agresivo al que es sometido el acero API 80Q y sus afectaciones y efecto de la corrosión cauda por el CO<sub>2</sub> y la salmuera.

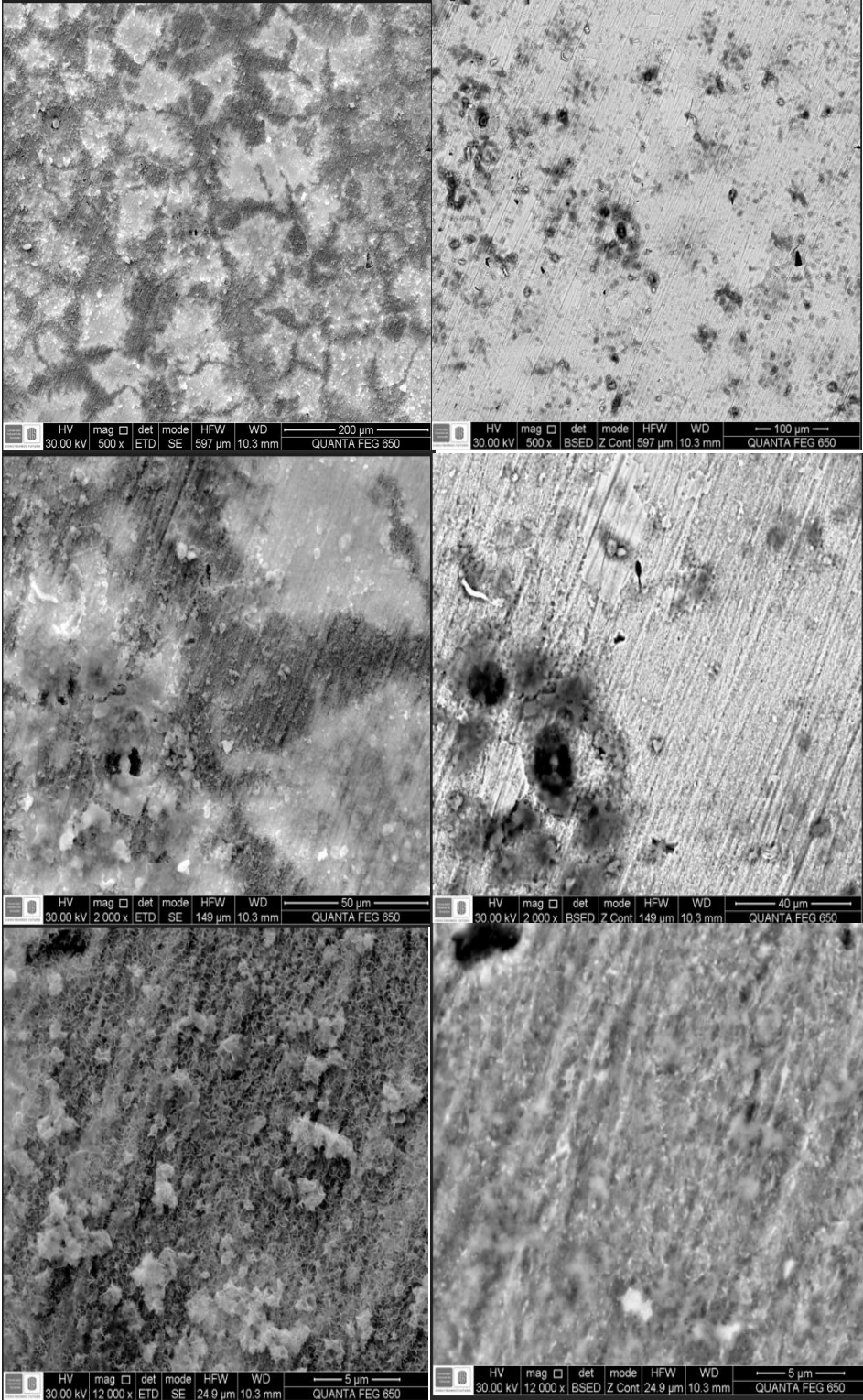




**Muestra 3.** acero con inhibidor 500 ppm.

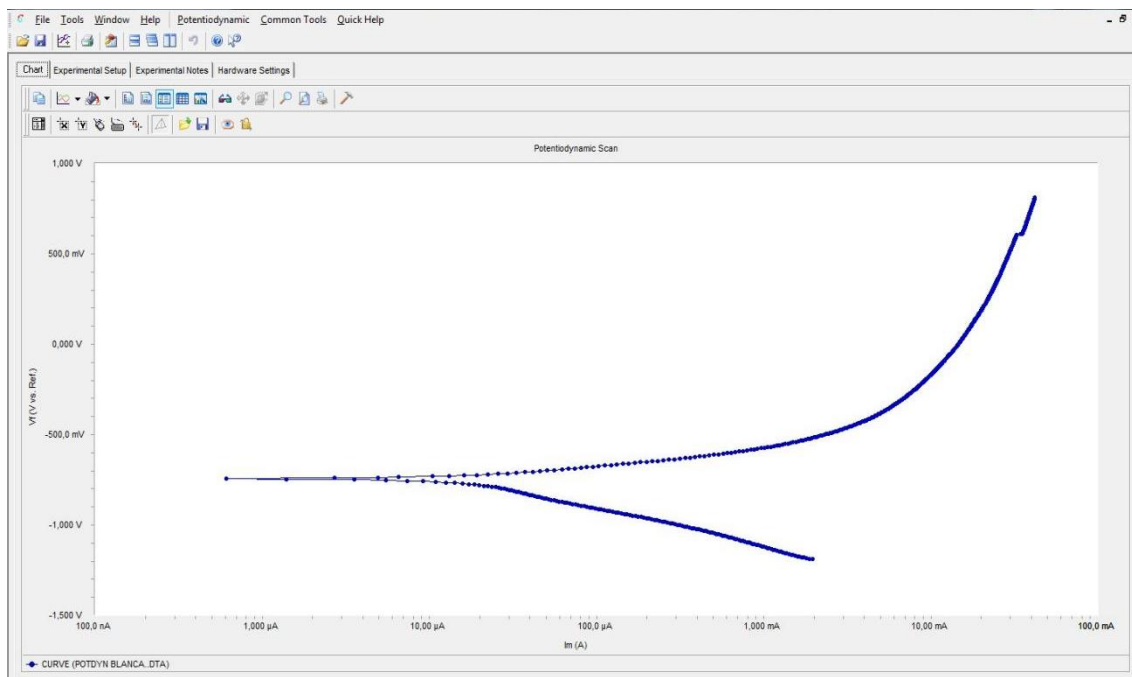
Las micrografías mostradas se evidencia una capa que recubre la superficie del metal, lo cual evidencia la formación de una protección inhibitoria de la corrosión en el acero API 80Q.



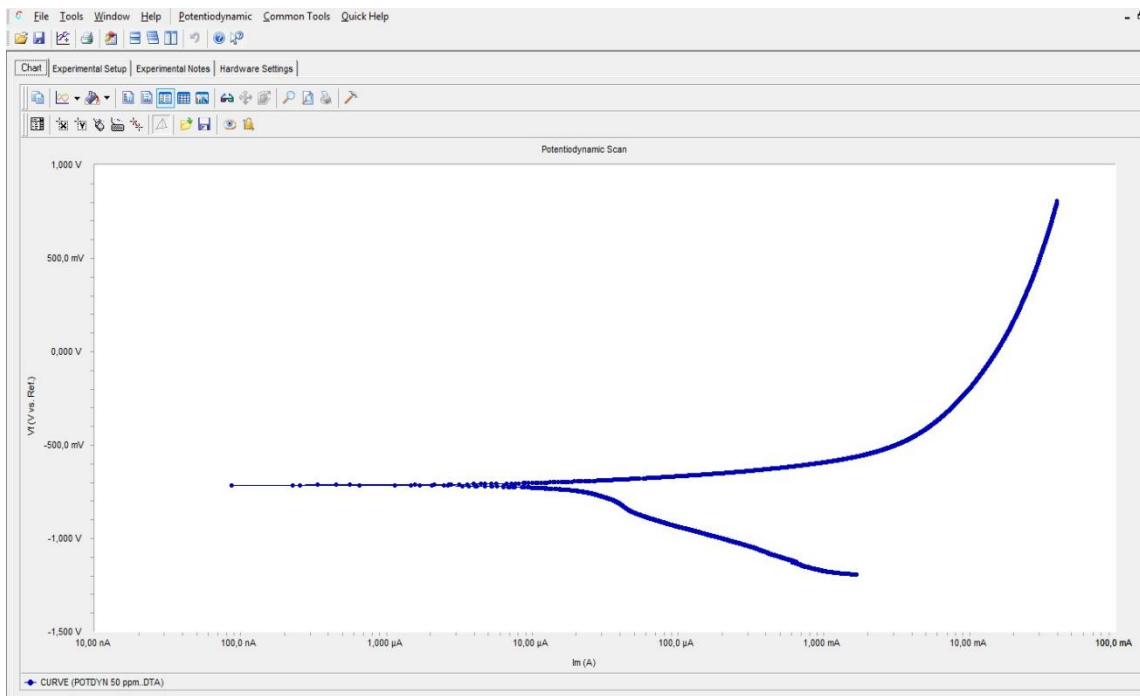


**Apéndice C. Curvas potenciodinámicas anódicas.**

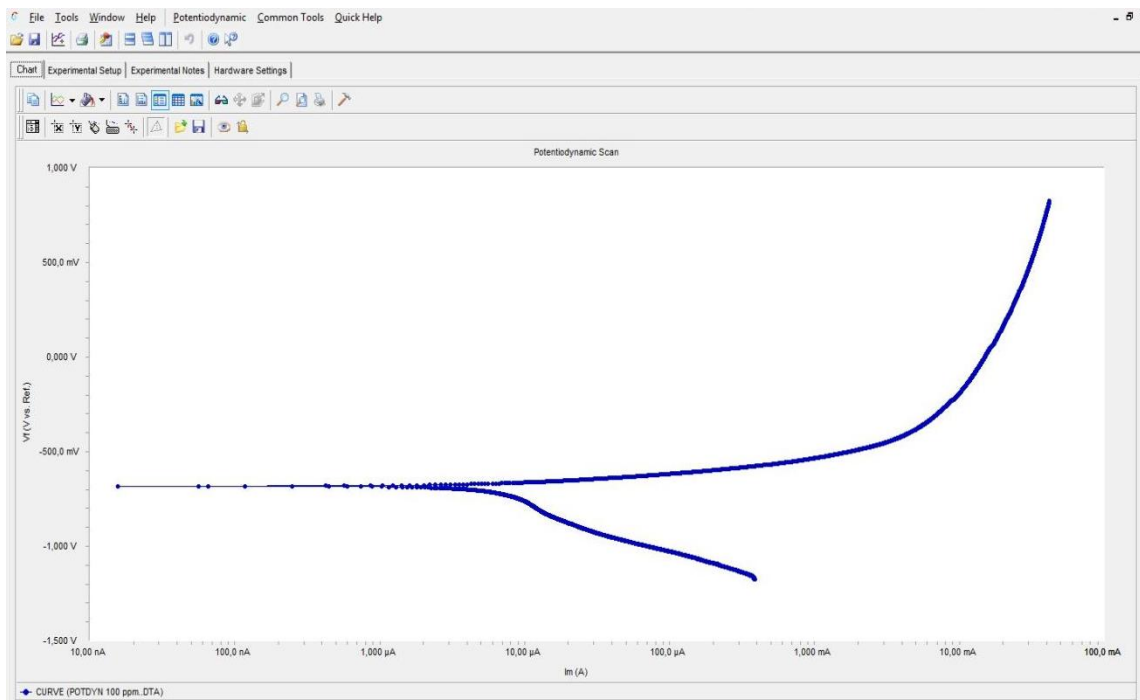
Blanco.



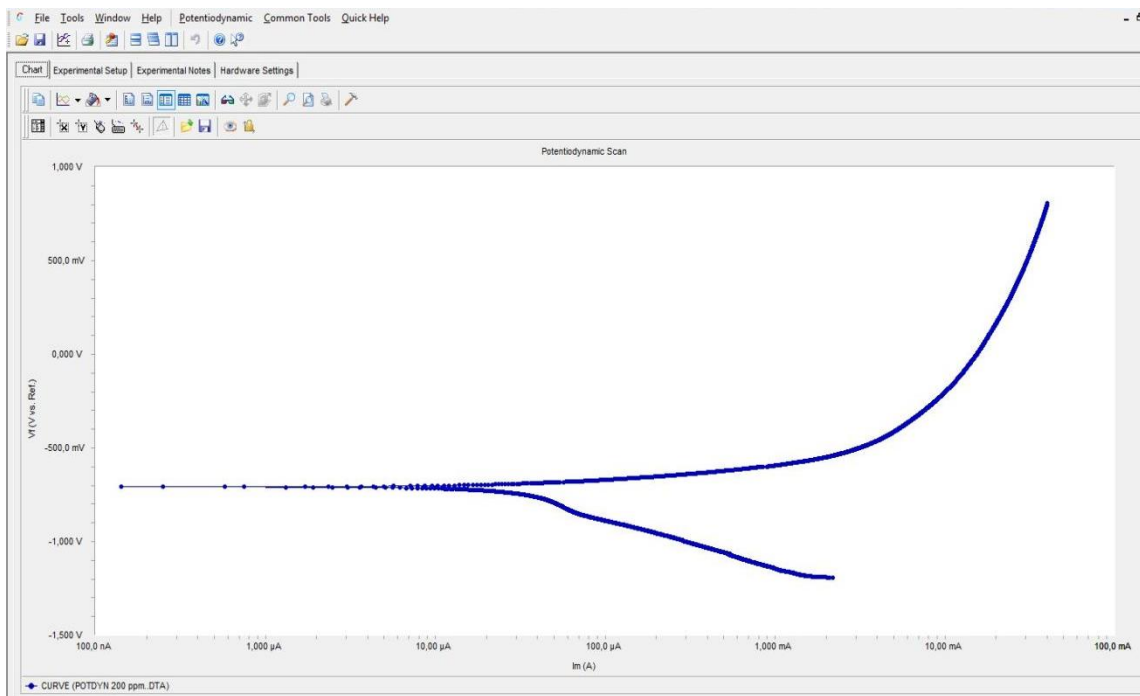
50 ppm



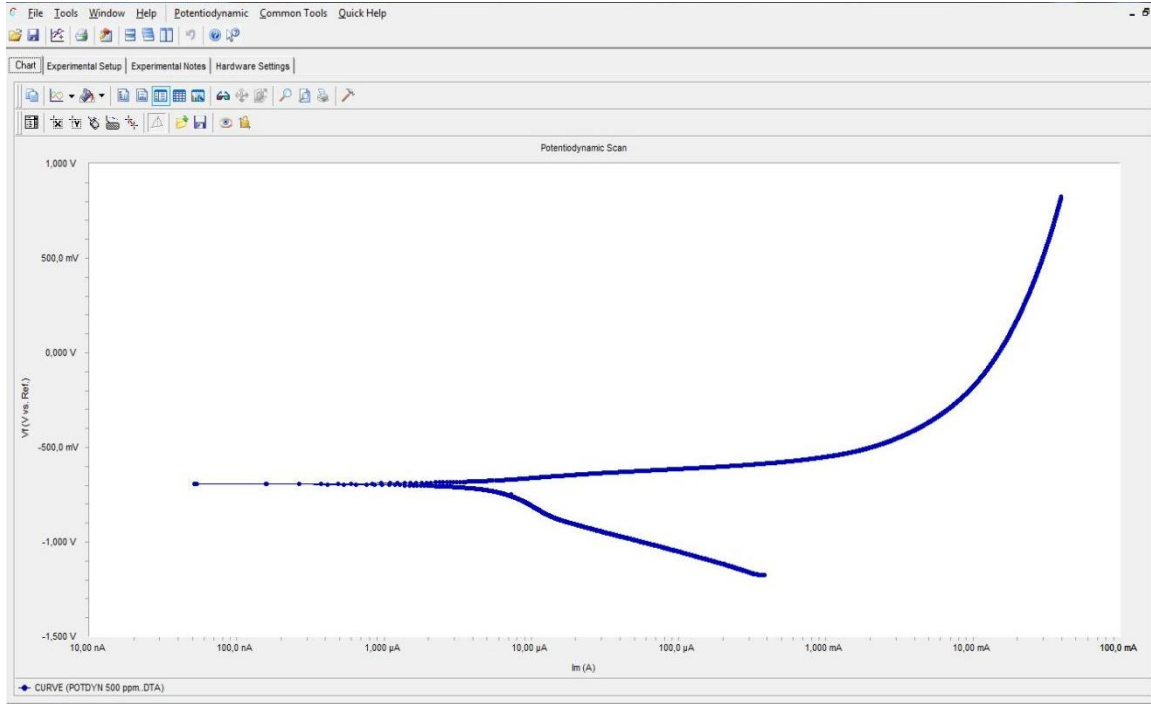
100 ppm



200 ppm

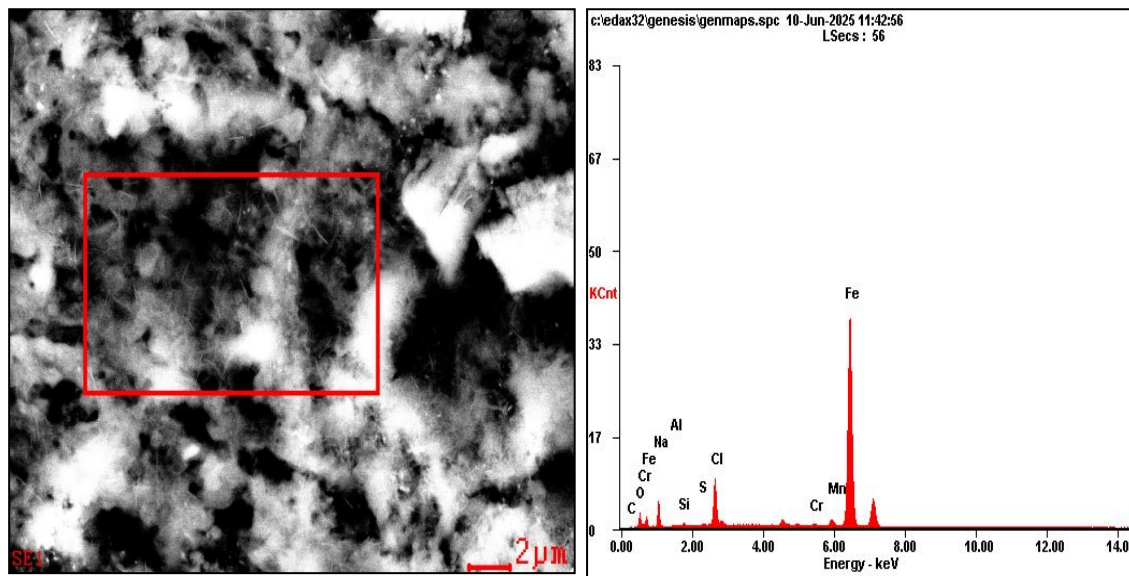


500 ppm

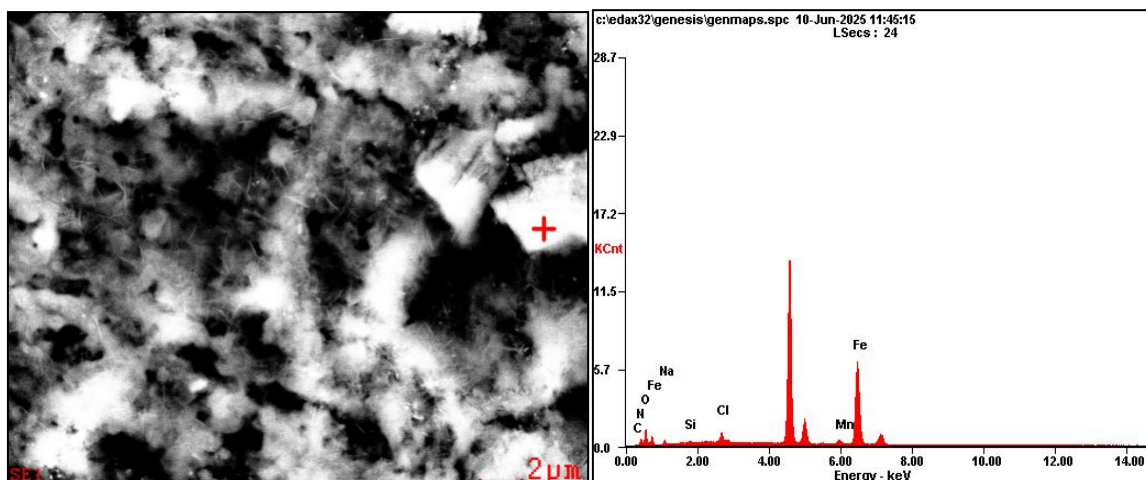


**Apéndice D. Reporte microanálisis SEM.**

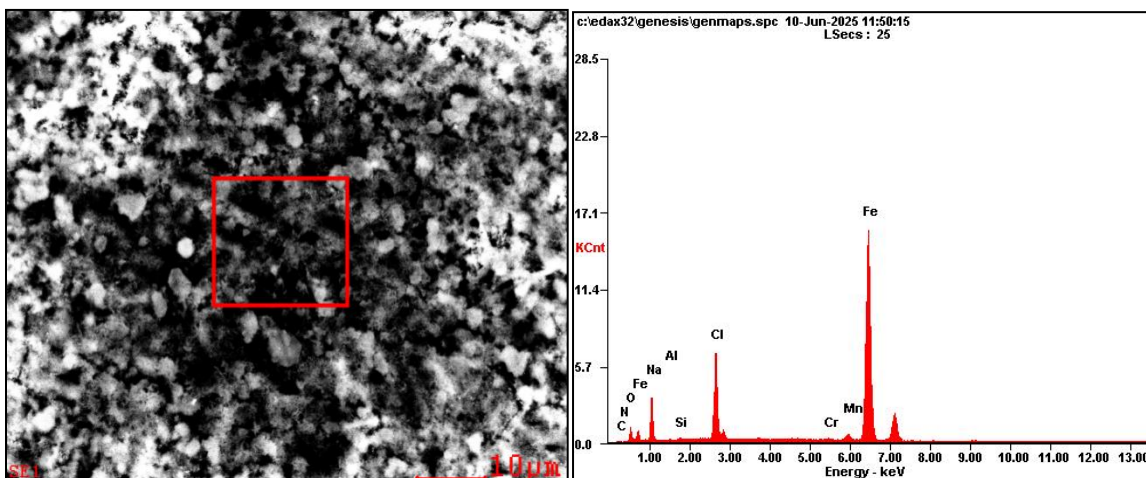
**Probeta 1.** Acero sometido al ambiente agresivo sin inhibidor diferente a la agregada en el texto.



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	00.58	01.94
<i>OK</i>	04.15	10.35
<i>NaK</i>	15.33	26.57
<i>AlK</i>	00.34	00.50
<i>SiK</i>	00.69	00.98
<i>SK</i>	00.18	00.22
<i>ClK</i>	07.86	08.84
<i>CrK</i>	00.29	00.23
<i>MnK</i>	01.80	01.31
<i>FeK</i>	68.77	49.07
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	02.52	05.94
<i>NK</i>	12.32	24.94
<i>OK</i>	16.26	28.81
<i>NaK</i>	05.40	06.66
<i>SiK</i>	00.89	00.90
<i>ClK</i>	03.22	02.58
<i>MnK</i>	02.37	01.22
<i>FeK</i>	57.01	28.94
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	00.80	02.43
<i>NK</i>	00.27	00.72
<i>OK</i>	04.59	10.54
<i>NaK</i>	19.78	31.59
<i>AlK</i>	00.59	00.80
<i>SiK</i>	00.67	00.87
<i>ClK</i>	12.74	13.20
<i>CrK</i>	00.21	00.15
<i>MnK</i>	01.46	00.98
<i>FeK</i>	58.89	38.72
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

**Probeta 2.** Acero sometido al ambiente agresivo con inhibidor diferente a la agregada en el texto.

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	00.79	03.13
<i>OK</i>	02.44	07.27
<i>NaK</i>	05.18	10.73
<i>ClK</i>	01.49	02.01
<i>MnK</i>	01.51	01.31
<i>FeK</i>	88.58	75.55
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

