

**Obtención de un extracto natural a partir de biomasa residual de caña panelera con  
potencial uso como inhibidor de corrosión en atmósferas de CO<sub>2</sub>**

**Nathalia Alejandra Diaz Correa y Emily Duran Olave**

**Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico**

**Modalidad de Investigación**

**Director**

**Dario Yesid Peña Ballesteros**

**PhD. En Corrosión**

**Codirector**

**Juan Carlos Orozco Agamez**

**MSc. En Ingeniería Química**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas**

**Escuela de Ingeniería Química**

**Bucaramanga**

**2024**

**Dedicatorias**

A mis amados padres, Yan Narit Olave Rueda y Edwin Duran Blandón, y a mi querida abuela Dora María Blandón, les dedico este logro con profunda gratitud. Su constante esfuerzo y dedicación han sido fundamentales en mi desarrollo profesional y personal. Les agradezco por una crianza llena de amor y por el apoyo incondicional que me han brindado para perseguir cada uno de mis sueños.

A mi familia, gracias por enseñarme el valor de la resiliencia, la humildad y el trabajo duro. Su ejemplo me ha motivado a perseguir mi proyecto de vida de la mano de Dios y de aquellos a quienes amo.

A mis fieles compañeros de cuatro patas, Molly, Milán, Kima, Milo y Mika, les agradezco por ser mis inseparables compañeros de vida. Su presencia ha sido un remanso de paz en los momentos más difíciles, recordándome la importancia del amor incondicional y la alegría en las pequeñas cosas.

**Emily Duran Olave.**

**Dedicatorias**

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso. A mi mamá, por su sacrificio y confianza inquebrantable en mí, enseñándome el verdadero significado del amor incondicional.

A mis niños, mis primeros amores, mis bebés *A y S*.

Finalmente, a mí misma, por no rendirme en los momentos más desafiantes. Nunca olvides la fuerza de tu determinación, la pasión que te impulsa y la persistencia que te ha llevado hasta aquí. Sigue persiguiendo tus sueños con la misma valentía y convicción.

**Nathalia Alejandra Diaz Correa**

### **Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme las oportunidades que me han traído hasta este punto. Por concederme el privilegio de ingresar a esta prestigiosa universidad, por el apoyo incondicional de mi familia, por darme fuerza en los momentos difíciles y por poner en mi camino a las personas adecuadas.

A mi director, codirector y profesores, les expreso mi gratitud por ser fuente inagotable de conocimientos y orientación en este arduo recorrido. Gracias por formarme y prepararme no solo para el mundo laboral, sino para la vida misma.

A mi compañera de tesis y amiga, Nathalia Alejandra Diaz, le agradezco su constancia y fortaleza. A pesar de los momentos difíciles, juntas logramos culminar esta etapa de nuestras vidas de la mejor manera posible.

A mi mamá y mi abuela, gracias por creer en mí y acompañarme en cada etapa de mi proceso académico. Les agradezco el privilegio de la educación y los valores que me han inculcado.

Finalmente, a mi familia y mis bebés, gracias por hacer más llevadero este proceso y por impulsarme a perseguir mi proyecto de vida.

**Emily Duran Olave.**

**Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Programa de Investigación para el Desarrollo de Productos con Valor Agregado a partir del Uso Eficiente de Biomasa Residual de Caña Panelera Proveniente del Departamento de Santander, cuyo apoyo ha sido fundamental para la realización de este proyecto.

De manera especial, agradezco a mis directores de proyecto, por su invaluable orientación, respaldo y conocimientos, que han sido esenciales para el éxito de este trabajo. Asimismo, extendiendo mi gratitud a todas las personas, profesores e instituciones que, de manera directa o indirecta, han contribuido a la culminación de este proyecto y a mi desarrollo académico y profesional.

Quisiera también expresar un agradecimiento a mi amiga Emily D, con quien he enfrentado y superado muchos retos durante esta etapa que culmina, a Joan H, quien me ha brindado su guía y amistad a lo largo de este proceso.

**Nathalia Alejandra Diaz Correa.**

**Tabla de contenido**

<b>Introducción</b> .....	13
<b>1. Objetivos</b> .....	15
<b>1.1 Objetivo General</b> .....	15
<b>1.2 Objetivo Específicos</b> .....	15
<b>2. Estado del Arte</b> .....	16
<b>3. Metodología</b> .....	19
<b>3.1 Obtención de curvas de secado y pretratamiento de la biomasa residual</b> .....	19
<b>3.2 Secado y molienda</b> .....	20
<b>3.3 Obtención del extracto</b> .....	21
<b>3.4 Determinación de las eficiencias en las operaciones de secado, molienda y extracción</b> .....	23
<b>3.5 Caracterización FTIR</b> .....	24
<b>3.6 Evaluación del potencial de corrosión</b> .....	24
<b>4. Análisis de Resultados</b> .....	27
<b>4.1 Resultados y análisis de eficiencias en las operaciones de secado, molienda y extracción</b> ...	27
<b>4.2 Caracterización FTIR de biomasa pretratada, secada y molida</b> .....	29
<b>4.3 Análisis FTIR de los extractos obtenidos</b> .....	32
<b>4.4 Análisis de potencial de corrosión de los extractos obtenidos</b> .....	38
<b>5. Conclusiones</b> .....	43
<b>6. Recomendaciones</b> .....	45
<b>Referencias bibliográficas</b> .....	46

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> <i>Eficiencias reportadas en la literatura de compuestos con propiedades anticorrosivas en diferentes condiciones en medios ácidos.</i> .....	17
<b>Tabla 2.</b> <i>Eficiencia de la Operación de Secado y Molienda.</i> .....	27
<b>Tabla 3.</b> <i>Cálculo de las eficiencias de extracción mediante el método Soxhlet en intervalos de tiempo.</i> .....	28
<b>Tabla 4.</b> <i>Cálculo de las eficiencias de extracción por medio del método de extracción líquido-líquido.</i> .....	29

### Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Metodología para la obtención del extracto. ....	19
<b>Figura 2.</b> Construcción de la curva de secado de la biomasa de caña panelera. ....	20
<b>Figura 3.</b> Muestra de la biomasa de caña panelera posterior al proceso de molienda.....	21
<b>Figura 4.</b> Extracción de las muestras por medio de un equipo Soxhlet. ....	22
<b>Figura 5.</b> Separación del solvente del extracto en un Rotavapor. ....	22
<b>Figura 6.</b> Extracción liquido – liquido.....	23
<b>Figura 7.</b> Montaje para la determinación del potencial de corrosión de los extractos.....	26
<b>Figura 8.</b> Caracterización FTIR a) muestra tratada con una solución de NaOH al 10 % (p/v), b) muestra tratada con agua destilada y c) muestra inicial sin tratamiento.....	30
<b>Figura 9.</b> Espectros FTIR comparativos a) muestra secada durante 24 horas y molida, pretratada con NaOH al 10% (p/v) y b) muestra secada durante 24 horas y molida, pretratada con agua destilada. 31	
<b>Figura 10.</b> Caracterización FTIR de los extractos obtenidos por Soxhlet de la biomasa tratada con agua destilada a) 48h, b) 24 h y c) 4h. ....	33
<b>Figura 11.</b> Caracterización FTIR de los extractos obtenidos por Soxhlet a) 48h, b) 24 h y c) 4h de la biomasa tratada con NaOH al 10 % p/v.....	35
<b>Figura 12.</b> Caracterización FTIR de los extractos obtenidos por extracción liquido - liquido de la biomasa tratada con agua destilada a) Extracto etanol y b) Extracto hexano.....	37
<b>Figura 13.</b> Caracterización FTIR de los extractos obtenidos por extracción liquido - liquido de la biomasa tratada con NaOH 10% p/v a) Extracto etanol y b) extracto hexano. ....	38
<b>Figura 14.</b> Potencial extracción Soxhlet destilada.....	39
<b>Figura 15.</b> Potencial extracción Soxhlet NaOH. ....	40
<b>Figura 16.</b> Potencial extracción liquido-liquido destilada.....	41
<b>Figura 17.</b> Potencial extracción liquido - liquido NAOH. ....	42

### Glosario

**Bagazo de caña panelera:** La caña de azúcar se compone principalmente de dos partes: un tallo rico en tejido del cual se extrae el azúcar, y una parte sólida conocida como fibra o pared celular. Esta última está constituida mayoritariamente por tres componentes estructurales: celulosa (40-50%), hemicelulosa (18-27%) y lignina (28-27%). La lignina representa entre el 10 y 30% de toda la pared celular (Jin, X, et al., 2017). Estudios han demostrado que estos compuestos poseen propiedades anticorrosivas significativas (Mahmud & Anannya, 2021).

**Economía circular:** Modelo económico que busca rediseñar los procesos productivos para maximizar el aprovechamiento de recursos y minimizar la generación de residuos, promoviendo la reutilización, reciclaje y valorización de materiales. (Geissdoerfer et al., 2017)

**Extracción Soxhlet:** Técnica de extracción sólido-líquido donde el solvente se calienta hasta ebullición, se condensa y pasa a través del material sólido repetidamente, extrayendo los compuestos solubles. Es eficiente para extraer compuestos de baja y media volatilidad (Putra et al., 2022).

**Extracción líquido-líquido:** Método de separación basado en la distribución de un soluto entre dos fases líquidas inmiscibles. Se utiliza para separar compuestos basándose en sus diferentes solubilidades en los dos líquidos, generalmente uno acuoso y otro orgánico (Putra et al., 2022).

**Inhibidores de corrosión:** Sustancias químicas que, al añadirse en pequeñas concentraciones a un medio corrosivo, disminuyen o previenen la reacción del metal con el medio. Pueden actuar formando una película protectora sobre la superficie metálica o alterando las características del medio corrosivo (de Souza Morais et al., 2023).

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

**Pretratamiento:** Conjunto de operaciones físicas, químicas o biológicas aplicadas a la biomasa para modificar su estructura y composición, facilitando la posterior extracción de compuestos de interés o mejorando su rendimiento en procesos de conversión (Tan et al., 2021).

## Resumen

**Título:** Obtención de un extracto natural a partir de biomasa residual de caña panelera con potencial uso como inhibidor de corrosión en atmósferas de CO<sub>2</sub>.\*

**Autor:** Nathalia Alejandra Diaz Correa, Emily Duran Olave.\*\*

**Palabras claves:** Corrosión, bagazo de caña panelera, inhibidor, extracto natural, FTIR, potencial de corrosión.

**Descripción:** El presente trabajo de investigación se centró en la obtención de extractos naturales a partir del bagazo de caña panelera con potencial uso como inhibidor de corrosión. El proyecto tiene como objetivo principal la obtención de este extracto como una alternativa ecológica a los inhibidores tradicionales y la realización de pruebas preliminares de eficacia, para mitigar el impacto ambiental asociado a estos últimos y aplicar los principios de economía circular dando valor agregado a un residuo. De esta manera, se construyeron las curvas de secado de la biomasa siguiendo la norma ASTM D 4442-20 para determinar el tiempo óptimo de secado (24 horas), de igual manera, a la biomasa se le realizaron dos tipos de pretratamiento con el fin de observar cómo estos contribuían en la presencia de determinados grupos funcionales con propiedades inhibidoras de corrosión. De acuerdo con los resultados del análisis FTIR la muestra tratada con NaOH al 10% p/v, demostró tener mayor presencia de grupos funcionales como fenoles y taninos que la muestra tratada con agua destilada. Por otro lado, al realizar la extracción se usaron dos métodos de extracción, Soxhlet y la extracción líquido-líquido, de los cuales, según los análisis de FTIR, el extracto obtenido por el método Soxhlet de la muestra pretratada con agua destilada y 4 horas de extracción, demostró tener potencial como inhibidor de corrosión, lo cual se pudo validar al realizar las mediciones del potencial de corrosión, en el medio utilizado como caso de estudio.

---

\* Trabajo de Grado.

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

## Abstract

**Title:** Obtaining a Natural Extract from Residual Panela Cane Biomass with Potential Use as a Corrosion Inhibitor in CO<sub>2</sub> Atmospheres. \*

**Authors:** Nathalia Alejandra Diaz Correa, Emily Duran Olave.\*\*

**Keywords:** Corrosion, sugarcane bagasse, inhibitor, natural extract, FTIR, corrosion potential.

**Description:** This research work focused on obtaining natural extracts from sugarcane bagasse with potential use as a corrosion inhibitor. The main objective of the project was to obtain this extract as an ecological alternative to traditional inhibitors and to conduct preliminary efficacy tests, to mitigate the environmental impact associated with the latter and apply the principles of circular economy by adding value to a waste product. To this end, biomass drying curves were constructed following ASTM D 4442-20 standard to determine the optimal drying time (24 hours). Similarly, two types of pretreatments were performed on the biomass to observe how these contributed to the presence of certain functional groups with corrosion-inhibiting properties. According to the results of FTIR analysis, the sample treated with 10% w/v NaOH showed a greater presence of functional groups such as phenols and tannins compared to the sample treated with distilled water. On the other hand, two extraction methods were used: Soxhlet and liquid-liquid extraction. According to FTIR analyses, the extract obtained by the Soxhlet method from the sample pretreated with distilled water and 4 hours of extraction demonstrated potential as a corrosion inhibitor, which could be validated by measuring the corrosion potential in the medium used as a case study.

---

\* Bachelor Thesis.

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

### **Introducción**

La corrosión es un problema importante en el transporte de CO<sub>2</sub>, debido al uso de materiales no protegidos en estos sistemas, lo que produce cambios en la estructura de los metales (Cruz et al., 2017) Esto implica que hay una limitante en los procesos de captura y transporte de CO<sub>2</sub>, aumentando los costos, impactos ambientales negativos y problemas de seguridad causados por el deterioro de las líneas (Koch, 2017). Por lo tanto, la protección en las tuberías utilizadas para el transporte de CO<sub>2</sub> es crucial para aumentar su vida útil, así como mejorar los indicadores de prevención de accidentes que a menudo conducen a la pérdida de vidas humanas (Verma et al., 2021). Los inhibidores de corrosión tradicionales compuestos principalmente por cromo, zinc y fósforo se han usado para tratar este problema, no obstante, presentan problemas a la salud e impactos ambientales (Bijapur et al., 2023). Lo anterior ha impulsado la búsqueda de alternativas más ecológicas y sostenibles (Cruz et al., 2017). La química verde o química sostenible se basa en un conjunto de principios que buscan diseñar productos y procesos químicos que reduzcan o eliminen el uso y generación de sustancias peligrosas, minimizando así el impacto negativo en el medio ambiente y la salud humana (Groysman, 2024). Algunos de los principios clave son el uso de materias primas renovables, evitar productos tóxicos, maximizar la eficiencia energética y promover la degradabilidad del producto (Yaro et al., 2019). Los inhibidores de corrosión naturales derivados de fuentes renovables, como el bagazo de caña panelera, se alinean perfectamente con estos principios al aprovechar los residuos de biomasa, evitar compuestos tóxicos presentes en los inhibidores convencionales, ser biodegradables y provenir de fuentes sostenibles (Meng et al., 2021). Además, su producción suele consumir menos energía que los inhibidores sintéticos. En este contexto, la valorización de residuos agroindustriales, como los residuos de biomasa de bagazo de caña de panelera, para obtener inhibidores de corrosión ecológicos ha surgido como una

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

opción prometedora (Mahmud and Anannya, 2021). El bagazo de caña tiene una composición típica que incluye celulosa (50%), hemicelulosa (35%) y lignina (15%), en donde estos componentes, especialmente la lignina y sus derivados fenólicos, le da al bagazo un potencial para ser utilizado como fuente de inhibidores de corrosión verdes (Yaro et al., 2019). El bagazo de caña es un subproducto abundante de la industria azucarera. Según datos de la FAO (2022), la producción mundial de caña panelera en 2021 fue de aproximadamente 1.9 billones de toneladas, generando alrededor de 354 millones de toneladas de bagazo como residuo. En el ámbito regional, se buscan desafíos vinculados a la mejora en el aprovechamiento del bagazo de caña, un área estratégica identificada por la Agenda Departamental de Competitividad e Innovación (ADCI) en Santander. Por lo tanto, el presente proyecto busca responder la siguiente pregunta de investigación:

*¿Los extractos naturales a partir de biomasa residual de caña panelera representan una alternativa potencial como inhibidor de corrosión verde teniendo en cuenta las variables como el pretratamiento de la biomasa, tipo de extracción y tiempo de extracción para mitigar problemas de corrosión en atmósferas de CO<sub>2</sub>?*

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

- Obtener un extracto natural a partir de biomasa residual de caña panelera que pueda representar una alternativa potencial como inhibidor de corrosión.

### 1.2 Objetivo Específicos

- Determinar las eficiencias de las operaciones unitarias de secado y molienda utilizadas en el pretratamiento de la biomasa residual teniendo en cuenta las variables de tiempo de secado y de humedad.
- Establecer las eficiencias de extracción de biomasa por los métodos de extracción Soxhlet y líquido-líquido teniendo en cuenta como variables el tipo de solvente y tiempo de extracción.
- Evaluar los extractos naturales obtenidos a partir de medición de potencial de corrosión para establecer su viabilidad como inhibidor de corrosión teniendo en cuenta las variables de método de extracción, técnica de pretratamiento de la biomasa, tiempo de extracción, concentración del inhibidor y tipo de solvente.

## 2. Estado del Arte

En los últimos años se han realizado estudios que se han centrado en el desarrollo y caracterización de inhibidores de corrosión obtenidos a partir de bagazo de caña. Estos estudios han abordado diversos aspectos, como métodos de extracción, uso diferentes técnicas de pretratamiento y evaluación de la viabilidad de los extractos como inhibidores de corrosión bajo diferentes condiciones (Bijapur et al., 2023). Se han explorado varios métodos de extracción para obtener compuestos bioactivos del bagazo de caña de azúcar con propiedades inhibitorias de la corrosión. Por ejemplo, en el estudio realizado por Huang et al., (2022), se evaluó la extracción asistida de la caña de azúcar por microondas, en donde el extracto obtenido fue evaluado para determinar su eficiencia de inhibición en una solución HCl 1 M a 80 °C, descubriendo que los extractos obtenidos combinados con iones halógenos, tensioactivos, nano-iones metálicos, hexametilentetramina, metionina y otras sinergias, mejoraron la estabilidad y el rendimiento de inhibición de la corrosión, exhibiendo una eficiencia de inhibición de la corrosión del 91,62 %. En otro trabajo de investigación, Meng et al., (2021) empleó la extracción Soxhlet utilizando etanol anhidro a 70 °C durante 12 horas, obteniendo un extracto en forma de partículas marrones con un rendimiento del 39,3%. Además, se han investigado métodos de purificación para aislar compuestos específicos del bagazo, como la extracción alcalina de bagazo con solución de hidróxido de sodio al 10 %p/v a 170°C durante 1 hora, seguido de precipitación con ácido clorhídrico a pH 2 para aislar la lignina, obteniendo un extracto con una eficiencia de inhibición de la corrosión del 96,2% (Meng et al., 2021).

Otros estudios han evaluado el rendimiento de inhibidores de corrosión derivados del bagazo de caña de azúcar bajo diferentes condiciones y medios corrosivos, empleando diversas técnicas experimentales. Por ejemplo, en el estudio realizado por Meng et al.,

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

(2021), se evaluó el potencial inhibidor de corrosión del extracto de bagazo de caña de azúcar (SPRE) en acero al carbono expuesto a una solución de HCl 1 M a 298 K. Se realizaron pruebas de polarización potenciodinámica con concentraciones de SPRE que variaron de 0 a 800 mg L<sup>-1</sup>. Los resultados mostraron que el SPRE actúa como un inhibidor de corrosión de tipo mixto con efecto anódico dominante. El potencial de circuito abierto se desplazó positivamente con la adición del inhibidor, mientras que las curvas de polarización exhibieron una disminución en la densidad de corriente de corrosión al aumentar la concentración de SPRE. La eficiencia de inhibición alcanzó un máximo de 95.2% con 800 mg L<sup>-1</sup> de SPRE. El mecanismo de inhibición propuesto sugiere que el SPRE se adsorbe preferentemente en los sitios anódicos de la superficie del acero, formando una capa barrera que reduce la disolución del metal sin alterar significativamente el proceso de evolución del hidrógeno.

La Tabla 1 informa otras investigaciones de inhibidores verdes probados en ambientes saturados de CO<sub>2</sub>, donde también mostraron eficiencias superiores al 80%.

**Tabla 1.**

*Eficiencias reportadas en la literatura de compuestos con propiedades anticorrosivas bajo diferentes condiciones en medios ácidos.*

Extracto	Medio Corrosivo y Temperatura	Método de Extracción y Disolvente (%)	Tipo de Acero	Eficiencia de Inhibición (%)
Hoja de Olivo	Saturado en CO <sub>2</sub> 3.0% NaCl + 0.01% HaHCO <sub>3</sub> + 0.01% CaCO <sub>3</sub> (65 °C)	Extracción Soxhlet con Etanol	N80	94.00
Hoja de Jatropha Curcas	Saturado en CO <sub>2</sub> 3.5% NaCl (pH 4.7) (25 °C)	Extracción Soxhlet con Etanol	API 5L - X65	82.00
Sida acuta	Saturado en CO <sub>2</sub> 3.5% NaCl (pH 4.5)	Extracción por Solventes con Metanol	API 5L - X65	90.00

*Nota.* Adaptado de Fazal, B. R., Becker, T., Kinsella, B., & Lepkova, K. (2022). A review of plant extracts as green corrosion inhibitors for CO<sub>2</sub> corrosion of carbon steel. *npj Materials Degradation*, 6(1), 5.

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

Aunque usar bagazo de caña de azúcar para obtener inhibidores de corrosión ecológicos representa un área de investigación en crecimiento, actualmente en el país no existen investigaciones sobre este tema. Este trabajo pretende determinar las eficiencias en los procesos de secado, molienda y extracción, que permitan además demostrar la viabilidad de inhibición de estos extractos iniciales de biomasa residual de caña panelera en aceros al carbono para ambientes de CO<sub>2</sub>. De esta manera, se espera contribuir a fortalecer la competitividad del sector, generando productos con valor agregado como lo son los extractos naturales lo que podría impulsar el desarrollo tecnológico de estos productos.

### 3. Metodología

Para este estudio se realizó la siguiente metodología, según se observa en la figura 1, donde se pueden ver las diferentes fases que nos llevaron a obtener el extracto y sus posteriores análisis.

**Figura 1**

*Metodología para la obtención del extracto.*



#### 3.1 Obtención de curvas de secado y pretratamiento de la biomasa residual

Se utilizó bagazo de caña de azúcar, refrigerado a 20 °C hasta el momento de la preparación del extracto. El bagazo tenía un tamaño de fibra promedio de 2 cm. Inicialmente, se pesó una muestra de 20 g refrigerada en una balanza analítica. Para hacer un pretratamiento de la muestra, una parte se trató con una solución de NaOH al 10 % p/v y la otra porción de igual peso se trató con agua destilada.

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

El lavado se realizó minimizando la cantidad de biomasa desperdiciada y eliminando el exceso de humedad con papel de filtro. Después con las muestras tratadas se procedió a obtener la curva de secado de la biomasa teniendo en cuenta la norma ASTM D 4442-20, con el objetivo de determinar el tiempo óptimo de secado para que la biomasa alcanzará una humedad del 10%, la cual es la humedad requerida para conservar la biomasa y también si se va a realizar una extracción de compuestos bioactivos (Villalba and Arzola, 2015), para lo cual las muestras fueron dispuestas en un crisol y puestas en la estufa a 103 °C, durante 4 h, 7 h y 24 h (figura 2).

### **Figura 2**

*Construcción de la curva de secado de la biomasa de caña panelera.*



### **3.2 Secado y molienda**

Posterior a esto, teniendo en cuenta el tiempo ideal de secado de la biomasa y basándonos en la norma ASTM E1756-08, se procedió a secar las muestras dispuestas en un crisol y puestas en la estufa a 103 °C.

Después del proceso de secado se realizó la molienda de las muestras en un molino de anillos obteniéndose un polvo (figura 3), y posterior a ello se pasaron por un tamiz de malla 40

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

para alcanzar un tamaño de partícula de 250  $\mu\text{m}$ , lo que permitió tener una mayor área de transferencia de masa al realizar la extracción.

### Figura 3

*Muestra de la biomasa de caña panelera posterior al proceso de molienda.*



### 3.3 Obtención del extracto

Una vez se obtuvo el polvo de las muestras secas de la biomasa de caña panelera, se procedió a realizar la etapa de extracción. Se decidió evaluar como se ve afectada la composición del extracto obtenido variando el método y el tiempo de extracción. El primer método se realizó mediante un equipo Soxhlet a una temperatura de 70  $^{\circ}\text{C}$ , en el cual se adicionaron 10 g de polvo de biomasa tratada con NaOH al 10 % p/v y tratada con agua destilada a 166 ml de etanol utilizado como solvente. El montaje se realizó como se puede observar en la figura 4. Asimismo, se realizaron los análisis de la extracción a 4, 24 y 48 horas con el fin de analizar en qué tiempo de extracción la cantidad de grupos funcionales con propiedades inhibidoras estaba presente en los extractos obtenidos.

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

**Figura 4**

*Extracción de las muestras por medio de un equipo Soxhlet.*



Una vez obtenidas las 3 soluciones de ambas muestras se procedió a realizar la evaporación del solvente por medio del rotavapor a la temperatura de ebullición del solvente de 70 °C (figura 5).

**Figura 5**

*Separación del solvente del extracto en un Rotavapor.*



Por último, se evaluó el segundo método de extracción, realizado mediante extracción líquido-líquido usando etanol y hexano como solventes. En primera instancia, se adicionaron 10 g de polvo de biomasa a 30 ml de etanol en un mortero (figura 6). Este procedimiento se realizó tanto para los polvos tratados con NaOH como para los tratados con agua destilada, con

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

el fin de determinar en qué extracto se obtiene compuestos con propiedades potencialmente inhibitoras y mejor eficiencia de extracción.

### Figura 6

*Extracción liquido – liquido.*



Después de esta extracción se obtuvieron dos soluciones, la primera fue asociada a los compuestos polares que presentaron afinidad con el etanol y la segunda los compuestos no polares con afinidad al hexano. Estas soluciones fueron pasados por el rotavapor para separar el extracto de los solventes.

### 3.4 Determinación de las eficiencias en las operaciones de secado, molienda y extracción

Para el cálculo de las eficiencias de la operación de molienda y secado se tuvo en cuenta la cantidad de biomasa inicial y final, cabe resaltar que la operación de secado influye directamente con la molienda, por ello, en esta investigación se evaluó en intervalos de tiempo de secado para observar que tanta biomasa quedaba retenida en los anillos del molino. Para la estimación de la eficiencia se utilizó la ecuación 1:

$$Eficiencia_{Molienda\ y\ Secado} = \frac{Biomasa_{Final}(g)}{Biomasa_{Inicial}(g)} * 100 \quad (Ec. 1)$$

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

Por otro lado, las eficiencias de las extracciones se calcularon tomando en cuenta la cantidad de extracto obtenido y la cantidad de biomasa inicial utilizada para la extracción.

Para la estimación de estas eficiencias se utilizó la ecuación 2:

$$Eficiencia_{Extracción} = \frac{Extracto_{final}(g)}{Biomasa_{inicial}(g)} * 100 \quad (Ec. 2)$$

### 3.5 Caracterización FTIR

En este estudio, se realizó un análisis de los grupos funcionales presentes en las muestras mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Esta técnica se utilizó para identificar químicamente los principales constituyentes de la biomasa en cada fase hasta la obtención de los extractos y compararlos con los resultados de pruebas encontradas en literatura. Este enfoque permitió la identificación de diversos grupos funcionales característicos, incluyendo grupos hidroxilo, enlaces alquílicos, estructuras aromáticas y enlaces específicos asociados con compuestos como polifenoles, flavonoides y estructuras glucosídicas. La comparación de los espectros obtenidos con los reportados en la literatura científica, como los estudios de Rahayu et al., 2018, proporcionó una base para la validación de los resultados.

### 3.6 Evaluación del potencial de corrosión.

Posterior a la obtención del extracto y de su caracterización, se evaluó el potencial de corrosión desde el punto de vista termodinámico de los 10 extractos teniendo en cuenta la norma ASTM G215-17 donde en una celda electroquímica con una solución de NaCl al 3% p/p en presencia de CO<sub>2</sub>, variando las concentraciones de los extractos y los extractos obtenidos. Para minimizar el ruido en los resultados, se utilizó una caja de Faraday en todas

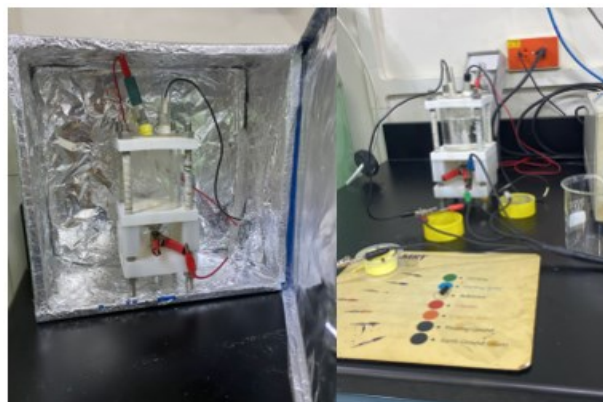
## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

las pruebas (figura 7). El potencial de corrosión se midió en un cupón de acero API N-80Q, sumergido en una solución que simulaba ambientes de transporte de CO<sub>2</sub>. La solución se saturó con CO<sub>2</sub> a una presión de 2 psi durante 30 minutos. Luego, la solución se colocó en una celda de 250 ml, donde se sumergió el cupón de acero N80 y se selló la celda con una tapa de resina que sostenía los electrodos de trabajo. Se ubicó el electrodo de trabajo que lo constituye el material de estudio en el fondo con un área de exposición de 1 cm<sup>2</sup>, contra el electrodo de platino y el electrodo de referencia plata-cloruro de plata (Ag/AgCl). Los cables de continuidad eléctrica se conectaron a un computador con el software GAMRY Framework. El tiempo de estabilización determinado para el potencial de corrosión fue de 30 minutos. Para evaluar la eficiencia de los 10 extractos obtenidos mediante los métodos de Extracción Soxhlet y Extracción líquido-líquido, se consideraron varias variables. En el caso de la Extracción Soxhlet, las variables incluyeron tres tiempos de extracción (4, 24 y 48 horas), tres concentraciones del inhibidor (100, 300 y 500 ppm) y los métodos de pretratamiento, resultando en un diseño experimental de 3 x 3 x 2. Para la Extracción líquido-líquido, se evaluaron las concentraciones del inhibidor (100, 300 y 500 ppm), los solventes utilizados (hexano y etanol), y los métodos de pretratamiento, generando un diseño experimental de 3 x 2 x 2. En total, se realizaron 31 pruebas, incluyendo un blanco como referencia, que fue necesario para establecer una línea base de comparación.

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

**Figura 7.**

*Montaje para la determinación del potencial de corrosión de los extractos.*



#### 4. Análisis de Resultados

##### 4.1 Resultados y análisis de eficiencias en las operaciones de secado, molienda y extracción

Los resultados de las operaciones de secado y molienda permitieron mostrar que el mejor tiempo de secado es el de 24 h, para la muestra lavada con agua destilada y la muestra con solución de NaOH, ya que, en la operación de molienda se evidencia menos incrustaciones en los anillos del molino causadas por la humedad, para lo cual se obtuvo una eficiencia del 98 % aproximadamente (tabla 2). Además, la ligera diferencia que se evidencia en la retención de las muestras donde la muestra lavada con la solución de NaOH tiende a ser mayor, se debe a que en la operación de secado la muestra perdió más humedad debido a que posiblemente hubo una modificación en la composición del bagazo, lo que podría facilitar la liberación de la humedad durante el proceso de secado en comparación a la muestra lavada con agua destilada en donde no ocurre ningún cambio químico.

**Tabla 2.**

*Eficiencia de la Operación de Secado y Molienda.*

Tiempo de Secado (h)	Masa Retenida de la Muestra Destilada (g)	Masa Retenida de la Muestra de NaOH (g)	Eficiencia de la Muestra Destilada (%)	Eficiencia de la Muestra NaOH (%)
4	0.99	1.21	74.9	84.1
7	0.64	0.71	90.6	93.7
24	0.27	0.23	98.0	98.6

En cuanto a los resultados en los procesos de extracción por el método Soxhlet (tabla 3), dejan ver que la eficiencia de extracción aumenta con el tiempo, sugiriendo que un tiempo de extracción más prolongado permite extraer una mayor cantidad de extracto.

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

La mayor eficiencia se alcanza a las 48 horas. Similarmente, para el tratamiento con agua destilada, la eficiencia de extracción también aumenta con el tiempo. Las eficiencias obtenidas para cada intervalo de tiempo de la biomasa pretratada con agua destilada son menores que las eficiencias obtenidas en la biomasa pretratada con NaOH, especialmente en los primeros dos intervalos de tiempo. Esto indica que el pretratamiento con NaOH facilita el proceso de extracción.

**Tabla 3.**

*Eficiencias de extracción mediante el método Soxhlet en intervalos de tiempo.*

<b>NaOH</b>	<b>Eficiencia (%)</b>	<b>Destilada</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
<b>4h</b>	22.7	<b>4h</b>	6.6
<b>24h</b>	24	<b>24h</b>	7
<b>48h</b>	42.5	<b>48h</b>	31

Por otro lado, en el método de extracción líquido-líquido, los resultados presentados en la tabla 4 revelan diferencias significativas en la eficiencia de extracción según el solvente utilizado. El hexano demostró una eficiencia de extracción superior que el etanol, evidenciado por la mayor cantidad de extracto obtenido. Esta disparidad en el rendimiento entre los dos solventes subraya la importancia de la elección del solvente en el proceso de extracción. Adicionalmente, se observó que las eficiencias de extracción disminuyen considerablemente cuando se utiliza agua destilada en el pretratamiento, en lugar de la solución de NaOH.

**Tabla 4.**

*Eficiencias de extracción por medio del método de extracción líquido-líquido.*

<b>Muestra de NaOH</b>	<b>Eficiencia (%)</b>	<b>Muestra de Destilada</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
<b>Hexano</b>	20.5	<b>Hexano</b>	6.5
<b>Etanol</b>	9.5	<b>Etanol</b>	5.6

#### 4.2 Caracterización FTIR de biomasa pretratada, secada y molida

En cuanto a la composición del bagazo, se realizó un análisis FTIR (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier), que se puede observar a continuación en la figura 8 y 9.

En la figura 8, se presentan los grupos funcionales identificados utilizando el equipo de FTIR de la muestra sin tratar (figura 8c.) en comparación con las muestras tratadas con agua destilada (figura 8b.) y con la solución de NaOH (figura a.). Se evidencia la absorción característica en la muestra sin tratar de hemicelulosa, celulosa y lignina. El estiramiento en la región de  $3500-3200\text{ cm}^{-1}$  indica la presencia de grupos hidroxilo alcohólicos de polisacáridos y -OH fenólicos de lignina. Mientras que las señales en  $2930-2850\text{ cm}^{-1}$  corresponden a vibraciones de enlaces alifáticos C-H, lo que implica una mayor presencia de celulosas y hemicelulosas, que son los principales componentes del bagazo. Por otro lado, se evidencia una banda intensa alrededor de  $1620\text{ cm}^{-1}$ , lo que sugiere la presencia de grupos carboxilo (-COO-) o enlaces C=C aromáticos como taninos, ácidos orgánicos y

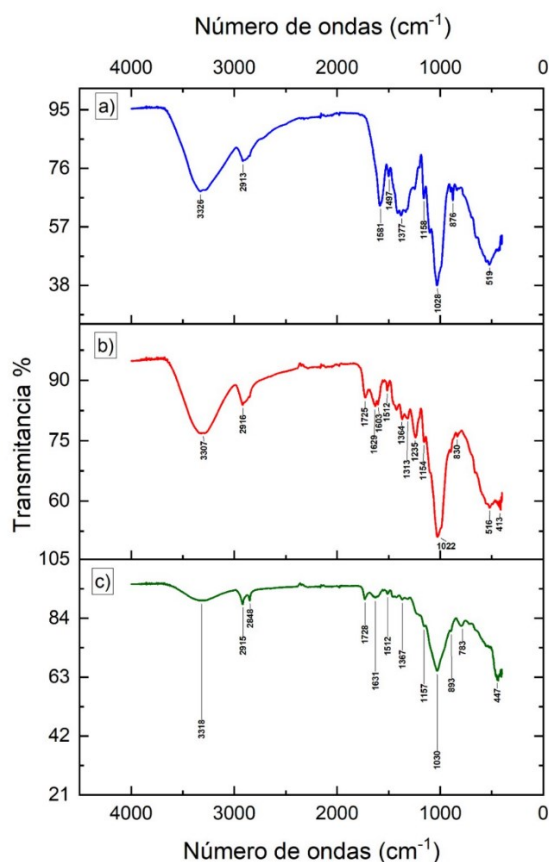
## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

fenoles. Finalmente, la transmitancia a  $1030\text{ cm}^{-1}$  muestra la existencia de enlaces C-O-C, característicos de polisacáridos como celulosa y hemicelulosa.

En cuanto a la biomasa tratada con agua destilada, se observa que el espectro se asemeja bastante a las bandas de la muestra sin tratar en comparación con la muestra tratada con la solución de NaOH. Sin embargo, hay una disminución general en la intensidad de las señales con este pretratamiento, lo que sugiere una menor presencia de grupos funcionales, a diferencia de la muestra tratada con NaOH, donde se observa que las señales en la banda de  $1620\text{ cm}^{-1}$  se intensificaron, indicando una mayor presencia de estructuras aromáticas a las que se les atribuyen características anticorrosivas.

**Figura 8.**

*Caracterización FTIR a) muestra tratada con una solución de NaOH al 10 % (p/v), b) muestra tratada con agua destilada y c) muestra inicial sin tratamiento.*



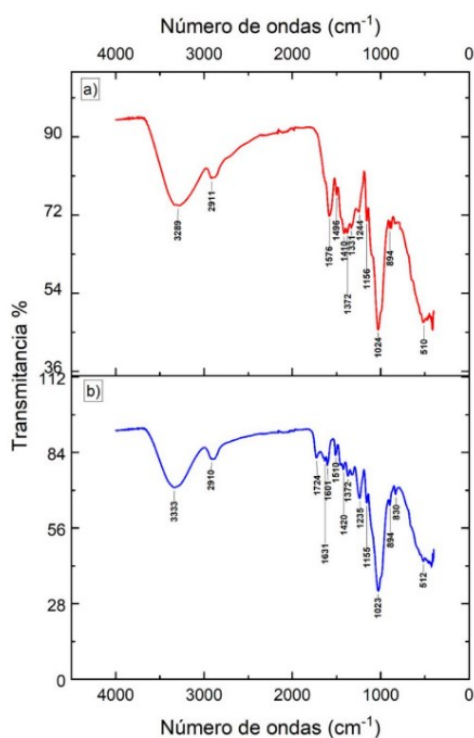
## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

En la Figura 9, se presenta la caracterización de los grupos funcionales de las dos muestras molidas, donde se observa que la muestra tratada con la solución de NaOH (figura 9a.), que posteriormente fue pulverizada, aumentó la intensidad en el rango de 3500 - 3200  $\text{cm}^{-1}$ , lo que implicó un aumento en la presencia de grupos hidroxilo. Además, en las señales de 2930 - 2850  $\text{cm}^{-1}$ , hay una mayor intensidad en los enlaces alifáticos C-H. Por otro lado, alrededor de 1620  $\text{cm}^{-1}$ , sugiere que hay una mayor concentración de grupos carboxilo (-COO-) o enlaces C=C aromáticos.

En cuanto a la muestra molida que fue tratada con agua destilada (figura 9b.), continúa manteniendo una intensidad menor en comparación con la muestra tratada con NaOH, lo que implica señales más débiles y concentraciones más bajas de grupos hidroxilo y polisacáridos. Por lo que comparando con el estudio realizado por Meng et al., 2021 se observa que el medio en que fue molida la muestra no afectó su composición.

**Figura 9.**

*Espectros FTIR comparativos a) muestra secada durante 24 horas y molida, pretratada con NaOH al 10% (p/v) y b) muestra secada durante 24 horas y molida, pretratada con agua destilada.*



### 4.3 Análisis FTIR de los extractos obtenidos

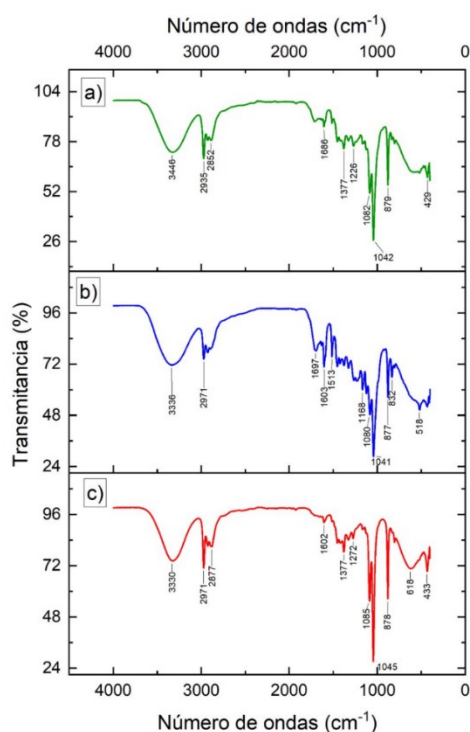
De acuerdo con la figura 10, en la caracterización FTIR obtenida de los extractos realizados por extracción Soxhlet para el tratamiento de agua destilada, la muestra de 4 horas la banda ancha alrededor de  $3330\text{ cm}^{-1}$  corresponde a las vibraciones de estiramiento O-H de grupos hidroxilo presentes en compuestos fenólicos, alcoholes o ácidos carboxílicos y posiblemente agua residual (Silverstein et al., 2005). La presencia de estos grupos es crucial, ya que los compuestos fenólicos y los ácidos carboxílicos son conocidos por su capacidad para actuar como inhibidores de corrosión a través de la formación de capas protectoras sobre las superficies metálicas. Las bandas en  $2971$  y  $2877\text{ cm}^{-1}$  se atribuyen a las vibraciones de estiramiento C-H de grupos alifáticos como grupos metilo y metileno (Zabaleta, A et al., 2014), su presencia indica posiblemente compuestos orgánicos, como ácidos grasos o ceras naturales presentes en la biomasa de la caña panelera que contribuyen a la formación de capas hidrofóbicas que son útiles en la protección contra la corrosión. El pico  $1602\text{ cm}^{-1}$  puede atribuirse a la vibración C=C de compuestos aromáticos o C=O de grupos carbonilo (Zabaleta, A et al., 2014), lo que sugiere la presencia de compuestos fenólicos y flavonoides conocidos por sus propiedades antioxidantes y anticorrosivas. Las bandas  $1377$  y  $1272\text{ cm}^{-1}$  sugieren la presencia de grupos C-H y O-H de compuestos fenólicos presentes en ligninas y celulosas. Las bandas en  $1045$  y  $878\text{ cm}^{-1}$  puede corresponder a vibraciones de estiramiento C-O y C-O-C en enlaces B-glucosídicos, de alcoholes, éteres, fenoles o carbohidratos que se asocian a la absorción típica de la celulosa. Por otro lado, en la muestra de 24 horas se observan bandas similares a las del extracto de 4 horas, pero con algunas diferencias en las intensidades relativas, lo que sugiere cambios en la composición de los compuestos extraídos sin embargo la técnica

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

utilizada ATR en extractos no tan líquidos no asegura que la intensidad de la banda signifique más presencia de ciertos grupos funcionales. Y en cuanto a la muestra de 48 horas, las bandas son similares a las de los extractos anteriores, pero con una menor intensidad con respecto a las de 4 horas y 24 horas. Esto podría indicar una degradación con respecto al tiempo de extracción de compuestos como ácidos carboxílicos, ésteres y compuestos aromáticos. Por lo tanto, según el análisis FTIR, el extracto obtenido después de 4 y 24 horas de extracción Soxhlet con agua destilada parecen ser los más prometedores en cuanto a la presencia de compuestos con propiedades anticorrosivas, debido a la mayor intensidad de las bandas características de 3000 a 3500  $\text{cm}^{-1}$  de estos compuestos que son potencialmente beneficiosos como inhibidores de corrosión debido a su capacidad de formar películas protectoras sobre superficies metálicas en comparación al extracto de 48 horas.

**Figura 10.**

*Caracterización FTIR de los extractos obtenidos por Soxhlet de la biomasa tratada con agua destilada a) 48h, b) 24 h y c) 4h.*



## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

De acuerdo con la figura 11, en la caracterización FTIR obtenida de los extractos realizados por extracción Soxhlet, la muestra de 4 horas en banda ancha e intensa alrededor de  $3291\text{ cm}^{-1}$  corresponde a vibraciones de estiramiento O-H, indicando la presencia de grupos hidroxilo (-OH) de compuestos fenólicos, alcoholes o ácidos carboxílicos. Las bandas en  $2966$  y  $2864\text{ cm}^{-1}$  se atribuyen a vibraciones de estiramiento C-H de grupos alifáticos. La banda en  $1575\text{ cm}^{-1}$  sugiere la presencia de grupos carbonilo (C=O) de ésteres o cetonas. Las bandas en  $1606$  y  $1508\text{ cm}^{-1}$  pueden asignarse a vibraciones de anillos aromáticos C=C. Las bandas en  $1425$ ,  $1366$  y  $1319\text{ cm}^{-1}$  indican la presencia de grupos C-H y O-H de compuestos fenólicos. La banda intensa en  $1048\text{ cm}^{-1}$  corresponde a vibraciones de estiramiento C-O de alcoholes, éteres o ácidos carboxílicos. En la muestra de 24 horas, se observan bandas similares a las del extracto de 4 h, pero con algunas diferencias en las intensidades relativas, lo que sugiere cambios en la composición y concentración de los compuestos extraídos. Y la muestra de 48 horas muestra que las bandas son similares a las de los extractos anteriores, pero con intensidades ligeramente menores en algunas regiones, lo que indica una menor concentración de ciertos compuestos en comparación con los tiempos de extracción más cortos.

En general, los espectros FTIR sugieren la presencia de compuestos fenólicos, alcoholes, ácidos carboxílicos, ésteres, cetonas y compuestos aromáticos en los extractos obtenidos con NaOH. Las bandas características de estos compuestos son más intensas en el extracto de 4 y 24 horas, lo que indica una mayor concentración de estos en comparación con los extractos de 48 horas.

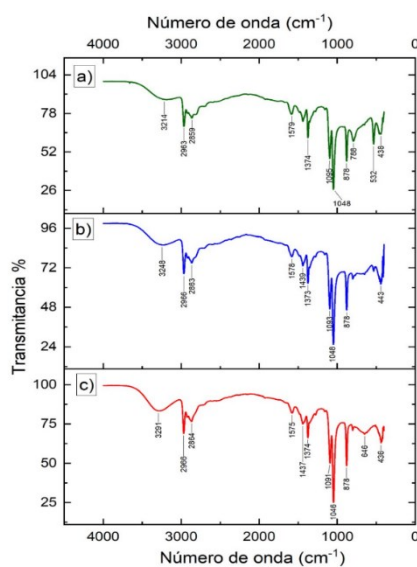
## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

En cuanto a los efectos del tratamiento alcalino se observa una disminución en cuanto a ciertas bandas como las que se encuentran en  $1000 - 1200 \text{ cm}^{-1}$  sugiriendo la degradación parcial de componentes polisacáridos/lignina lo que podría alterar las propiedades de formación de películas protectoras sobre las superficies metálicas.

En cuanto a las bandas  $3300-3500 \text{ cm}^{-1}$  encontradas en los espectros de los extractos con tratamiento de agua destilada, se observan cambios en la interacción por puentes hidrógenos y un aumento en la accesibilidad de grupos hidroxilo en comparación con los extractos de NaOH. Los espectros obtenidos por el análisis FTIR revelan que el tratamiento alcalino induce a modificaciones en la estructura química del extracto obtenido a partir del bagazo de caña de azúcar, estas alteraciones sugieren un incremento en la disponibilidad de grupos funcionales potencialmente beneficiosos para la inhibición de corrosión. No obstante, es importante recalcar que el método utilizado para la determinación de grupos funcionales en los extractos posiblemente no indique que entre mayor sea la intensidad de las bandas mayor presencia de grupos funcionales debido a la variación de la naturaleza de los extractos.

**Figura 11.**

*Caracterización FTIR de los extractos obtenidos por Soxhlet a) 48h, b) 24 h y c) 4h de la biomasa tratada con NaOH al 10 % p/v.*



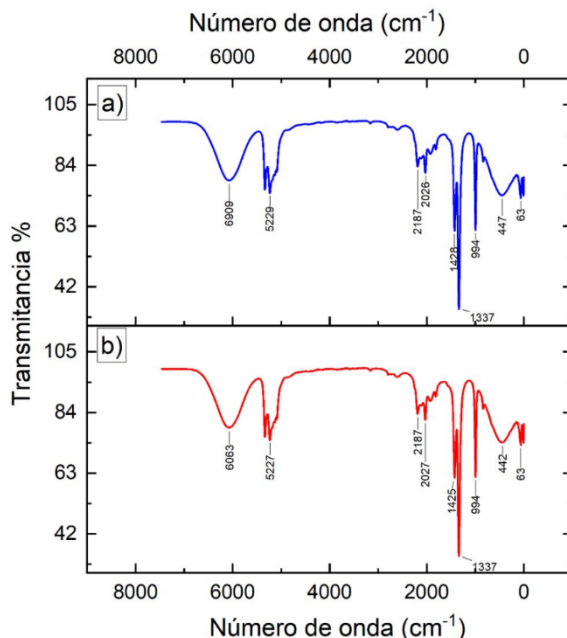
## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

De acuerdo con los espectros presentados en la figura 12, el extracto polar obtenido con etanol muestra una banda significativa en  $6909\text{ cm}^{-1}$  y otra en  $5229\text{ cm}^{-1}$ , posiblemente relacionadas con sobre tonos o combinaciones de vibraciones. Pero el análisis se concentra en las bandas de menor número de onda. La banda en  $2187\text{ cm}^{-1}$  y  $2026\text{ cm}^{-1}$  puede asociarse a estiramientos de enlaces  $\text{C}\equiv\text{N}$  (carbono-nitrógeno) o  $\text{C}=\text{O}$  (carbono-dióxido de carbono). La banda en  $1428\text{ cm}^{-1}$  sugiere la presencia de anillos aromáticos a través de vibraciones C-C y está relacionada con la vibración de flexión de los grupos C-H de metilo ( $-\text{CH}_3$ ) y metileno ( $-\text{CH}_2-$ ). La presencia de grupos nitro ( $\text{NO}_2$ ) o sulfonatos se refleja en la banda en  $1337\text{ cm}^{-1}$  (Universidad de Granada, n.d.), mientras que la banda en  $994\text{ cm}^{-1}$  indica vibraciones C-O, que podrían corresponder a alcoholes, éteres o ácidos carboxílicos.

En cuanto al extracto apolar obtenido con hexano, las bandas presentes son similares, pero se destacan diferencias en intensidad y en algunas posiciones específicas. Las bandas en  $2027\text{ cm}^{-1}$  y  $2187\text{ cm}^{-1}$  son indicativas de estiramientos C-H de compuestos alifáticos, típicos en sustancias extraídas con hexano debido a su naturaleza apolar. La banda en  $1425\text{ cm}^{-1}$  también sugiere la presencia de compuestos alifáticos. De manera similar al extracto con etanol, la banda en  $1337\text{ cm}^{-1}$  indica la presencia de grupos nitro o sulfonatos.

**Figura 12**

*Caracterización FTIR de los extractos obtenidos por extracción líquido - líquido de la biomasa tratada con agua destilada a) Extracto etanol y b) Extracto hexano.*



De acuerdo con la figura 13, en el caso del etanol, las principales bandas de absorción se encuentran en los siguientes intervalos 5226-5082  $\text{cm}^{-1}$ , lo que puede corresponder a combinaciones de vibraciones 2420-2120  $\text{cm}^{-1}$ , que generalmente se asocia con bandas combinadas o sobre tonos de grupos funcionales como el C-H al igual que en 1334  $\text{cm}^{-1}$ , vinculada a las deformaciones C-H. En 994  $\text{cm}^{-1}$ , que puede asociarse con vibraciones de estiramiento C-O atribuyéndose a alcoholes y las bandas en 613  $\text{cm}^{-1}$  y 510  $\text{cm}^{-1}$ , que podrían relacionarse con deformaciones fuera del plano o vibraciones de enlaces O-H o C-H.

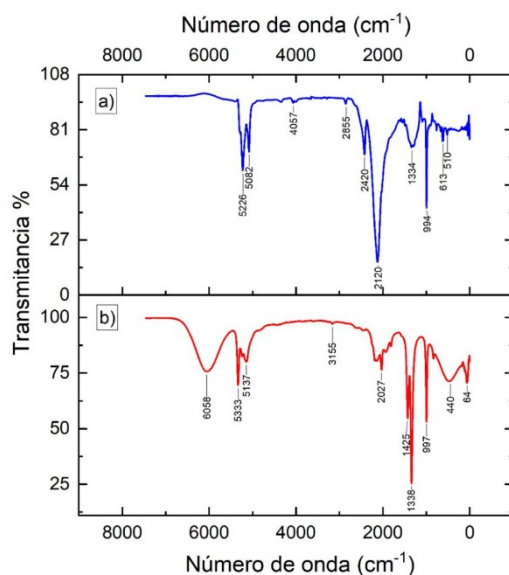
En el caso del hexano, se observan características similares en algunas bandas, pero las más notables están relacionadas con las vibraciones de los enlaces C-H propios de los hidrocarburos alifáticos. Las bandas presentes indican que tanto el etanol como el hexano

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

mantienen su estructura básica al estar en presencia de NaOH, sin que haya una alteración drástica en los grupos funcionales observables a través del espectro FTIR.

**Figura 13.**

*Caracterización FTIR de los extractos obtenidos por extracción líquido - líquido de la biomasa tratada con NaOH 10% p/v a) Extracto etanol y b) extracto hexano.*



### 4.4 Análisis de potencial de corrosión de los extractos obtenidos

En la figura 14, se observan las curvas de medición de potencial de corrosión, para los extractos de la biomasa tratada con agua destilada a diferentes tiempos de extracción y concentraciones de 500 ppm, 300 ppm y 100 ppm, debido a que estas concentraciones fueron objeto de estudio en otra investigación en extractos obtenidos a partir de biomasa residual de la caña panelera (Meing et al., 2021), después de 30 minutos de inmersión. El análisis muestra que en el caso de la concentración de 100 ppm del extracto de 4 horas muestra el comportamiento, desde el punto de vista termodinámico, más favorable para inhibir la corrosión en comparación con las demás extractos y concentraciones evaluadas. Esto sugiere que, a esta concentración, la cantidad de compuestos inhibidores presentes en

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

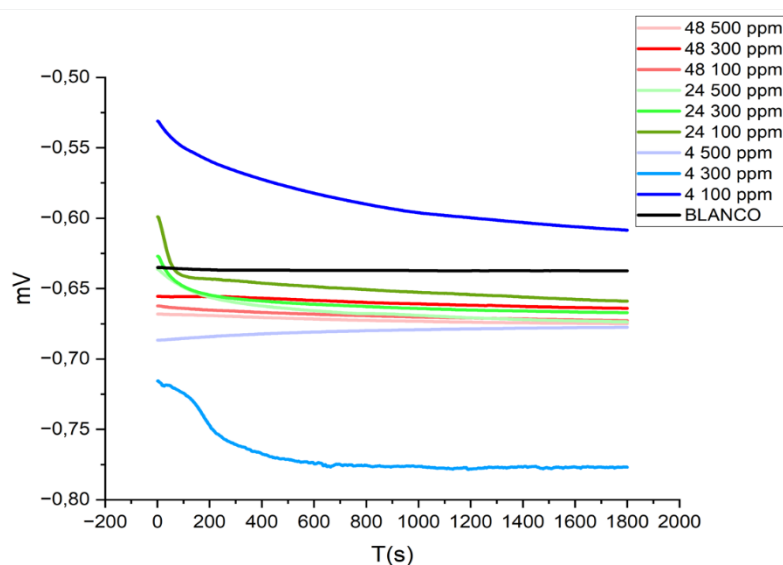
el extracto potencialmente puede ejercer una actividad de inhibición para proteger el metal contra la corrosión.

Por otro lado, el extracto de 4 horas a 300 ppm presenta un mayor deterioro, lo que probablemente se debe a la presencia de compuestos asociados a la celulosa, como alcoholes y éteres. Estos compuestos, al entrar en contacto con el agua, pueden formar ácidos que alteran el pH del entorno y favorecen la corrosión. La concentración de compuestos inhibidores, como ácidos grasos y flavonoides, en 300 ppm no es suficiente para contrarrestar el efecto corrosivo generado por los ácidos formados.

Para el extracto de 24 horas, se observa que ninguna de las concentraciones estudiadas (500 ppm, 300 ppm y 100 ppm) proporciona una posible inhibición significativa de la corrosión en comparación con el blanco. Los potenciales de corrosión obtenidos son muy similares para todas las concentraciones, indicando que el extracto de 24 horas no sería un efectivo inhibidor de corrosión en las concentraciones evaluadas.

**Figura 14**

*Potencial extracción Soxhlet destilada.*

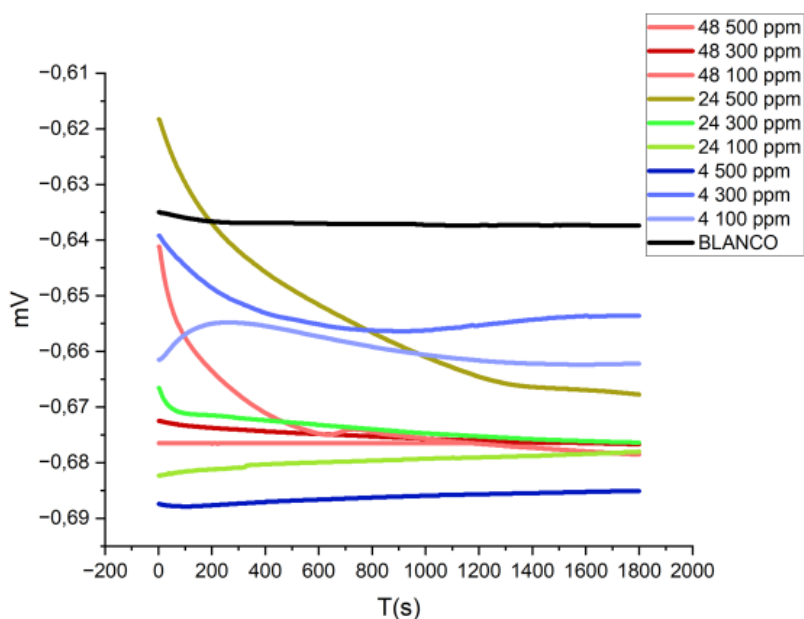


## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

En la figura 15 se observa que, para los extractos evaluados, los potenciales obtenidos indican que estos posiblemente favorecen la corrosión en las concentraciones utilizadas, debido a que sus potenciales son más negativos comparados con el potencial del blanco. En particular, el extracto de 4 horas mostró el peor desempeño, lo cual podría deberse al tratamiento alcalino aplicado a la biomasa. Este tratamiento pudo haber degradado compuestos de lignina, favoreciendo la formación de grupos hidroxilos y compuestos de grupos carbonilos asociados a la celulosa y hemicelulosa. Estos compuestos podrían estar actuando como agentes oxidantes. Por otro lado, se evidencia que la extracción realizada para ambos tipos de biomasa no fue la más adecuada, ya que el solvente utilizado no fue lo suficientemente fuerte para romper de manera efectiva los enlaces correspondientes a los grupos funcionales atribuidos a la lignina.

**Figura 15**

*Potencial extracción Soxhlet NaOH.*

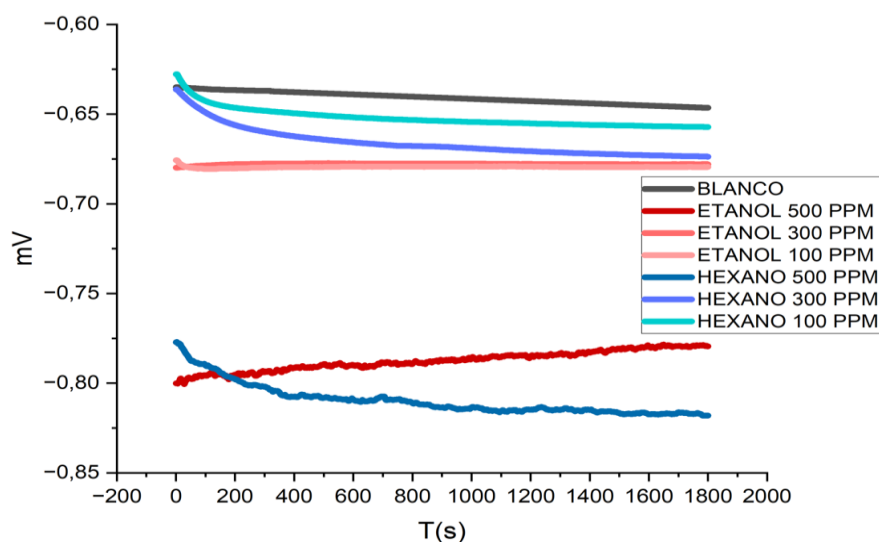


## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

El análisis del potencial de inhibición en el gráfico revela que ninguno de los extractos de etanol o hexano, a las concentraciones estudiadas, presenta un buen comportamiento como posible inhibidor de la corrosión en comparación con el blanco (línea negra). Los potenciales de las soluciones de etanol a 500 ppm y hexano a 500 ppm son significativamente más negativos, alrededor de  $-0.80$  mV, lo que sugiere que estas concentraciones no solo no inhiben la corrosión, sino que pueden estar acelerando el proceso. Las concentraciones de etanol y hexano a 300 ppm y 100 ppm presentan potenciales cercanos al del blanco, alrededor de  $-0.65$  mV, lo que indica que tampoco ofrecen una mejora significativa en la inhibición de la corrosión. Por lo tanto, ninguna de las concentraciones de los extractos en etanol o hexano con el pretratamiento de agua destilada muestra un buen desempeño como inhibidor, y en algunos casos, pueden incluso favorecer el comportamiento del acero API N-80 frente a la corrosión.

**Figura 16**

*Potencial extracción líquido-líquido destilada.*

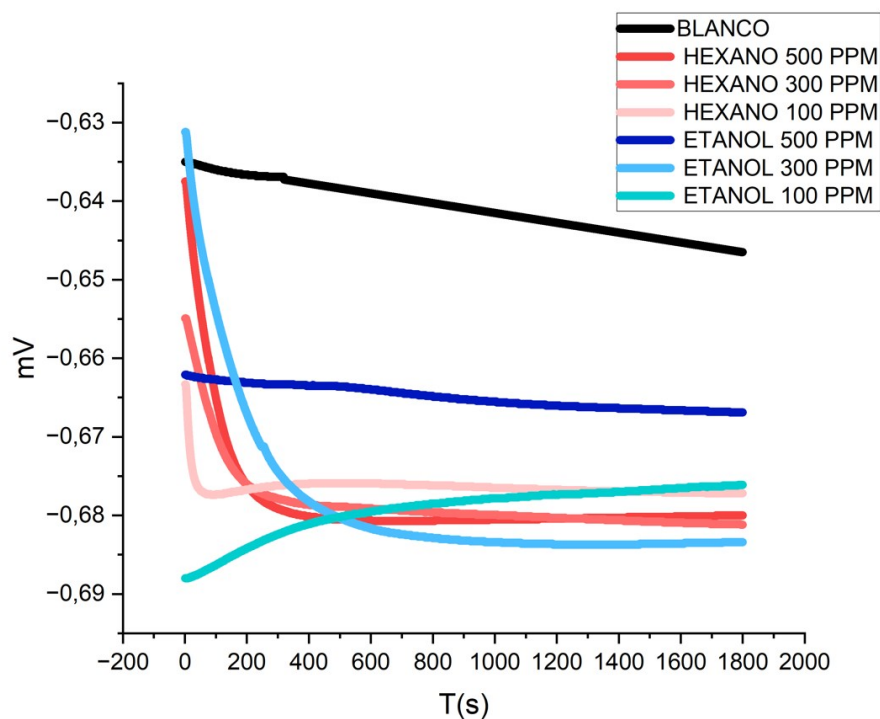


## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

El análisis del gráfico (figura 17) revela que ninguna de las concentraciones de extractos en etanol o hexano supera el comportamiento inhibitor del blanco. Todas las soluciones presentan potenciales más negativos que el blanco, lo que indica que no actuarían como inhibidores de la corrosión. En particular, las concentraciones de 500 ppm de etanol y hexano muestran los resultados menos prometedores, con potenciales que llegan a  $-0.68$  mV, significativamente más negativos que el blanco. Aunque algunas concentraciones, como hexano y etanol a 300 ppm, muestran una leve mejora tras un descenso inicial, siguen sin ofrecer un desempeño superior al del blanco.

**Figura 17**

*Potencial extracción líquido - líquido NaOH.*



## 5. Conclusiones

El pretratamiento con NaOH mejora significativamente el proceso de secado y molienda, facilitando la liberación de humedad y reduciendo las incrustaciones en el molino y tamiz. Este tratamiento alcalino permite una mayor eficiencia en la molienda en comparación con el tratamiento con agua destilada.

De igual manera, el pretratamiento con NaOH aumenta la cantidad de compuestos extraídos del bagazo, como lo evidencia la mayor eficiencia en los procesos de extracción por Soxhlet y líquido-líquido con hexano. Sin embargo, prolongar los tiempos de extracción puede degradar compuestos clave, lo que sugiere que tiempos de extracción más cortos y lavados con agua destilada podrían ser más adecuados para preservar la calidad de los extractos y mejorar su potencial como inhibidores de corrosión.

Los resultados mostraron mejoras significativas en la cantidad de extracto obtenido, lo cual representa un avance importante en el proceso de obtención de este tipo de extractos. Si bien las mediciones de potencial de corrosión mostraron resultados variables, se identificaron hallazgos prometedores, particularmente con el extracto de la muestra tratada con agua destilada a una concentración de 100 ppm durante 4 horas. Esta observación abre un camino potencial para futuras investigaciones. Aunque los extractos de etanol y hexano no mostraron el comportamiento termodinámico esperado en esta fase, estos resultados proporcionan una base valiosa para ajustar parámetros y explorar nuevas concentraciones que podrían mejorar su efectividad como inhibidores de corrosión. Este estudio sienta las bases para investigaciones más específicas que podrían conducir al desarrollo de inhibidores de corrosión más efectivos y ambientalmente sostenibles.

En el contexto de la economía circular, este proyecto representa un avance en la valorización de residuos agroindustriales al utilizar biomasa residual de caña panelera para la

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

producción de inhibidores de corrosión. Aunque los resultados no fueron tan prometedores como se esperaba, se concluye que estos extractos naturales muestran un potencial viable como inhibidores de corrosión verde en atmósferas de CO<sub>2</sub>, especialmente bajo condiciones específicas. Los hallazgos sugieren que, con un mayor refinamiento y optimización de variables como el pretratamiento, el método de extracción y la concentración del inhibidor, estos extractos podrían convertirse en una alternativa valiosa y sostenible para mitigar la corrosión en sistemas industriales, contribuyendo así a la sostenibilidad del sector agrícola y a la reducción del impacto ambiental.

## 6. Recomendaciones

Con base en los análisis realizados, se recomienda explorar la extracción selectiva de lignina utilizando solventes más polares que los empleados en esta investigación, como mezclas de etanol-acetona o acetato de etilo, ya que estos solventes tienen una mayor afinidad con compuestos aromáticos y polares, facilitando la liberación de lignina y otros compuestos con propiedades antioxidantes que podrían actuar como inhibidores de corrosión. Además, estas opciones de solventes son más sostenibles.

No se recomienda el uso de tratamientos ácidos, ya que podrían degradar compuestos activos sensibles como flavonoides, ésteres y ácidos carboxílicos, disminuyendo su efectividad inhibidora y generando residuos ácidos que podrían aumentar la velocidad de corrosión en lugar de disminuirla.

Por otro lado, se sugiere realizar un análisis bromatológico del extracto obtenido para verificar y cuantificar de manera más precisa los grupos funcionales presentes. Esto permitiría identificar y analizar detalladamente los compuestos que podrían estar actuando como inhibidores de corrosión, lo que facilitaría la optimización del proceso y el desarrollo de un bioinhibidor para una aplicación industrial.

**Referencias bibliográficas**

- Cruz Zabalegui, Alexis & Galicia, Gonzalo & Vázquez Vélez, Edna & Díaz, M. (2017). Evaluación de un Surfactante Gemini Derivado del Desecho de Aguacate Como Inhibidor de la Corrosión de un Acero API 5L-X52 Inmerso en NaCl 3.5 % wt. Saturado con CO<sub>2</sub>.
- Koch, G. (2017). Cost of corrosion. Trends in oil and gas corrosion research and technologies, 3-30.
- Groysman, A. (2024). Corrosion Risk for Process Safety in the Chemical Industry. *Afinidad*, 81(601), 10-24.
- Yaro, A. S., Ibrahim, M. A., & Khadom, A. A. (2019). Sugarcane wastes as a green additive to control corrosion of steel-reinforced concrete under different treatment conditions. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 5(4), 89.
- Mahmud, M. A., & Anannya, F. R. (2021). Sugarcane bagasse-A source of cellulosic fiber for diverse applications. *Heliyon*, 7(8).
- Bijapur, K., Molahalli, V., Shetty, A., Toghan, A., De Padova, P., & Hegde, G. (2023). Recent trends and progress in corrosion inhibitors and electrochemical evaluation. *Applied Sciences*, 13(18), 10107.
- Hartati, I., Kholisoh, I., Suwardiyono, S., Kurniasari, L., & Riwayati, I. (2016, November). Eco Friendly-Microwave Assisted Extraction of Cellulose from Sugarcane Bagasse. In *Proceeding of The International Seminar and Conference on Global Issues*.
- Huang, L., Chen, W. Q., Wang, S. S., Zhao, Q., Li, H. J., & Wu, Y. C. (2022). Starch, cellulose and plant extracts as green inhibitors of metal corrosion: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(5), 3235-3264.
- Meng, S., Liu, Z., Zhao, X., Fan, B., Liu, H., Guo, M., & Hao, H. (2021). Efficient corrosion inhibition by sugarcane purple rind extract for carbon steel in HCl solution: mechanism analyses by experimental and in silico insights. *RSC advances*, 11(50), 31693-31711.
- Rahayu, P. P., Sundari, C. D. D., & Farida, I. (2018, November). Corrosion inhibition using lignin of sugarcane bagasse. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 434, No. 1, p. 012087). IOP Publishing.

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

- Njoku, C. N., Ikeuba, A. I., Anorundu, C. C., Shammah, I. C., Yakubu, E., Elendu, B. N., ... & Uzor, P. C. (2023). A review of the extraction and application of eco-friendly biomass for corrosion protection of metals. *Results in Chemistry*, 101286.
- Zhao, X., van der Heide, E., Zhang, T., & Liu, D. (2010). Delignification of sugarcane bagasse with alkali and peracetic acid and characterization of the pulp. *BioResources*, 5(3).
- Jin, X., Chen, X., Shi, C., Li, M., Guan, Y., Yu, C. Y., ... & Peng, J. (2017). Determination of hemicellulose, cellulose and lignin content using visible and near infrared spectroscopy in *Miscanthus sinensis*. *Bioresource technology*, 241, 603-609.
- Muñoz, E. J., Prieto-García, F., Prieto-Méndez, J., Acevedo-Sandoval, O. A., & Rodríguez-Laguna, R. (2017). Obtención de pulpa de celulosa a partir de residuos de *Agave salmiana* B. Otto ex Salm. Optimización. *Dyna*, 84(200), 253-260.
- Sousa, F. D., Martínez-Ávila, G. C. G., Oliveira Monteiro-Moreira, A. C., Aguilar, C. N., & Azevedo Moreira, R. (2010). Perspectivas biotecnológicas de hemicelulosas vegetales. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, 2(4), 1-4.
- Fazal, B. R., Becker, T., Kinsella, B., & Lepkova, K. (2022). A review of plant extracts as green corrosion inhibitors for CO<sub>2</sub> corrosion of carbon steel. *npj Materials Degradation*, 6(1), 5.
- Maceda, A., Soto-Hernández, M., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., & Terrazas, T. (2021). Lignina: composición, síntesis y evolución. *Madera y bosques*, 27(2).
- Zabaleta, A. T. (2012). Lignin extraction, purification and depolymerization study (Doctoral dissertation, Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea).
- Silverstein, R. M., & Bassler, G. C. (1962). Spectrometric identification of organic compounds. *Journal of Chemical Education*, 39(11), 546.
- ASTM International, "ASTM G215-17(2024): Standard Guide for Corrosion Testing of Metals in High-Temperature Water", ASTM International, 2024.
- De Souza Morais, W. R., da Silva, J. S., Queiroz, N. M. P., de Paiva e Silva Zanta, C. L., Ribeiro, A. S., & Tonholo, J. (2023). Green corrosion inhibitors based on plant extracts for metals and alloys in corrosive environment: a technological and scientific prospection. *Applied Sciences*, 13(13), 7482.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm?. *Journal of cleaner production*, 143, 757-768.

## INHIBIDORES DE CORROSIÓN A PARTIR DE BIOMASA

- Tan, J., Li, Y., Tan, X., Wu, H., Li, H., & Yang, S. (2021). Advances in pretreatment of straw biomass for sugar production. *Frontiers in chemistry*, 9, 696030.
- Putra, L. S., Sukweenadhi, J., Nathania, C., Wibowo, E. S., Buschle-Diller, G., & Purwanto, M. G. M. (2022). Comparative study of polyphenolic compound extraction from empty palm fruit bunches and sugarcane pulp. *Heliyon*, 8(2).