

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Evaluación de Líquidos Iónicos derivados de imidazol

como inhibidores de corrosión del acero API X52 en

medio amargo

TESIS

Para obtener el título de:

**LICENCIADO EN INGENIERIA EN
MATERIALES**

PRESENTA:

Luis Gustavo Cuaya Coatl

ASESOR:

Dr. Octavio Olivares Xometl

Co-Asesora:

Dra. Paulina Arellanes Lozada

Puebla, Pue. Mayo 2024

Dedicatoria

El trabajo presentado ha requerido de mucha dedicación, tiempo, esfuerzo, compromiso y apoyo. Me gustaría dedicárselo a mi familia quienes me apoyaron en las situaciones complicadas durante la carrera, gracias a ellos, pude superarlas en tiempo y forma.

Así mismo, dedico este trabajo en memoria de mi abuela Marcelina Bernarda Coatl Huanetl, que lastimosamente no pudo estar presente hoy viéndome salir adelante en la vida profesional y personal.

Por último, quisiera dedicar este trabajo a los juegos y música que tuve como método de desestrés. A los personajes de interés como Lana Contracentella, Mizuki Yukikaze y Moeka Koizumi.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mi madre, María del Carmen Cuaya, por todos los esfuerzos que ha hecho para apoyarme en mi educación y mi formación profesional. También agradezco a mis padres por los principios y valores que me han inculcado para poder desarrollar a una buena persona.

A mi asesor de Tesis, Dr. Octavio Olivares por brindarme parte de sus conocimientos en esta área de investigación. Además, por ser un guía durante este proceso del desarrollo de la Tesis, particularmente por su apoyo y comprensión; y sobre todo por tener la paciencia. A mi co-asesora de Tesis, Dra. Paulina Arellanes, por brindarme los conocimientos necesarios para el desarrollo de la Tesis.

A los miembros del comité de revisión de tesis por el tiempo dedicado en las presentaciones, así como las sugerencias aportadas para enriquecer el trabajo desarrollado.

Índice

<i>Dedicatoria</i>	i
<i>Agradecimientos</i>	ii
<i>Índice</i>	iii
<i>Índice de figuras</i>	v
<i>Índice de tablas</i>	vi
<i>Resumen</i>	vii
<i>Introducción</i>	viii
<i>Hipótesis</i>	ix
<i>Objetivo General</i>	ix
<i>Objetivos particulares</i>	ix
<i>Capítulo 1. Antecedentes</i>	1
1.1 Corrosión	1
1.2 Definición.....	1
1.3 Proceso de corrosión	2
1.4 Tipos de corrosión	4
1.4.1 Corrosión general o uniforme	5
1.4.2 Corrosión localizada	5
1.4.3 Corrosión Galvánica.....	6
1.4.4 Corrosión por picadura.....	6
1.4.5 Corrosión Intergranular	7
1.5 Formación del medio corrosivo de ácido sulfhídrico	7
1.6 Líquidos iónicos	10
1.7 Imidazol	12
1.8 Imidazol como Inhibidor de Corrosión	14
<i>Capítulo 2. Desarrollo experimental</i>	17
2.1 Preparación de testigos de acero API X52	17
2.2 Preparación de medio corrosivo: Salmuera	17

2.3 Preparación de inhibidores de corrosión.....	18
2.4 Pruebas electroquímica.....	18
2.4.1 Polarización potenciodinámica a campo alto (PDP).....	19
2.4.2 Polarización potenciodinámica a campo bajo (Rp)	19
2.5 Análisis superficial.....	19
<i>Capítulo 3. Resultados y Discusión.....</i>	<i>20</i>
3.1 Polarización potenciodinámica a campo alto	20
3.2 Resistencia a la polarización	27
3.3. Estudio del proceso de adsorción con isothermas teóricas.....	30
3.4. Análisis superficial del acero API X52 en H ₂ S.....	33
<i>Conclusiones</i>	<i>36</i>
<i>Referencias.....</i>	<i>38</i>

Índice de figuras

Figura 1.	Diagrama de la disolución del metal en un medio corrosivo.	4
Figura 2.	Serie galvánica para algunos metales y aleaciones.	6
Figura 3.	Diferencia entre una solución iónica y un líquido iónico.	11
Figura 4.	Estructura y mapa electrostático del imidazol.	13
Figura 5.	Polarización potenciodinámica de acero API 5L X52 en H ₂ S con diferentes concentraciones de [DPIM ⁺] I ⁻	21
Figura 6.	Polarización potenciodinámica de acero API 5L X52 en H ₂ S con diferentes concentraciones de [DBrIM ⁺] Br ⁻	22
Figura 7.	Desplazamiento de potencial (ΔE_{corr}) de los IC.....	22
Figura 8.	Distribución del comportamiento de los LI's [DPIM ⁺] I ⁻ y [DBrPIM ⁺] Br.....	23
Figura 9.	Eficiencia de Inhibición (IE _{PDP}) para H ₂ S a diferentes concentraciones de: [DBIM ⁺] I ⁻ y [DBrIM ⁺] Br ⁻	27
Figura 10.	Comportamiento de R _p , así como su Eficiencia de Inhibición de los LIs.	28
Figura 11.	Comportamiento de R _p de los LIs: a) [DBIM ⁺] I ⁻ y b) [DBrIM ⁺] Br ⁻	29
Figura 12.	Esquema de orientación de la capa protectora del IC.	31
Figura 13.	Isotermas de Langmuir para H ₂ S con [DPIM ⁺] I ⁻ y [DBrIM ⁺] Br ⁻	32
Figura 14.	Superficie del acero API X52 en H ₂ S sin IC. (a) corrosión uniforme, 1000X y (b) corrosión en límite de grano, 2000X.....	34
Figura 15.	Superficie del acero API X52 en H ₂ S con IC a 150 ppm. (a) protección del acero, 1000X y (b) productos de corrosión, 2000X	35

Índice de tablas

Tabla 1.	Estructura química de líquidos iónicos evaluados como inhibidores de corrosión.	18
Tabla 2.	Parámetros electroquímicos obtenidos mediante curvas PDP de acero API 5L X52 en H ₂ S sin y con diferentes concentraciones de [DPIM ⁺] I ⁻	24
Tabla 3.	Parámetros electroquímicos obtenidos mediante curvas PDP de acero API 5L X52 en H ₂ S sin y con diferentes concentraciones de [DBrIM ⁺] Br ⁻	25
Tabla 4.	Modelos de isothermas de adsorción utilizados para ajustar los datos experimentales.....	30

Resumen

En el presente trabajo se evaluaron dos líquidos iónicos (LIs), yoduro de 1-propil-2,3-dimetilimidazolio ([DPIM⁺] I⁻) y bromuro de 1,3-dibromoimidazolio ([DBrIM⁺] Br⁻), como inhibidores de corrosión (IC) en medio amargo, ácido sulfhídrico (H₂S), para inhibir la corrosión de acero API 5L X52 a concentraciones de 25, 50, 75, 100, 125 y 150 ppm.

La eficiencia de inhibición (EI) fue obtenida por medio de técnicas electroquímicas de polarización de Tafel (PDP) y resistencia a la polarización (R_p). Adicionalmente, se realizó análisis superficial del testigo metálico con mayor eficiencia de inhibición de corrosión por microscopia electrónica de barrido (SEM).

El análisis de los resultados de las pruebas mostró que los líquidos inhibidores evaluados reducen la velocidad de corrosión (V_{corr}) del acero API X52, bloqueando las reacciones de reducción-oxidación presentes en la superficie del metal.

La adsorción de los LIs, [DPIM⁺] I⁻ y [DBrIM⁺] Br⁻, en la superficie metálica fue por un proceso de fisisorción y mixta (fisisorción y quimisorción), respectivamente. Estos comportamientos fueron confirmados con el análisis de la isoterma de Langmuir.

En general se observó que EI está en función del incremento del IC en el medio corrosivo. El compuesto [DPIM⁺] I⁻ resultó no ser un buen inhibidor debido a que su máxima EI fue de 65% a 125 ppm. El [DBrIM⁺] Br⁻ resultó ser buen IC presentando eficiencias desde 84% a la máxima eficiencia del 90% a 150 ppm.

Introducción

En la industria petrolera y química la corrosión presenta uno de los mayores retos, para lograr sustentar la creciente demanda de combustibles fósiles, debido al deterioro de materiales metálicos, que ocasionan fallas y fugas en líneas de tubería, daños en equipos e instalaciones, que van desde las más leves hasta catastróficas. Estos daños se observan en forma de óxidos durante todos los procesos, reduciendo la vida útil del material, generando pérdidas de miles de millones anuales.

Este problema ha provocado que, a lo largo de las últimas décadas, provoque el auge de un nuevo tipo de investigación, desarrollando e implementado diversos métodos para el control de la corrosión a nivel industrial, dando lugar a la aplicación de inhibidores de corrosión (ICs). Los cuales han obtenido gran aceptación; debido a que contribuyen de manera significativa a la conservación de las superficies metálicas. Siendo los ICs de mayor interés son los formadores de película, porque ralentizan las reacciones de oxidación/reducción que ocurren en el metal mediante un proceso de adsorción. Estos ICs influyen por diferentes factores, como son la naturaleza y carga superficial del metal, estructura electrónica, factores estéricos, aromaticidad, presencia de grupos funcionales con dobles y triples enlaces ($=NH$, $-N=N-$, $-CHO$, $R-OH$, $R=R$, $R-COOH$, $R-NH$, etc.) y heteroátomos de alta densidad electrónica (N, O, S y P) presentes en moléculas inhibidoras.

Sin embargo, muchos de los inhibidores no se han estudiado en las condiciones del ácido sulfhídrico, esto principalmente a su poca facilidad de manejo y falta de entendimiento en la comprensión del mecanismo de corrosión, que ocurren en la interfaz metálica. Por lo anterior, se ha puesto atención al estudio de los LIs en medio amargo, con el fin de obtener una mejor comprensión del sistema estudiado.

Hipótesis

Debido a la recuperación de crudos más pesados, la formación de medios corrosivos amargos (H_2S) es el principal promotor de mermar las propiedades del acero. Por ello, el uso de nuevos LIs derivados de imidazol son una buena alternativa viable para ser empleados como inhibidores de corrosión, debido a la configuración química del anión y el catión, los cuales poseen grupos funcionales y átomos que pueden formar enlaces de coordinación con la superficie del acero en estudio. Adicionalmente por el tipo de estructura química estos compuestos poseen excelentes propiedades como IC.

Objetivo General

Evaluar líquidos iónicos derivados de imidazol, que probados a nivel laboratorio bajo metodologías internacionales, permitan controlar los problemas de la corrosión en medio amargo (H_2S) que se presentan en sistemas de la industria del petróleo.

Objetivos particulares

1. Realizar pruebas de solubilidad de los líquidos iónicos con diferentes solventes.
2. Preparar los testigos corrosivos bajo la norma ASTM G1-03 (2017)
3. Evaluar el desempeño de inhibición de corrosión de los líquidos iónicos en medio de H_2S sobre acero API 5L X52; a partir de metodologías electroquímicas y de superficie.
4. Identificar una relación estructura-actividad y proponer un mecanismo de inhibición con base en la evidencia experimental de estudio electroquímicos y de superficie.

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Corrosión

La corrosión es un proceso natural que provoca la deterioración y degradación de los materiales, esto es en particular a los materiales metálicos puros, así como las aleaciones, esto es debido a la interacción de su entorno. El proceso de corrosión puede llegar a tener consecuencias significativas, siendo los más resaltantes los costos directos (mantenimiento, reparación/remplazo de equipo y estructura, pérdida de material, inactividad y pérdida de producción) e indirectos (impacto ambiental, seguridad, reputación, eficiencia). La corrosión es un problema que de acuerdo con la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión (NACE por sus siglas en ingles), se estima que la pérdida económica mundial por corrosión en 2013 fue aproximadamente de 2.5 billones de dólares estadounidenses siendo el 3.4% del PIB mundial. Por otra parte, el uso de los métodos de protección contra la corrosión puede representar un ahorro entre un 15% a un 35%, teniendo un valor de entre 375 000 y 875 000 millones de dólares anuales en todo el mundo. [1]

1.2 Definición

El concepto de corrosión es muy amplio, siendo que varios autores dan su propia definición debido a la restricción del material al considerar en el proceso. Mars G. Fontana define a la corrosión como “la destrucción o deterioro de un material debido a la reacción con su entorno” [2]. De acuerdo con la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) define a la corrosión como “la interacción fisicoquímica entre un material metálico y su entorno, que da lugar a cambios en las propiedades del metal, y que puede conducir a un deterioro significativo de la función del metal, del entorno o del sistema técnico del que forma

parte” [3]. Winston y Herbert la definen como “el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con su entorno”. En esta definición proponen que el deterioro por causas físicas no entra como el fenómeno de corrosión, sino que dependiendo lo ocurrido puede ser erosión, excoiación o desgaste, en dado caso que sea acompañado de un ataque químico pasa a ser corrosión por erosión, desgaste corrosivo o corrosión por contacto. La “oxidación” solo aplica a la corrosión del hierro o aleaciones a base de hierro con formación de productos de corrosión que consisten principalmente en óxidos férricos hidratados [4]. Así varios autores dan una definición que pueda adecuarse a las condiciones del sistema y del material, por lo que, el presente trabajo considerará a la corrosión como una afectación de superficie metálica por medio corrosivo químico.

1.3 Proceso de corrosión

La corrosión es un proceso electroquímico done un material metálico reacciona con un medio corrosivo. Este proceso implica una reacción electroquímica que puede estar influenciada por distintos factores, como la presencia agua, oxígeno, ácidos, bases u otros agentes corrosivos [4-6]. El proceso en términos generales sigue la siguiente secuencia:

1. Formación de la celda electroquímica: Al estar la superficie en contacto con un electrolito se generan zonas anódicas y catódicas (sitios activos), donde se da el flujo de electrones para la generación de corrosión.
2. Reacción anódica (oxidación): El área anódica localizada en la superficie del metal, pierde electrones provocando la formación de iones metálicos y un flujo de electrones. En una relación general esta zona puede expresarse de la siguiente manera:

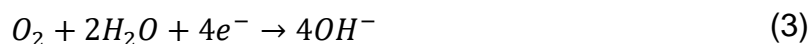


Donde n es el número de oxidación, $Metal^{n+}$ el ion metálico y ne^- los electrones perdidos. La siguiente reacción es un ejemplo de la formación de los iones de hierro:



3. Reacción catódica (reducción): En el sitio catódico los electrones liberados por la reacción anódica, reaccionan con los agentes oxidantes presentes en el medio corrosivo, caso frecuente con el oxígeno disuelto en el electrolito. La forma específica de la reacción va a depender de varios factores como el medio corrosivo, sustancias presentes en el medio o el tipo de electrolito.

En soluciones neutras o acidas a menudo se tiene oxígeno disuelto, provocando que la reacción catódica involucre la reducción del oxígeno. Las respectivas reacciones de reducción son las siguientes respectivamente [7, 8]:



En ausencia del oxígeno, las demás reacciones no se generarán en cambio el agua será el compuesto que se reducirá en:



4. Transporte de iones: al producir los iones metálicos en la reacción anódica estos se mueven a través del electrolito.

5. Formación de compuestos de corrosión: Los iones metálicos al estar suspendidos en el medio reaccionan con otros iones que están presentes, como el oxígeno u hidroxilos, para la formación de compuestos como óxidos, hidróxidos o sales [8].

La Figura 1 muestra el mecanismo del proceso de corrosión descrito anteriormente, en la superficie del metal, este se disuelve liberando electrones que migran a la superficie contigua, donde reaccionarían con los iones hidrógeno para formar hidrógeno molecular. Aun cuando el mecanismo es simple, el daño por corrosión presenta diferentes mecanismos en función del tipo de corrosión.

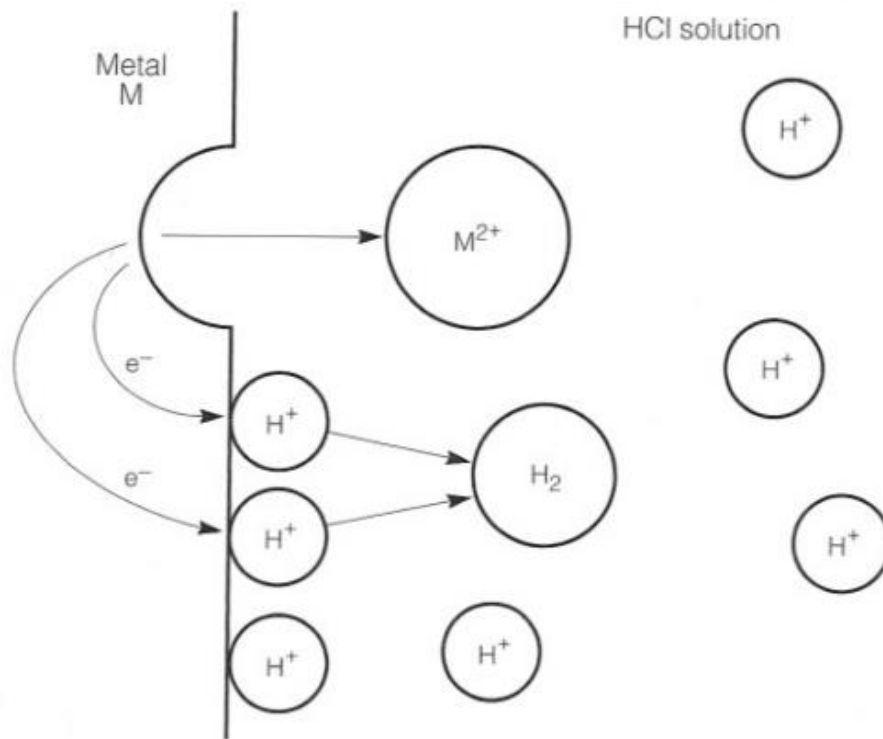


Figura 1. Diagrama de la disolución del metal en un medio corrosivo.

1.4 Tipos de corrosión

Los metales puros y las aleaciones son propensos al deterioro debido a la corrosión, la cual puede tomar diferentes formas. Clasificar los tipos de corrosión puede dar una mejor explicación de los procesos que la generan y sus características. Se han identificado varios tipos de corrosión y se han agrupados por sus características. Por ejemplo: la corrosión por celda de concentración, galvánica, por picaduras, por grietas, corrosión, por erosión, intergranular, microbiónica, etc [9].

Una clasificación que se puede realizar, es dividirla en dos modos, los intrínsecos y extrínsecos. Cada modo tiene sus características, los intrínsecos son la corrosión general o uniforme, picadura, intergranular, separación y agrietamiento por corrosión bajo tensión. Los extrínsecos son corrosión por grietas o depósitos, galvánica, erosión, por fricción y fatiga [10]. A continuación, se describir algunos de ellos. La corrosión puede presentarse en distintos medios, que a su vez puede estar asociado a otro tipo de corrosión. Su ambiente corrosivo puede ser el agua, aire, dióxido de carbono, líquidos orgánicos, sales fundidas o azufre gaseoso [11]. Las siguientes descripciones detallan algunos de estos tipos de corrosión [7, 9, 12-17]:

1.4.1 Corrosión general o uniforme

La corrosión general o uniforme se refiere a la corrosión donde afecta a toda la superficie expuesta del material en el medio corrosivo. Este tipo de corrosión ocurre de manera lineal en toda la superficie. Se caracteriza por ser una reacción química o electroquímica, que provoca que el material se vuelva más delgado en función del tiempo. Este tipo de corrosión no presenta una gran amenaza, debido a que se puede estimar la vida útil del equipo con respecto a la velocidad de corrosión.

1.4.2 Corrosión localizada

Este tipo de corrosión afecta ciertas áreas específicas del material, mientras otras zonas se mantienen intactas, esto puede deberse a causas, como la composición, estructura, forma del material y ambiente al que este expuesto. En este proceso se agrupan la corrosión galvánica, picadura, cavitación y microbiológica.

1.4.3 Corrosión Galvánica

La corrosión galvánica ocurre cuando dos metales interactúan teniendo una diferencia de potencial; que provoca un flujo de electrones en un electrolito de por medio. En este tipo de corrosión el metal más activo (potencial electroquímico más negativo) se corroe más rápido pasando a ser el ánodo, mientras que el menos activo actúa como el cátodo (potencial electroquímico más positivo). La Figura 2 muestra un listado de algunos metales y aleaciones como referencia a que tipo de metal será el más corroído en una situación, por ejemplo, el zinc es más activo que el acero por lo que una combinación de zinc y acero en un ambiente corrosivo, el material hecho a base de zinc se corroerá.



Figura 2. Serie galvánica para algunos metales y aleaciones.

1.4.4 Corrosión por picadura

Resulta de la formación de pequeñas cavidades o picaduras en la superficie del metal, se puede diferenciar de la general ya que estas picaduras se concentran en áreas pequeñas y son difíciles de detectar [15].

1.4.5 Corrosión Intergranular

Este tipo de corrosión es provocada por las impurezas en los materiales metálicos o aleaciones, ya sea por elementos pasivantes o alguna segregación, que pueden estar afectando los límites de grano. Es conocido que los metales y aleaciones están estructurados por granos, al ser de distintas formas y tamaños hacen contacto con otros granos, estas interfaces son conocidas como límites de grano. La corrosión se presentará en el ánodo localizado en el límite de grano y formando diferentes óxidos de acuerdo con la aleación y al medio corrosivo.

1.5 Formación del medio corrosivo de ácido sulfhídrico

El ácido sulfhídrico (H_2S) es un gas incoloro mucho más pesado que el aire con una densidad 1.39 y 1.19, respectivamente, además tiene un peso molecular de 34.08 g/mol. Puede ser oxidado por una variedad de agentes para formar dióxido de azufre (SO_2), sulfatos como el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y azufre elemental (estos productos presentan implicaciones toxicológicas). En una solución acuosa se disociará el ácido sulfhídrico produciendo un anión hidrosulfuro y un ion sulfuro [18]:



A menudo las instalaciones y equipo utilizados en la industria como la petrolera, tienen el problema de la corrosión causado por varios factores, que dependen de las condiciones de extracción del petróleo crudo. Entre estos factores están la concentración de sales, pH, temperatura, productos químicos inyectados, entre muchos otros.

En la mayoría de los yacimientos petrolíferos del mundo se encuentra una cantidad considerada de agua, así como salmuera, ácido sulfhídrico, ácido sulfúrico, dióxido de carbono, entre otros compuestos. La desalinización del petróleo ha sido una alternativa debido a la relación que presenta entre el precio del petróleo crudo exportado y su calidad. Se tiene en cuenta que al aumentar una parte por mil de agua y salmuera reduce el costo del barril de petróleo crudo alrededor de 0.85 a 1.3 dólares por barril [19].

Este ácido puede generarse por medios químicos o microbiológicos. La formación microbiológica es por la acción microbiana de las bacterias sulfato reductoras (SRB). Es este proceso SRB reducen los iones sulfato existentes a ácido sulfhídrico gaseoso (H_2S). Estas bacterias pueden estar presentes en agua de producción que suele inyectar para la recuperación del petróleo en pozos petrolíferos. [20, 21]

En la industria petrolera, los crudos desde sus yacimientos contienen una amplia variedad de contaminantes, dentro de los cuales, se encuentra el azufre que, al combinarse con moléculas de hidrógeno, aunado a las condiciones de presión-temperatura favorece la formación del ácido sulfhídrico. Por lo tanto, el H_2S está presente en forma natural en los productos derivados del petróleo, también se forma durante el proceso de refinamiento, a través de la degradación de los compuestos de azufre a altas temperaturas. Sin embargo, su mayor concentración se localiza en el petróleo crudo pesado, originando daños por corrosión desde una etapa temprana y durante su refinación. Siendo el acero al carbono el material más susceptible a sufrir daños por la presencia de H_2S [22, 23]. Por ello, se dice que el contenido de azufre en el petróleo y sus derivados tienen un papel fundamental en la corrosión interna del acero. Adicionalmente, el petróleo crudo al extraerlo también contiene sólidos en suspensión como arena, arcilla, partículas de óxido de hierro, sales y diferentes compuestos orgánicos, que en conjunto también pueden provocar otros tipos de corrosión, así como dañar a los catalizadores [19].

El comportamiento de la corrosión en general es el mismo, dependiendo la composición del metal, este proceso puede ser más lento o más rápido, por ello se utilizan distintas aleaciones que puedan ralentizar este proceso.

La corrosión agria y dulce, CO_2 y H_2S respectivamente, son los principales problemas que se tienen dentro de un sistema. En el caso de la corrosión agria sobre el acero ha tenido interés, debido a su mecanismo de absorción de los sulfuros, ya que no se comprende completamente. Por esa razón, no se ha podido demostrar con certeza, si el sulfuro de hierro formado en la superficie expuesta al medio corrosivo puede tener un efecto protector o no. [23, 24]

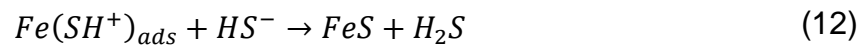
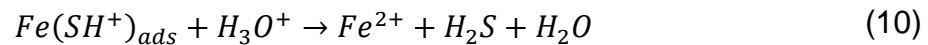
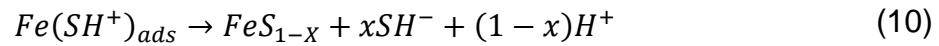
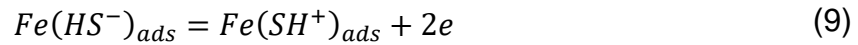
Hernández et al, demostraron que el acero API X52 al estar inmerso en una solución NACE 1D182 por determinado tiempo, provoca la formación de sulfuros de hierro (mackinawita, troilita, marcasita y pirita) además se formaron óxidos de hierro que le proporciono protección a la superficie [22].

Un estudio realizado por Pengpeng et al, dio como resultado que el ácido sulfhídrico al formar los productos corrosivos como película protectora, aumentaba su resistencia a la corrosión con el paso del tiempo [25].

Con lo mencionado se pensará que los óxidos de hierro formados pueden ayudar a mitigar o disminuir la velocidad de corrosión, pero Schulte y Schütze observaron que en las pruebas realizadas en los aceros 1Cr-0.4Mo, 12Cr-1Mo-0.25V y 18Cr-10Ni-Ti en un ambiente ácido de H_2S , la capa de óxido de hierro formada fue remplazada por una capa no protectora de sulfuro de hierro, lo que provocó corrosión por picadura en altas temperaturas, así mismo esa capa al ser excedido el límite de tensión se empezaron a formar microfisuras dentro de la capa, lo que permitiría la penetración de especies de sulfuro dando un aumento de la velocidad de corrosión [26].

Por otra parte, Okonkwo et al, realizaron pruebas en acero API X80 en una solución de NaCl al 3.5% burbujeada con H_2S en un rango de temperatura de 20°C a 60°C , presentando picaduras y grietas inducidas por hidrógeno a temperaturas bajas y altas, respectivamente. En todas las pruebas se presentó la formación de capas de sulfuro de hierro provocando un aumento en la velocidad de corrosión. Se consideró que fue debido a la formación de estas capas al ser acumuladas, se agrietan y rompen para después ser reconstruidas al estar en contacto con H_2S [27].

Para comprender el mecanismo de este proceso de corrosión del acero y el ácido sulfhídrico (H₂S), se presentan las siguientes reacciones [23, 28] :



Cuando el H₂S se disuelve en agua, este se disocia parcialmente en iones H⁺ y HS⁻ y el ion HS⁻ al presentar una mayor capacidad de quimisorción que los iones de H₃O⁺ y OH⁻ tienden a reaccionar antes, por lo que da tiempo a formación de diferentes sulfuros de hierro.

1.6 Líquidos iónicos

La definición del término de “líquido iónico (LI)” se puede describir como un líquido que consta totalmente de iones. Un LI se diferencia de una solución iónica, esta última parte de la disolución de una sal en un disolvente, de tal manera que sus iones se separan y se dispersan en la solución. Así mismo, las mezclas eutécticas de LI con especies orgánicas moleculares tampoco son líquidos iónicos.

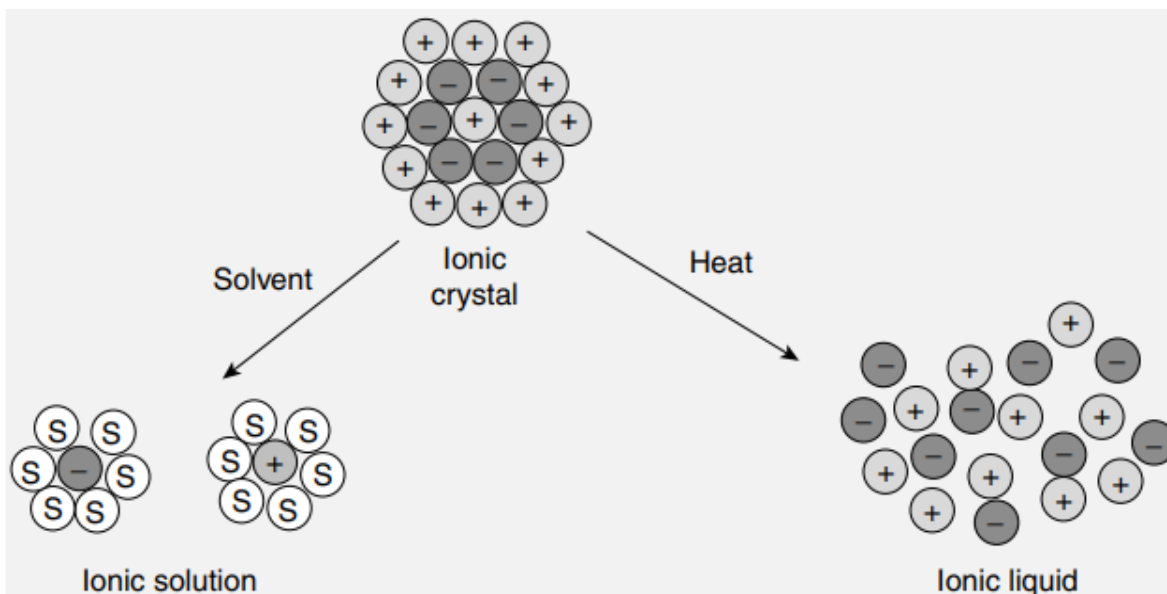


Figura 3. Diferencia entre una solución iónica y un líquido iónico.

De acuerdo con MacFarlane el término de “líquido iónico” se atribuyó a sales líquidas a temperatura ambiente establecido la definición como: “Un líquido compuesto completamente de iones” [29]. Para Freemantle, los LIs consisten exclusivamente o casi exclusivamente en iones y presentan conductividad iónica. Esta definición abarca otros términos como son las sales fundidas que presentan altos puntos de fusión [30]. Stark y Seddon, se refieren al término "LI" como aquel líquido que consiste completamente en iones, a diferencia de una solución iónica, que es una solución de una sal en un solvente molecular. Así mismo, las mezclas eutécticas de líquidos iónicos con especies orgánicas moleculares tampoco son líquidos iónicos [31]. Thomas Welton define a los LIs como sales fundidas que contienen solo iones, deben ser líquidos a temperatura ambiente o por debajo de ella [32]. Para Likhanova et al, un líquido iónico (IL) está constituido por iones, siendo sales conformadas por un catión orgánico y el anión que puede ser de tipo orgánico o inorgánico. Presentan características como reducir la corrosión en los metales, debido a que poseen una combinación de sus propiedades que pueden alentar o inhibir este proceso. Sus puntos de fusión son realmente bajos, por lo mismo son líquidos a temperatura ambiente. Uno de los beneficios de estos líquidos

es su facilidad de reciclaje, esto significa que se puede volver a utilizar. Así también su alta estabilidad térmica que rebasan en su gran mayoría a los 300°C. En el estudio y análisis de los LIs como ICs, estos han sido catalogados como inhibidores de corrosión verdes, por su baja o nula toxicidad en su gran mayoría. Existen varios tipos de ILs como los fosfonios, imidazolio, amonio y piridinio, entre otros, se han incluido también los derivados de carboxilatos, haluros y sulfunatos [33]. A temperatura ambiente son típicamente sales con grandes cationes orgánicos que contienen nitrógeno o fósforo con cadenas alquílicas lineales. Los siguientes aniones son los más comunes: haluros: bromuro (Br⁻), cloruro (Cl⁻), nitrato [NO₃]⁻, cloroaluminatos [AlCl₄]⁻, [Al₂Cl₇]⁻, hexafluorofosfato [PF₆]⁻, tetrafluoroborato [BF₄]⁻, sulfatos de alquilo [RSO₄]⁻, alquilcarboxilatos [RCO₂]⁻, p-toluenosulfonato [CH₃C₆H₄SO₃]⁻, trifluorometilsulfonato [CF₃SO₃]⁻, bis(trifluorometilsulfonyl) amida [N(SO₂CF₃)₂]⁻, bis(perfluoroetilsulfonyl) amida [N(SO₂C₂F₅)₂]⁻, dicianamida [N(CN)₂]⁻ [29, 34]. Por su configuración química los ILs poseen características que pueden cumplir para funcionar como un IC. Como es la capacidad de mezclar y combinar sus constituyentes catiónicos y aniónicos, funcionalización de sus cadenas laterales, grupos pendientes altamente activos, átomos con alta densidad electrónica, anillos aromáticos, grupos alquílicos, etc [30, 35-37].

1.7 Imidazol

Los imidazoles son compuestos orgánicos heterocíclicos que consisten en un anillo de 5 átomos, de los cuales dos átomos son nitrógeno. Su estructura química se muestra en la Figura 4, y su fórmula química es C₃H₄N₂. Este tipo de molécula presenta una alta densidad electrónica en un átomo de nitrógeno teniendo un par de electrones no conjugados, dichos electrones no participan en los enlaces y se encuentran disponibles para la formación de enlaces químicos. Los pares de electrones no conjugados se encuentran en átomos como oxígeno, nitrógeno, azufre u otros átomos electronegativos. Estos átomos tienden a compartir los electrones con otros para completar su capa de valencia [38, 39].

La molécula de imidazol puede presentar diferentes sustituciones en el anillo que cambiarían su comportamiento, pueden tener distintos sustituyentes de radicales, los cuales, pueden estar formados por uno o varios átomos como los grupos funcionales (metilo, etilo, propilo, etc.), halogenuros (flúor, cloro, bromo, yodo), grupos nitro (-NO₂), grupos alcoxi (-OR) entre muchos otros. Estas nuevas moléculas son conocidas como derivados [40, 41],

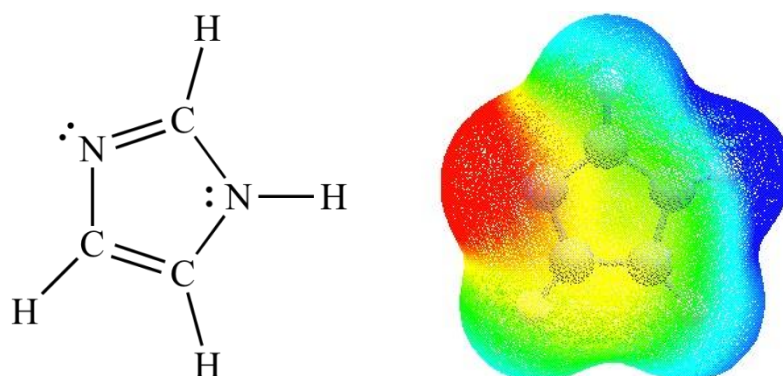


Figura 4. Estructura y mapa electrostático del imidazol.

Los imidazoles, así como sus derivados han sido utilizados como inhibidores de corrosión. Esta clase de inhibidores han sido agregadas a sistemas de estudio para reducir la velocidad de corrosión en las superficies metálicas de interés.

Los imidazoles y sus derivados pueden actuar como IC debido a sus propiedades químicas. Algunas propiedades que presentan para inhibir son [42-46]:

Formación de una capa protectora: los imidazoles pueden adsorberse en la superficie del metal, dando como resultado una capa protectora que impide el contacto directo entre la superficie del metal y el medio corrosivo.

Bloqueos de sitios activos: Los imidazoles pueden interferir con los sitios activos en la superficie metálica bloqueándolos y protegiendo la superficie.

Reacciones químicas específicas: Algunos imidazoles pueden reaccionar con los productos corrosivos o iones formando compuestos solubles o pasivadores que protegen la superficie metálica.

1.8 Imidazol como Inhibidor de Corrosión

La corrosión en los metales como el acero provoca cambios en las propiedades mecánicas. Por ello, es necesario utilizar IC para la eliminación de estas sustancias corrosivas. Se han realizado varios estudios donde se utilizan distintos tipos procesos como el endulzar el gas o usar un LI.

Se han presentados distintos procesos para la eliminación del ácido sulfhídrico (H_2S) de distintos medios como el petróleo y el gas natural. La absorción ha sido un proceso de interés.

Endulzar el gas natural es un proceso para eliminar compuestos que sean considerados impurezas como el ácido sulfhídrico (H_2S) y el dióxido de carbono (CO_2), estos compuestos pueden ser perjudiciales para el equipo de operación, así como el medio ambiente. El endulzar el gas es un paso importante en su procesamiento antes de su distribución, debido a que es más seguro su manejo y es menos corrosivo para las líneas del gas natural, debido a que dichos compuestos pueden generar corrosión [47, 48]

Este proceso generalmente implica el uso de aminas o soluciones alcalinas para absorber los compuestos. Dichos compuestos reaccionan con los componentes ácidos en el gas para formar sales que pueden ser separadas del gas.

Los líquidos iónicos (LIs) se han empezado a utilizar para la separación de H_2S y CO_2 al presentar propiedades únicas como la capacidad de eliminación y captura de H_2S [49, 50].

Otra manera de poder prevenir problemas de corrosión es usando los LIs en los medios corrosivos dentro de las tuberías.

Loganathan et al, realizaron un estudio de un compuesto heterocíclico nombrado 2-(furan-2-il)-4,5-difenil-1H imidazol (FDPI) donde la actividad inhibidora de corrosión en 1 M de ácido clorhídrico presento una inhibición del 95.84% en acero dulce, explica que la capa protectora adsorbida obedece a la isoterma de Langmuir dando un resultado de una fisisorción. Este tipo de inhibidor se comportó de manera mixta [51].

Así mismo, se han catalogado a los imidazoles como IC amigables al ambiente. Existen derivados de imidazol similares al estudiado, como el Bromuro de 1-propil-3-metilimidazolio ([PrMIm]Br), Bromuro de 1-aminopropil-3-metilimidazolio ([APMIm]Br) y Ditribromuro de 1,4-bis(3-metilimidazolio-1-il)butano ([BMIm]Br₂), estos fueron estudiados en un medio corrosivo de ácido sulfúrico en un acero dulce, presentando una eficiencia de 69.6%, 88.0% y 92.9% respectivamente. Esto se base en una adsorción química en la superficie del metal [41].

Algunos LIs similares a yoduro de 1-propil-2,3-dimetilimidazolio ([DPIM⁺] I⁻) y bromuro de 1,3-dibromoimidazolio ([DBrIM⁺] Br⁻) han sido reportados por otros autores, donde dependiendo el medio estudiado y su estructura varia su eficiencia de inhibición.

Algunos derivados de imidazol han sido probados en distintos medios corrosivos como ácido clorhídrico (HCl) y ácido sulfúrico (H₂SO₄) presentando distinta eficiencia de inhibición dependiendo la configuración de su estructura molecular. Existe una gran variedad de derivados de imidazol, con cadenas alquílicas o sustituciones con halogenuros. El bromuro de 3-hexadecil-1,2-dimetil-1H-imidazol-3-io ([C₁₆M₂Im] Br) y bromuro de 3-hexadecil-1-metil-1H-imidazol-3-io [(C₁₆M₁Im] Br]) son LI que fueron probados en ácido clorhídrico en acero dulce. La inhibición que presentan resultó en unas buenas eficiencias de 95.35% y 90.67%, el primer LI presento una mayor eficiencia debido a su aumento de sustituyentes de alquilo. Además de ser IC del tipo mixto con efecto predominante al sitio anódico [52].

En el caso de bromuros, Langová et al. investigaron la eficiencia del LIs de bromuros de 1-alquil-3-metilimidazolio en solución de 1 M de HCl sobre un acero dulce, se presentó un aumento en la eficiencia de inhibición conforme a la concentración y el

aumento de la longitud de la cadena alquílica. Estos LI mostraron ser inhibidores del tipo mixto con inhibición predominante al sitio anódico, así mismo, el LI con mayor eficiencia fue el 1-octil-3-metilimidazolio con un 94% [53].

Capítulo 2. Desarrollo experimental

2.1 Preparación de testigos de acero API X52

Para realizar la evaluación de los diferentes inhibidores de corrosión se emplearon testigos de acero API 5L X52. Previamente, estos fueron introducidos en una barra circular de teflón con resina epóxica, a fin de obtener un área superficial de contacto de 0.2922 cm^2 . La superficie del electrodo de trabajo fue desbastada con lijas de carburo de silicio del número 300, 600 y 1200 para obtener superficies de trabajo homogéneas, esto se realizó antes y después de cada prueba electroquímica [54].

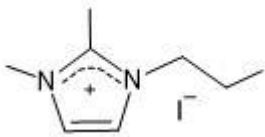

2.2 Preparación de medio corrosivo: Salmuera

El medio amargo fue preparado bajo la norma NACE 1D182 [55], para ello se disolvió cloruro de sodio (96.2 g/L), cloruro de calcio (3.05 g/L) y cloruro de magnesio hexahidratado (1.86 g/L) en un matraz aforado de 1 litro con agua desionizada. Posteriormente, se colocaron 100 mL de salmuera en una celda electroquímica con agitación y burbujeo de gas nitrógeno por un periodo de 30 min con el propósito de desplazar el oxígeno dentro de la solución acuosa. Posteriormente se agregó 0.004 g de sulfito de sodio (Na_2SO_3), 0.353 g de sulfuro de sodio nanohidratado ($\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) y 0.16 mL de ácido acético (CH_3COOH) con agitación moderada y burbujeo de nitrógeno. Una vez disuelto el sulfuro de sodio, con una pipeta se tomó una muestra de la solución para su posterior medición del pH que fue 4.8. Con este procedimiento se generó H_2S *in situ*.

2.3 Preparación de inhibidores de corrosión

Los LIs evaluados como IC se presentan en la Tabla 1. Estos previamente fueron disueltos en alcohol isopropílico grado reactivo a 1000 ppm y dosificados a medio corrosivo en concentraciones de 25, 50, 75, 100, 125 y 150 ppm.

Tabla 1. Estructura química de líquidos iónicos evaluados como inhibidores de corrosión.

Nombre	Abreviación	Estructura	Peso molecular (g/mol)
Yoduro de 1-propil-2,3-dimetilimidazolio	[DPIM ⁺] I ⁻		267.01
Bromuro de 1,3-dibromoimidazolio	[DBrIM ⁺] Br ⁻		308.798

2.4 Pruebas electroquímica

Las mediciones electroquímicas de las curvas de polarización Tafel se realizó en una celda con 3 electrodos, siendo estos el electrodo de referencia de plata/cloruro de plata, el contraelectrodo de platino de alta pureza (99.9%) y el electrodo de trabajo de acero API X52. Las pruebas se realizaron en un potencióstato/galvanostato Autolab modelo PGSTAT302N acoplado a una laptop con el software de NOVA 2.1.

2.4.1 Polarización potenciodinámica a campo alto (PDP)

Para la técnica de PDP, se obtuvieron las curvas de Tafel en un rango de -250 mV a 250 mV vs. potencial de circuito abierto (OCP) a una velocidad de barrido de 1 mV/s con respecto al OCP. Los valores de la densidad de corriente (i_{corr}) de las reacciones de corrosión del acero con y sin inhibidor se determinaron con extrapolación lineal de las pendientes de las ramas anódicas y catódicas de Tafel.

2.4.2 Polarización potenciodinámica a campo bajo (Rp)

La técnica conocida como resistencia a la polarización (R_p) se realizó con un barrido en sobrepotenciales de -25 mV a +25 mV a una velocidad de barrido de 1 mV/s. Todos los experimentos fueron realizados por triplicado para garantizar la reproducibilidad de las pruebas realizadas,

2.5 Análisis superficial

La superficie del acero API X52 sin inhibidor y con mayor eficiencia de inhibición fue analizado después de 4 horas a 25°C mediante SEM. Las micrografías se obtuvieron de un microscopio electrónico de barrido marca JEOL-JSM-6300 utilizando un voltaje de aceleración de 20 kV.

Capítulo 3. Resultados y Discusión

3.1 Polarización potenciodinámica a campo alto

Se estudió la agresividad del medio amargo de ácido sulfhídrico (H₂S), con un pH de 4.8, como medio corrosivo sobre la velocidad de corrosión del acero API 5L X52. Los estudios fueron realizados en presencia y ausencia de inhibidor de corrosión (IC) siendo estos dos líquidos iónicos (LIs): yoduro de 1-propil-2,3-dimetilimidazolio ([DPIM⁺] I⁻) y bromuro de 1,3-dibromoimidazolio ([DBrIM⁺] Br⁻). Estos compuestos fueron dosificados a diferentes concentraciones en un rango de 25 a 150 ppm. En la Figura 5 y 6, se muestra el comportamiento de las curvas potenciodinámicas de Tafel obtenidas de la superficie del acero estudiado. Los valores de la densidad de corriente (i_{corr}), para las reacciones de corrosión del acero con y sin la adición de IC, fueron determinados por extrapolación sobre las ramas anódica y catódica en las curvas de Tafel al potencial de corrosión (E_{corr}).

Del análisis de las curvas en las figuras anteriores citadas, se observa que la densidad de corriente en ambas ramas (anódica y catódica) disminuyen conforme incrementa la concentración del IC en el medio amargo. Esto debido a una mayor disposición de moléculas de IC, que pueden ocupar sitios activos sobre la superficie del acero API X52. Adicionalmente, el potencial de corrosión (E_{corr}) presentó un desplazamiento total a la zona más positiva. Algunos autores han resaltado la importancia del E_{corr} en la clasificación del tipo de IC, porque este solo puede desplazarse de tres formas con respecto al blanco (sin IC): al lado catódico (-), anódico (+) o entre ambos lados. El cálculo del desplazamiento del potencial de corrosión (ΔE_{corr}) fue determinado con ecuación (13):

$$\Delta E_{corr} = E_{corr}^{inh} - E_{corr}^0 \quad (13)$$

donde E_{corr}^{inh} y E_{corr}^0 , son el potencial de corrosión de la muestra expuesta al medio corrosivo con y sin inhibidor, respectivamente.

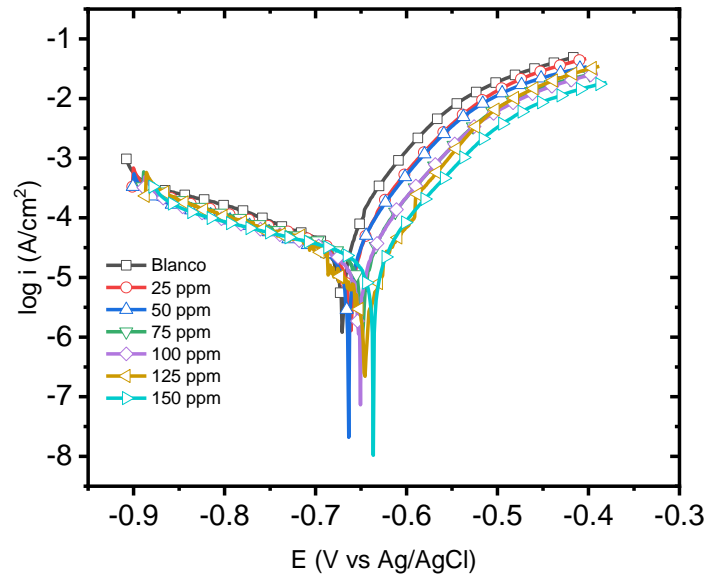


Figura 5. Polarización potenciodinámica de acero API 5L X52 en H₂S con diferentes concentraciones de [DPIM⁺] I⁻.

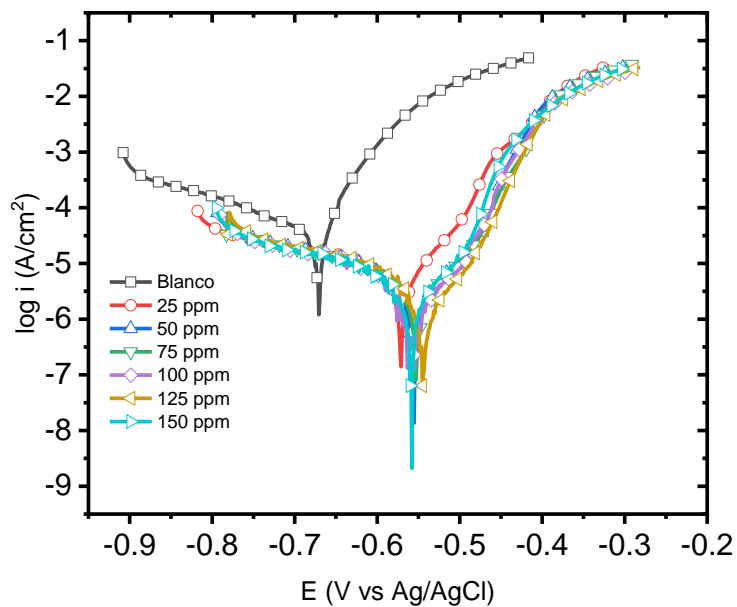


Figura 6. Polarización potenciodinámica de acero API 5L X52 en H₂S con diferentes concentraciones de [DBrIM⁺] Br⁻.

La Figura 7, presenta el comportamiento de ΔE_{corr} en función de la concentración de los LIs: [DPIM⁺] I⁻ y [DBrIM⁺] Br⁻ en la superficie del acero API X52 en el medio corrosivo. Se observa que el máximo desplazamiento de ΔE_{corr} es predominante a la zona anódica, siendo este de 33 mV (150 ppm de [DPIM⁺] I⁻) y de 126 mV (125 ppm de [DBrIM⁺] Br⁻).

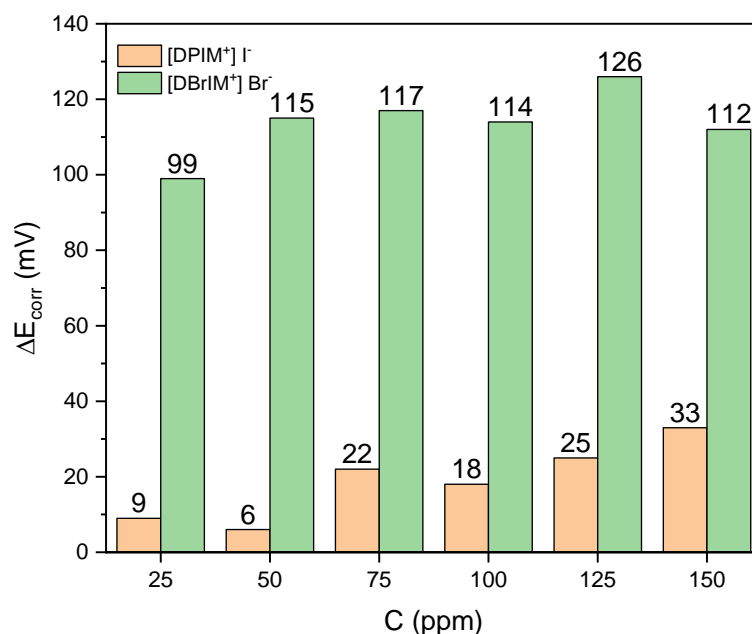


Figura 7. Desplazamiento de potencial (ΔE_{corr}) de los IC.

Adicionalmente, se ha reportado que si los valores del ΔE_{corr} son casi despreciables o cero, la inhibición se debe a un bloqueo geométrico por moléculas del IC sobre la superficie metálica y la eficiencia de inhibición es directamente proporcional a la concentración del IC [56]. Si los desplazamientos son menores a 85 mV, el IC se puede clasificar como mixto. En el caso de que los valores de ΔE_{corr} sean positivos mayores a +85 mV o negativos menores a -85 mV, el inhibidor puede ser anódico o

catódico, respectivamente. De acuerdo con la Figura 7, los valores del ΔE_{corr} para $[DPIM^+] I^-$ son menores a 85 mV, por lo tanto, puede ser clasificado como inhibidor de tipo mixto, con preferencia al lado anódico. Es decir, la adsorción de las moléculas es principalmente sobre los sitios anódicos y reduce la velocidad de corrosión del acero en esta zona a través de un bloqueo de sitios activos. Mientras que $[DBrIM^+] Br^-$ es un IC de tipo anódico y su presencia en la interfase metal-solución reduce la disolución metálica, sin afectar la velocidad de las reacciones de evolución de hidrógeno en las zonas catódicas, en los sitios activos del acero API X52 en el medio amargo. La Figura 8, muestra más claramente la distribución de las zonas y sus preferencias a los sitios activos de los compuestos $[DPIM^+] I^-$ y $[DBrIM^+] Br^-$.

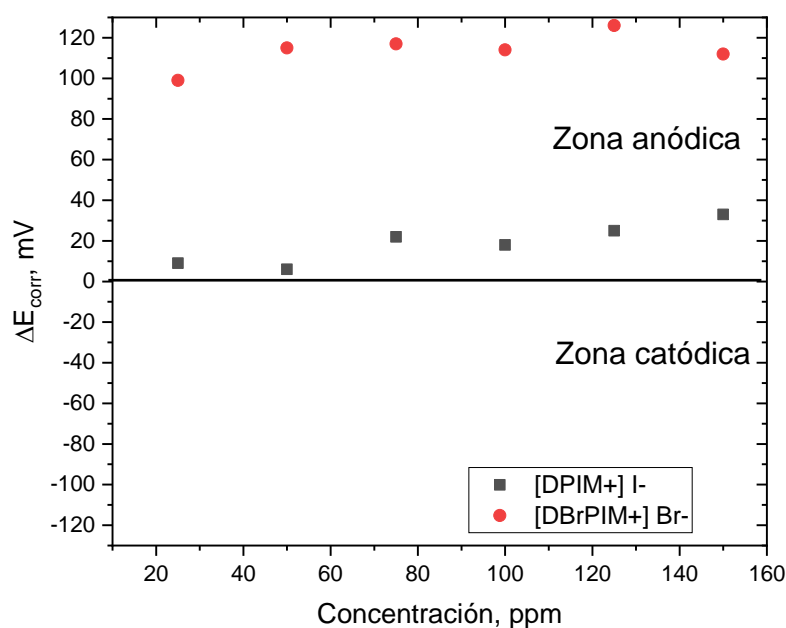


Figura 8. Distribución del comportamiento de los LI's $[DPIM^+] I^-$ y $[DBrPIM^+] Br^-$.

Así mismo, del análisis de la Figuras 5 y 6 se observa que la densidad de corriente se reduce con la concentración de IC en las ramas de las curvas de polarización, este fenómeno se atribuye a que la presencia de las moléculas de inhibidor, las cuales disminuyen la cinética de las reacciones anódicas y catódicas. Esta

disminución en la densidad de corriente es más evidente en las ramas anódicas en presencia de IC, indicando que los LIs disminuye la velocidad de corrosión del acero API X52 en el medio amargo. Es importante resaltar el comportamiento de la rama anódica de la Figura 6, no presento un comportamiento Tafeliano, es decir, no exhiben una linealidad bien definida por al menos una década de $\log i$ (A/cm^2). Este comportamiento, puede atribuirse a un proceso de deposición de productos de corrosión o impurezas en el metal, en combinación con moléculas de inhibidor, que en conjunto pueden dar origen a un proceso disolución-formación de la película de productos de corrosión-inhibidor [57]. La Tabla 2 y 3 resumen los parámetros electroquímicos obtenidos del trazo de las pendientes de Tafel en las curvas de la Figura 5 y 6. Se observa que los valores de la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) disminuye con la concentración de inhibidor, debido a que un mayor número de moléculas pueden ocupar sitios activos sobre la superficie, los cuales previamente podían ser ocupados por los iones agresivos del medio corrosivos (azufre) y moléculas de agua. Mientras que los valores de las pendientes (β_c, β_a) no presentan una tendencia bien definida con la concentración, debido a la orientación aleatoria de las moléculas sobre la superficie, que puede estar asociado a la densidad electrónica de los IC, al estar interaccionando entre la superficie metálica, así como los iones presentes en el medio corrosivo.

Tabla 2. Parámetros electroquímicos obtenidos mediante curvas PDP de acero API 5L X52 en H₂S sin y con diferentes concentraciones de [DPIM⁺] I⁻.

C (ppm)	-E _{corr} (mV)	β_a (mV/dec)	β_c (mV/dec)	I _{corr} ($\mu A/cm^2$)	IE _{icorr} (%)
0	670	52	265	53	-
25	661	48	233	30	43
50	664	47	226	24	56
75	648	51	219	24	56
100	652	53	228	21	60
125	645	53	202	19	65
150	637	58	262	21	61

Tabla 3. Parámetros electroquímicos obtenidos mediante curvas PDP de acero API 5L X52 en H₂S sin y con diferentes concentraciones de [DBrIM⁺] Br⁻.

C (ppm)	-E _{corr} (mV)	β _a (mV/dec)	β _c (mV/dec)	i _{corr} (μA/cm ²)	IE _{icorr} (%)
0	670	52	265	53	-
25	571	60	358	9	84
50	555	52	306	6	88
75	553	54	293	6	88
100	556	54	292	6	89
125	544	51	276	5	90
150	558	53	280	5	90

Adicionalmente, la eficiencia de inhibición (EI_T) fue calculada a partir de valores i_{corr} con la siguiente ecuación:

$$EI_T = \left[\frac{i_{corr}^0 - i_{corr}^{IC}}{i_{corr}^{IC}} \right] \times 100 \quad (14)$$

donde i_{corr}^0 y i_{corr}^{IC} son la densidad de corriente de corrosión en ausencia y en presencia del inhibidor, respectivamente. La Figura 9 se muestra el comportamiento de la EI_T contra la concentración [DPIM⁺] I⁻ y [DBrIM⁺] Br⁻, observándose que ambos compuestos inhiben la corrosión por acción del medio amargo, debido a la formación de una película protectora, que tiende a ser más estable con el incremento de la concentración. Es decir, la concentración del IC favorece una mayor transferencia de moléculas a los sitios activos, reduciendo los procesos de transferencia de energía por la cinética de las reacciones de oxidación-reducción en la interfase metal-solución. Además, al relacionar la configuración química de los compuestos como se muestra en la Tabla 1 con la EI_T ; se observa que [DBrIM⁺] Br⁻ presenta mejores resultados como IC con un rango de EI_T de 90% a 150 ppm. Esto se debe a la alta densidad electrónica localizada entre el catión-anión, primeramente, por la presencia de dos grupos pendientes Br enlazados al anillo imidazólico en combinación con el Br⁻ del anión. Estas dos partes anión-catión probablemente hacen que la nube de densidad electrónica sea mayor, como resultado su orientación, adsorción y enlace a la superficie del acero más estable [40, 41, 58]

Mientras que para [DPIM⁺] I⁻ la EI_T fueron relativamente bajas, obteniéndose la máxima eficiencia de 65% a 125 ppm. Aun cuando esta molécula posee un grupo imidazolio en el cation, los grupos pendientes en la posición 1 y 3 están formados por grupos R (CH₃ y C₃H₇) los cuales no poseen rica densidad electrónica a través de la cadena de carbonos. En algunos estudios se ha reportado que cadenas alquílicas pueden incrementar la eficiencia de inhibición de los LIs como IC, debido a que las cadenas alquílicas pueden funcionar como barreras hidrofílicas con el medio corrosivo [52, 59-62], sin embargo, en el presente estudio con los LIs estudiados y el medio de H₂S no se presentó dicha sinergia de las partes hidrofílicas. Por ello, la energía de la nube de la densidad electrónica formada por el anillo imidazolio del cation y el I⁻ del anión, posiblemente no es lo suficiente alta para favorecer la orientación de la molécula eficientemente a la superficie el acero API X52 y bloquear los sitios activos del acero.

Otra posibilidad de este comportamiento dentro del sistema, son los impedimentos estéricos entre moléculas, es decir, las moléculas de [DPIM⁺] I⁻ al intentar orientarse a la superficie metálica se interponen unas con las otras, formando un cumulo que no da oportunidad de formar una capa de protección uniforme que ayude a reducir la velocidad de corrosión.

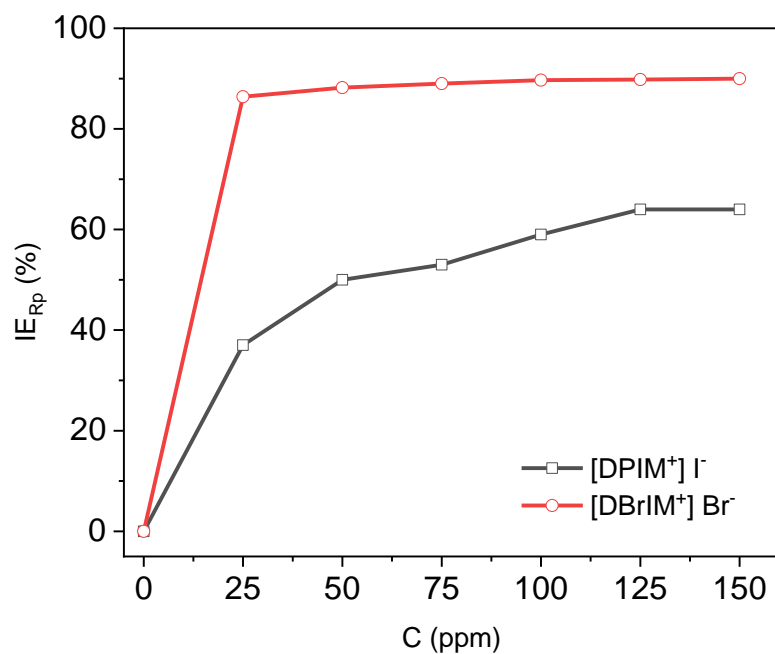


Figura 9. Eficiencia de Inhibición (IE_{PDP}) para H_2S a diferentes concentraciones de: $[DBrIM^+] Br^-$ y $[DPIM^+] I^-$.

3.2 Resistencia a la polarización

La Figura 10 muestra el comportamiento de los valores de $R_p-EI_{R_p}$ como función de la concentración de IC para las muestras de acero API X52 en H_2S . Los valores de R_p fueron obtenidos experimentalmente de las gráficas densidad de corriente vs sobrepotencial mostradas en la Figura 11 (a) y (b).

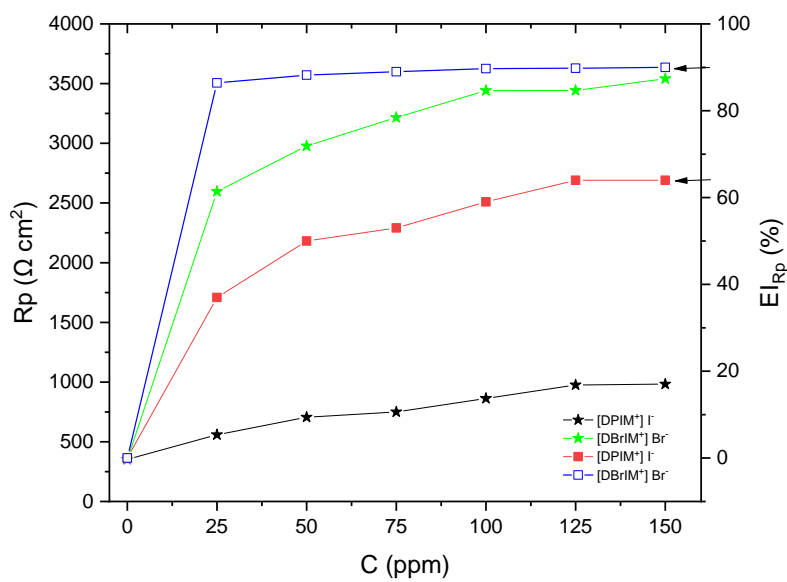
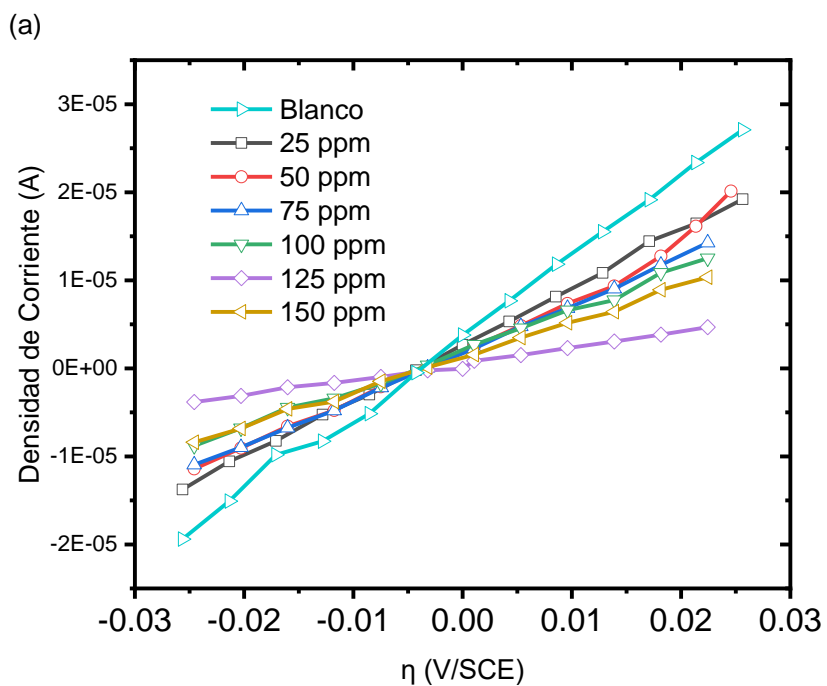


Figura 10. Comportamiento de Rp, así como su Eficiencia de Inhibición de los LIs.



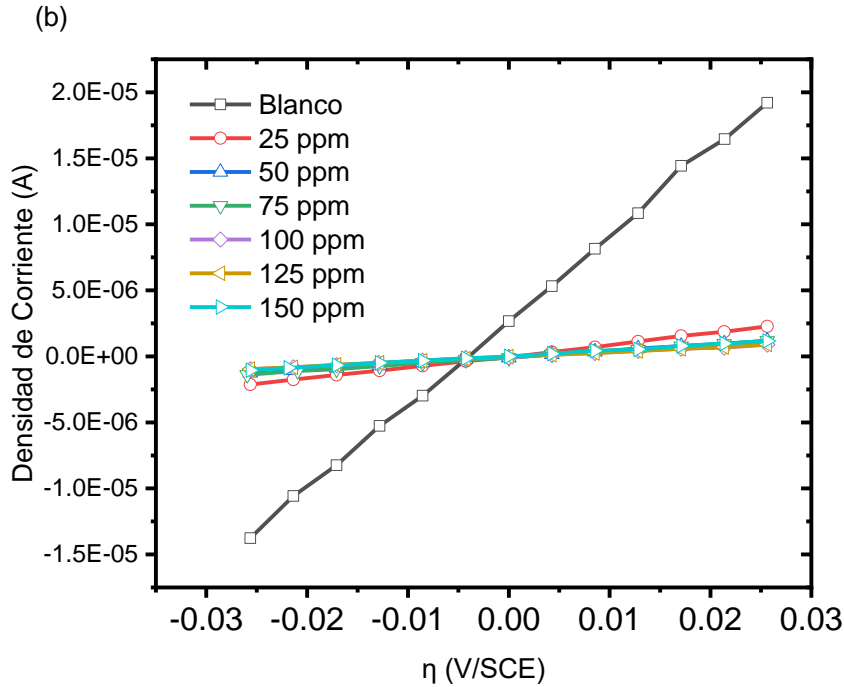


Figura 11. Comportamiento de R_p de los LIs: a) $[DBIM^+] I^-$ y b) $[DBrIM^+] Br^-$.

El valor de R_p fue obtenido del inverso de la pendiente de un ajuste lineal sobre la lineal de la respuesta densidad de corriente vs sobrepotencial. En ambos inhibidores $[DPIM^+] I^-$ y $[DBrIM^+] Br^-$ se observa que los valores de R_p incrementan con la concentración. Esto implica que sobre los sitios activos la velocidad de transferencia de carga eléctrica es menor, es decir, el flujo de electrones en la interfaz metal-electrolito disminuye con la concentración de IC, siendo este menor a la máxima concentración de IC. La IE_{RP} fue calculada con la siguiente expresión.

$$EI_{RP} = \left(\frac{Rp^{inh} - Rp^0}{Rp^{inh}} \right) \quad (15)$$

donde Rp^{inh} y Rp^0 corresponde en presencia y ausencia de IC, respectivamente.

Así mismo en la Figuras 6 se observa que IE_{RP} fue directamente proporcional con la concentración, sugiriendo que las moléculas de $([DPIM^+] I^-)$ y $([DBrIM^+] Br^-)$ en el

medio corrosivo, se adsorben sobre la superficie metálica y limitan la difusión de iones agresivos de S⁻ a la superficie del acero API X52.

3.3. Estudio del proceso de adsorción con isothermas teóricas.

Partiendo de la teoría de modelos de adsorción como se muestran en la tabla 4 [63], los resultados experimentales fueron ajustados, con el objetivo de comprender el mecanismo de adsorción hipotético de los LIs sobre la superficie del acero X52 en H₂S. Como se observa en la tabla, estos modelos están expresados en términos de la concentración molar del IC y el grado de superficie cubierta (θ), siendo esta un parámetro relacionado con la IE, $\theta=EI/100$.

Tabla 4. Modelos de isothermas de adsorción utilizados para ajustar los datos experimentales.

Isoterma	Modelo de adsorción	Ecuación lineal
Langmuir	$\frac{\theta}{\theta - 1} = K_{ads}C_{inh}$	$\frac{C_{inh}}{\theta} = C_{inh} + \frac{1}{K_{ads}}$
Frumkin	$\left(\frac{\theta}{\theta - 1}\right)e^{-2f\theta} = K_{ads}C_{inh}$	$\ln\left[\frac{\theta}{C_{inh}(\theta - 1)}\right] = 2f\theta + \ln(K_{ads})$
Temkin	$e^{f\theta} = K_{ads}C_{inh}$	$\ln(C_{inh}) = f\theta - \ln(K_{ads})$ $f = -2a$
Freundlich	$\theta = K_{ads}C_{inh}$	$\ln(\theta) = \ln(C_{inh}) + \ln(K_{ads})$

De manera ilustrativa estos modelos pueden ser comprendidos de manera más sencilla con ayuda de la Figura 13. De acuerdo con el modelo de isoterma, esto implicará una orientación de moléculas a la superficie metálica, su reacomodo y la formación de la película protectora “una capa o multicapas” (adsorbato), donde $1-\theta$ implicará los espacios no cubiertos por el IC, es decir sitios activos sin IC.

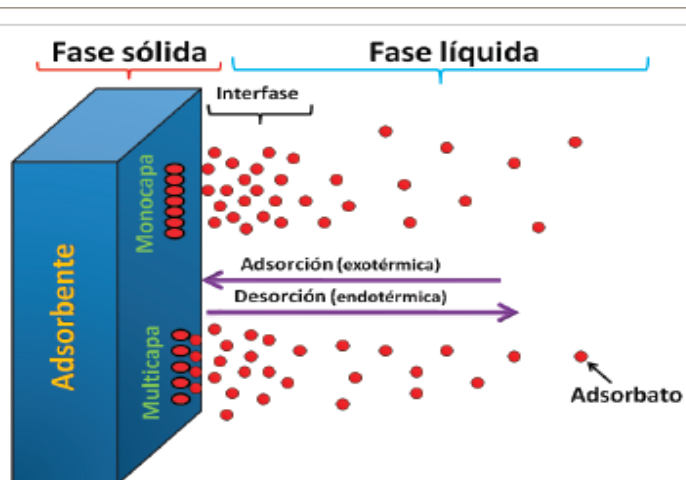


Figura 12. Esquema de orientación de la capa protectora del IC.

La Figura 13 muestra el ajuste de los datos experimentales al modelo lineal de Langmuir al graficar C/θ vs C , obteniéndose un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.991$ y 1 para $[\text{DPIM}^+] \text{I}^-$ y $[\text{DBrIM}^+] \text{Br}^-$, respectivamente. Los valores de intersección a la ordenada para cada isoterma fueron utilizados para calcular la constante de equilibrio de adsorción (K_{ads}). La importancia de esta constante radica en que representa la fuerza de adsorción de las moléculas de IC a la superficie del acero API X52. Obteniéndose los valores de 13020 y 135135 M^{-1} para $[\text{DPIM}^+] \text{I}^-$ y $[\text{DBrIM}^+] \text{Br}^-$, respectivamente, indicado un proceso de adsorción espontaneo a la superficie [64].

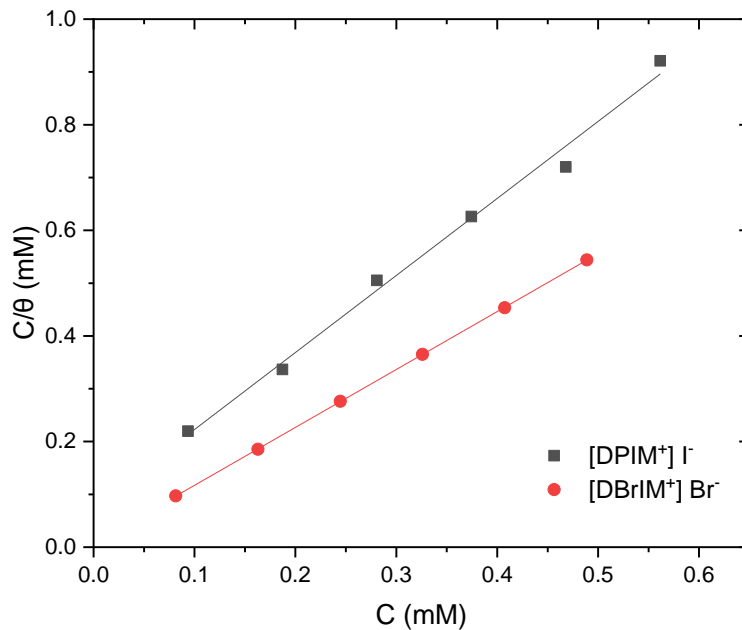


Figura 13. Isotermas de Langmuir para H₂S con [DPIM⁺] I⁻ y [DBrIM⁺] Br⁻.

Los valores de K_{ads} fueron empleados para calcular la energía libre de adsorción de Gibbs (ΔG_{ads}°) a partir de la ecuación:

$$\Delta G_{ads}^{\circ} = -RT \ln(55.5 \cdot K_{ads}) \quad (16)$$

donde R es la constante universal de los gases, T es la temperatura absoluta del sistema y 55.5 es el número de moles de agua. Diferentes autores han recurrido al uso de ΔG_{ads}° para justificar y plantear el mecanismo de adsorción de los IC es diferentes medios corrosivos. Para ello, de manera general se ha aceptado que si el valor de ΔG_{ads}° es superior a -20 kJ/mol, representa un proceso de adsorción física o fisorción y para los valores inferiores a -40 kJ/mol corresponde un proceso de quimisorción, existiendo un punto intermedio donde presentaría ambos procesos. Para el caso de estudio los valores de ΔG_{ads}° fueron de -16.3 y -22.1 kJ/mol para [DPIM⁺] I⁻ y [DBrIM⁺] Br⁻, respectivamente. Esto indica que el mecanismo de adsorción para [DPIM⁺] I⁻ es por un proceso de adsorción física, es decir su

interacción a la superficie metálica es solo por fuerzas de Van der Waals de atracción y repulsión, implicando que la configuración química de la molécula posiblemente solo es rica en densidad electrónica en el catión, limitándose su coordinación a la superficie del acero. Mientras que para [DBrIM⁺] Br⁻ presento un mecanismo de adsorción de tipo mixto “fisi-quimiadsorción. Resaltando la importancia de la configuración química del LI, como se indicó previamente, la presencia de dos átomos de bromo en el anillo imidazolio en el catión y el anión bromo, favorecen una mayor densidad electrónica y como resultado una mayor fuerza de atracción a la superficie metálica, donde su orientación es fundamental en la formación de la película protectora del medio corrosivo. Este tipo de resultados también han sido reportados en la evaluación de IC de tipo orgánicos en medios corrosivos [41, 53, 65, 66]

3.4. Análisis superficial del acero API X52 en H₂S

Los resultados electroquímicos obtenidos por PDP, Rp e EIS confirmaron que los compuestos inhiben la corrosión del acero API X52 en H₂S, soportando su eficiencia de inhibición de los compuestos, a través de un mecanismo de adsorción de las moléculas a la superficie del acero. Para confirmar y soportar esta protección del acero con los nuevos LIs, al compuesto [DBrIM⁺] Br⁻ que fue el más eficiente (90 % a 150 ppm), se realizaron análisis de SEM a la superficie del acero API X52 en ausencia y presencia de inhibidor a 150 ppm, mediante la técnica de inmersión por 4 horas. La Figura 14 (a) y (b) muestra la micrografía del acero sin IC en H₂S, observándose que la solución corrosiva promovió dos tipos de daños por corrosión. Uno de tipo localizada evidenciándose claramente en la Figura 14 (b), en la separación de los granos se observa la presencia de productos de corrosión, debido a que se observa la limitación bien definida de los límites de grano en el acero. El segundo tipo de corrosión es de tipo uniforme, donde se observa sobre los granos de la superficie homogénea son evidencia de pérdida de masa, debido a la evolución de las reacciones de oxido-reducción en los sitios activos.

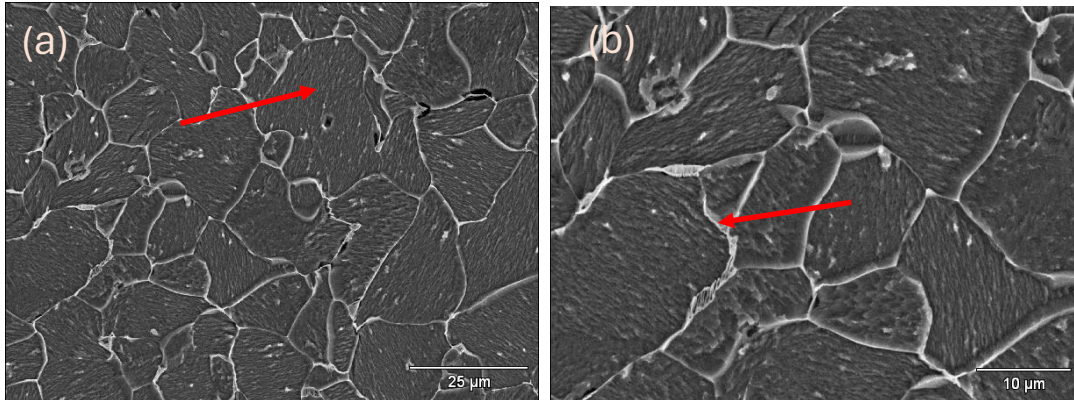


Figura 14. Superficie del acero API X52 en H₂S sin IC. (a) corrosión uniforme, 1000X y (b) corrosión en límite de grano, 2000X

Mientras que la micrográficas de la Figura 15 (a), corresponden a la superficie del acero estudiada en presencia de [DBrIM⁺] Br⁻, se observar que el LI efectivamente protege al acero del medio corrosivo. La superficie es homogénea con un ligero daño por corrosión de tipo uniforme, así como no evidencia un daño por corrosión localizada, como el reportado en la Figura 14. Es por ello, que la Figura 14 (a), soporta fehacientemente el resultado de la eficiencia de inhibición obtenido del compuesto [DBrIM⁺] Br⁻ por las técnicas electroquímicas. Además, como su EI_T fue del 90 %, hace suponer que ciertos sitios activos del acero no fueron protegidos y la evolución de las reacciones de oxido-reducción dieron como origen la formación de productos de corrosión como se muestra en la Figura 14 (b).

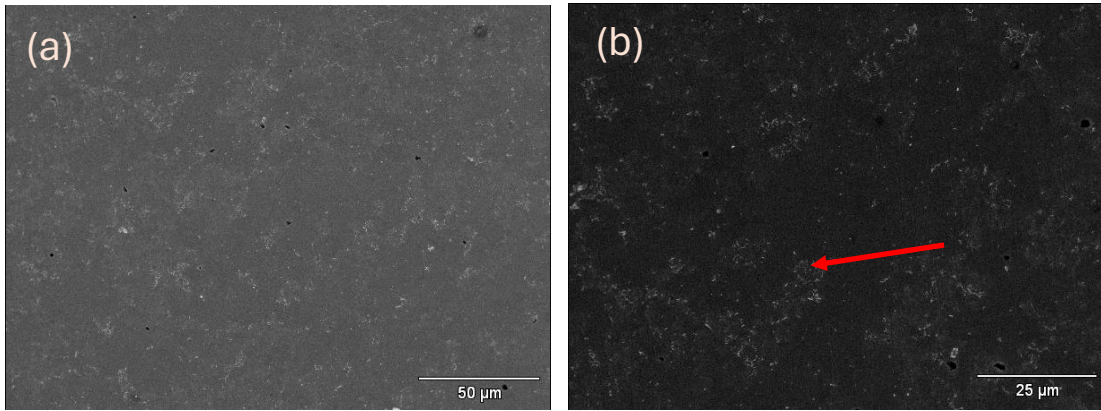


Figura 15. Superficie del acero API X52 en H₂S con IC a 150 ppm. (a) protección del acero, 1000X y (b) productos de corrosión, 2000X

Conclusiones

De acuerdo con los resultados de la evaluación de los líquidos iónicos derivados de imidazol, yoduro de 1-propil-2,3-dimetilimidazolio ([DPIM⁺] I⁻) y bromuro de 1,3-dibromoimidazolio ([DBrIM⁺] Br⁻) como inhibidores de corrosión sobre el acero API 5L X52 realizados con técnicas electroquímicas y análisis superficial, se llegó a las siguientes conclusiones:

1. Las pruebas electroquímicas de polarización de Tafel mostraron que la densidad de corriente (i_{corr}) disminuye conforme se aumenta la concentración de IC, dando como resultado un aumento en las moléculas del LI que se adsorben en la superficie provocando una disminución de la velocidad de corrosión.
2. Los LIs [DPIM⁺] I⁻ y [DBrIM⁺] Br⁻ presentaron una eficiencia máxima de 65% y 90%, respectivamente, siendo a concentraciones altas dando un aumento de estas moléculas en la superficie metálica que provocan un cambio en las propiedades de esta.
3. La prueba de Resistencia a la Polarización demostró el tipo de adsorción presentada en los Lis. El líquido iónico [DPIM⁺] I⁻ presento una adsorción física mientras que [DBrIM⁺] Br⁻ resulto ser del tipo misto.
4. La adsorción de los Lis sobre la superficie del acero API X52 en H₂S fue descrita mediante la isoterma de Langmuir. Con los valores se obtuvo la constante de equilibrio de absorción (K_{ads}) así como su energía libre de adsorción (ΔG°_{ads}) resultando en un proceso espontaneo de adsorción física y mixta.
5. Los resultados del análisis superficial en presencia de [DBrIM⁺] Br⁻ mostro una superficie mayormente homogénea a comparación con el blanco (sin

inhibidor). Se observo que la superficie no fue protegida completamente dando presencia de productos corrosivos.

Referencias

- [1] Koch, G. (2017). Cost of corrosion. Trends in oil and gas corrosion research and technologies, 3-30.
- [2] Fontana, M. G. (1989). Corrosion engineering (3ra ed.). McGraw-Hill.
- [3] ISO, E. (2015). 8044. Corrosion of Metals and Alloys: Basic Terms and Definitions.
- [4] Revie, R. W. (2008). Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering. John Wiley & Sons.
- [5] Ahmad, Z. (2006). Principles of corrosion engineering and corrosion control. Elsevier.
- [6] Pedferri, P., & Ormellese, M. (2018). Corrosion science and engineering (Vol. 720). Cham: Springer.
- [7] Salazar Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. Revista Tecnología en Marcha, 28(3), 127-136.
- [8] Shreir, L. L. (Ed.). (2013). Corrosion: metal/environment reactions. Newnes.
- [9] Izionworu, V., Ukpaka, C., & Oguzie, E. (2020). Green and eco-benign corrosion inhibition agents: Alternatives and options to chemical based toxic corrosion inhibitors. Chemistry International, 6(4), 232-259.
- [10] Sastri, V. S. (2011). Green corrosion inhibitors: theory and practice. John Wiley & Sons.
- [11] Introduction and Forms of Corrosion. (2011). Green Corrosion Inhibitors, 1–28. doi:10.1002/9781118015438.ch1
- [12] Tait, W. S. (2018). Controlling Corrosion of Chemical Processing Equipment. Handbook of Environmental Degradation of Materials, 583–600. doi:10.1016/b978-0-323-52472-8.00028-9

- [13] Tait, W. S. (2012). Corrosion Prevention and Control of Chemical Processing Equipment. *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, 863–886. doi:10.1016/b978-1-4377-3455-3.00028-6
- [14] François, R., Laurens, S., & Deby, F. (2018). Steel Corrosion in Reinforced Concrete. *Corrosion and Its Consequences for Reinforced Concrete Structures*, 1–41. doi:10.1016/b978-1-78548-234-2.50001-9
- [15] Calderón Hernández, J. W., Luz, I. B. B., Hincapie Ladino, D., & Alonso Falleiros, N. (2015). Estudio de la resistencia a la corrosión por picadura de aceros inoxidables austeníticos: influencia de la adición de manganeso en solución sólida. *Revista Ion*, 28(1), 63-72.
- [16] Zhang, X., Zhao, S., Wang, Z., Li, J., & Qiao, L. (2021). The pitting to uniform corrosion evolution process promoted by large inclusions in mooring chain steels. *Materials Characterization*, 181, 111456.
- [17] Aperador Chaparro, W., Rodríguez Zamora, G., & Franco Arenas, F. (2013). Estimación de la corrosión intergranular en la aleación de magnesio AZ31B soldada por fricción-agitación. *Revista de Ingeniería*, (39), 39-44.
- [18] Reiffenstein, R. J., Hulbert, W. C., & Roth, S. H. (1992). Toxicology of Hydrogen Sulfide. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 32(1), 109–134. doi:10.1146/annurev.pa.32.040192.000545
- [19] Vafajoo, L., Ganjian, K., & Fattahi, M. (2012). Influence of key parameters on crude oil desalting: An experimental and theoretical study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 90-91, 107–111. doi:10.1016/j.petrol.2012.04.022
- [20] Perez, T. E. (2013). Corrosion in the oil and gas industry: an increasing challenge for materials. *Jom*, 65(8), 1033-1042.
- [21] Persson, S., Edlund, M.-B., Claesson, R., & Carlsson, J. (1990). The formation of hydrogen sulfide and methyl mercaptan by oral bacteria. *Oral Microbiology and Immunology*, 5(4), 195–201. doi:10.1111/j.1399-302x.1990.tb00645.x

- [22] Hernández Espejel, A., Dominguez Crespo, M. A., Cabrera Sierra, R., Rodríguez Meneses, C., & Arce Estrada, E. M. (2010). Investigations of corrosion films formed on API-X52 pipeline steel in acid sour media. *Corrosion science*, 52(7), 2258-2267
- [23] Yin, Z. F., Zhao, W. Z., Bai, Z. Q., Feng, Y. R., & Zhou, W. J. (2008). Corrosion behavior of SM 80SS tube steel in stimulant solution containing H₂S and CO₂. *Electrochimica Acta*, 53(10), 3690-3700.
- [24] Vedage, H., Ramanarayanan, T. A., Mumford, J. D., & Smith, S. N. (1993). Electrochemical Growth of Iron Sulfide Films in H₂S-Saturated Chloride Media. *CORROSION*, 49(2), 114–121. doi:10.5006/1.3299205
- [25] Bai, P., Zheng, S., & Chen, C. (2015). Electrochemical characteristics of the early corrosion stages of API X52 steel exposed to H₂S environments. *Materials Chemistry and Physics*, 149, 295-301.
- [26] Schulte, M., & Schutze, M. (1999). The role of scale stresses in the sulfidation of steels. *Oxidation of metals*, 51(1), 55-77.
- [27] Paul, C. O., Ahmed, E., & Mohamed, A. M. A. (2015). Effect of temperature on the corrosion behavior of API X80 steel pipeline. *International Journal of Electrochemical Science*, 10(12), 10246-10260.
- [28] Nasirpouri, F., Mostafaei, A., Fathyunes, L., & Jafari, R. (2014). Assessment of localized corrosion in carbon steel tube-grade AISI 1045 used in output oil–gas separator vessel of desalination unit in oil refinery industry. *Engineering Failure Analysis*, 40, 75–88. doi:10.1016/j.engfailanal.2014.02.012
- [29] MacFarlane DR, Kar M, Pringle JM. *Fundamentals of Ionic Liquids: From Chemistry to Applications*: Wiley; 2017
- [30] Freemantle M, Welton T, Rogers RD. *An Introduction to Ionic Liquids*: Royal Society of Chemistry; 2019.
- [31] Stark A, Seddon KR. Ionic liquids. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 2000.

- [32] Welton T. Room-temperature ionic liquids. Solvents for synthesis and catalysis. *Chemical reviews*. 1999;99(8):2071-84.
- [33] Likhanova NV, Arellanes-Lozada P, Olivares-Xometl O, Lijanova IV, Arriola-Morales J, Mendoza-Hernández JC, et al. Ionic liquids with carboxylic-acid-derived anions evaluated as corrosion inhibitors under dynamic conditions. *International Journal of Electrochemical Science*. 2019;14:2655-71.
- [34] Greaves TL, Weerawardena A, Fong C, Krodkiewska I, Drummond C. Protic ionic liquids: solvents with tunable phase behavior and physicochemical properties. 2006;110(45):22479-87.
- [35] Ahmed SA, Awad MI, Althagafi II, Altass HM, Morad M, Alharbi A, et al. Newly synthesized indolium-based ionic liquids as unprecedented inhibitors for the corrosion of mild steel in acid medium. *Journal of Molecular Liquids*. 2019;291.
- [36] Kadokawa J. *Ionic Liquids: New Aspects for the Future*: IntechOpen; 2013
- [37] Zimmerman JB, Anastas PT, Erythropel HC, Leitner W. Designing for a green chemistry future. *Science*. 2020;367(6476):397-400.
- [38] Hooper, J. K., Eggink, L. L., & Chen, M. (2007). Chlorophylls, ligands and assembly of light-harvesting complexes in chloroplasts. *Photosynthesis research*, 94, 387-400.
- [39] Tolomeu, H. V., & Fraga, C. A. M. (2023). Imidazole: synthesis, functionalization and physicochemical properties of a privileged structure in medicinal chemistry. *Molecules*, 28(2), 838.
- [40] Zhang, Z., Chen, S., Li, Y., Li, S., & Wang, L. (2009). A study of the inhibition of iron corrosion by imidazole and its derivatives self-assembled films. *Corrosion Science*, 51(2), 291–300. doi:10.1016/j.corsci.2008.10.040
- [41] Zeng, X., Zheng, X., Guo, L., Xu, Q., Huang, H., & Tan, B. (2020). Three imidazole ionic liquids as green and eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in sulfuric acid medium. *Journal of Molecular Liquids*, 115063. doi:10.1016/j.molliq.2020.115063

- [42] Zhang, Z., Chen, S., Li, Y., Li, S., & Wang, L. (2009). A study of the inhibition of iron corrosion by imidazole and its derivatives self-assembled films. *Corrosion Science*, 51(2), 291–300. doi:10.1016/j.corsci.2008.10.040
- [43] Elewady, G. Y. (2008). Pyrimidine derivatives as corrosion inhibitors for carbon-steel in 2M hydrochloric acid solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 3(10), 1149-1161.
- [44] Ansari, K. R., Sudheer, Singh, A., & Quraishi, M. A. (2015). Some pyrimidine derivatives as corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 36(7), 908-917.
- [45] Andrzejewski, M., Marciniak, J., Rajewski, K. W., & Katrusiak, A. (2015). Halogen and hydrogen bond architectures in switchable chains of di-and trihaloimidazoles. *Crystal Growth & Design*, 15(4), 1658-1665.
- [46] Pragathiswaran, C., Ramadevi, P., & Karthik Kumar, K. (2020). Imidazole and Al₃+nano material as corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solutions. *Materials Today: Proceedings*. doi:10.1016/j.matpr.2020.08.671
- [47] Erdmann, E., Ruiz, L. A., Martínez, J., Gutierrez, J. P., & Tarifa, E. E. (2012). Endulzamiento de gas natural con aminas. Simulación del proceso y análisis de sensibilidad paramétrico. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 3(4), 89-101.
- [48] Gutiérrez, J. P., Sosa, T. S., Ruiz, L. A., Zapata, A. R., & Erdmann, E. (2013). DISEÑO DEL PROCESO DE ENDULZAMIENTO DE GAS NATURAL. SIMULACIÓN Y COMPARACIÓN. In *Proceedings of the VII Congreso Argentino de Ingeniería Química* (p. 13).
- [49] Abdi, J., Hadipoor, M., Esmaeili-Faraj, S. H., & Vaferi, B. (2022). A modeling approach for estimating hydrogen sulfide solubility in fifteen different imidazole-based ionic liquids. *Scientific Reports*, 12(1), 4415.
- [50] Xiong, W., Shi, M., Peng, L., Zhang, X., Hu, X., & Wu, Y. (2021). Low viscosity superbase protic ionic liquids for the highly efficient simultaneous removal of H₂S and CO₂ from CH₄. *Separation and Purification Technology*, 263, 118417.

- [51] K T, L., Thimmakonda, V. S., S, N., & R, N. (2021). Corrosion inhibitive evaluation and DFT studies of 2-(Furan-2-yl)-4,5-diphenyl-1H-imidazole on mild steel at 1.0M HCl. *Journal of the Indian Chemical Society*, 98(9), 100121. doi:10.1016/j.jics.2021.100121
- [52] Subasree, N., & Selvi, J. A. (2020). Imidazolium based ionic liquid derivatives; synthesis and evaluation of inhibitory effect on mild steel corrosion in hydrochloric acid solution. *Heliyon*, 6(2).
- [53] Langová, Š., Pánek, P., Fojtášková, J., & Vicherková, Š. (2018). Alkylimidazolium Bromides as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Acidic Medium. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71(6), 1371–1378. doi:10.1007/s12666-017-1272-x
- [54] ASTM. G1-03. Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens: ASTM international; 2017
- [55] NACE. Wheel Test Method Used for Evaluation of Film-Persistent Corrosion Inhibitors for Oilfield Applications. NACE 1D182:2017; 2017
- [56] Cao, C. (1996). On electrochemical techniques for interface inhibitor research. *Corrosion Science*, 38(12), 2073–2082. doi:10.1016/s0010-938x(96)00034-0
- [57] Flitt, H. J., & Schweinsberg, D. P. (2005). Evaluation of corrosion rate from polarisation curves not exhibiting a Tafel region. *Corrosion Science*, 47(12), 3034-3052.
- [58] El-Asri, A., Jmiai, A., Bourzi, H., Lin, Y., & El Issami, S. (2024). Chemistry of the interaction between Imidazole derivatives as corrosion inhibitors molecules and copper/brass/zinc surfaces: A DFT, reactive and classical molecular force fields study. *Surfaces and Interfaces*, 44, 103799.
- [59] Arellanes-Lozada, P., Díaz-Jiménez, V., Hernández-Cocoletzi, H., Nava, N., Olivares-Xometl, O., & Likhanova, N. V. (2020). Corrosion inhibition properties of iodide ionic liquids for API 5L X52 steel in acid medium. *Corrosion Science*, 175, 108888.

- [60] Wang, Y., Qiang, Y., Zhi, H., Ran, B., & Zhang, D. (2023). Evaluating the synergistic effect of maple leaves extract and iodide ions on corrosion inhibition of Q235 steel in H₂SO₄ solution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 117, 422-433.
- [61] Gurjar, S., Sharma, S. K., Sharma, A., & Ratnani, S. (2021). Performance of imidazolium based ionic liquids as corrosion inhibitors in acidic medium: A review. *Applied Surface Science Advances*, 6, 100170.
- [62] Verma, C., Quraishi, M. A., & Rhee, K. Y. (2022). Hydrophilicity and hydrophobicity consideration of organic surfactant compounds: Effect of alkyl chain length on corrosion protection. *Advances in Colloid and Interface Science*, 306, 102723.
- [63] Gómez-Sánchez, G., Likhanova, N. V., Arellanes-Lozada, P., Arriola-Morales, J., Nava, N., Olivares-Xometl, O., ... & Corro, G. (2019). Electrochemical, surface and 1018-steel corrosion product characterization in sulfuric acid with new imidazole-derived inhibitors. *International Journal of Electrochemical Science*, 14(9), 9255-9272
- [64] Kosari, A., Moayed, M. H., Davoodi, A., Parvizi, R., Momeni, M., Eshghi, H., & Moradi, H. (2014). Electrochemical and quantum chemical assessment of two organic compounds from pyridine derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in HCl solution under stagnant condition and hydrodynamic flow. *Corrosion Science*, 78, 138–150. doi:10.1016/j.corsci.2013.09.009
- [65] Pourghasemi Hanza, A., Naderi, R., Kowsari, E., & Sayebani, M. (2016). Corrosion behavior of mild steel in H₂SO₄ solution with 1,4-di [1'-methylene-3'-methyl imidazolium bromide]-benzene as an ionic liquid. *Corrosion Science*, 107, 96–106. doi:10.1016/j.corsci.2016.02.023
- [66] El-Saeed, H. M., Fouda, A. S., Deyab, M. A., Shalabi, K., Nessim, M. I., & El-Katori, E. E. (2022). Synthesis and characterization of novel ionic liquids based on imidazolium for acid corrosion inhibition of aluminum: Experimental, spectral, and computational study. *Journal of Molecular Liquids*, 358, 119177.