

CORROSIÓN POR AGUA CON SURFACTANTE EN ACERO

Determinación de la corrosividad de un agua de efluente procedente del desplazamiento de crudo
con surfactante en contacto con acero API N-80Q

Oscar David Higuera Sierra

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos

Modalidad trabajo de investigación

Director

Adán Yovani León Bermúdez

Doctor en Ingeniería Química

Codirector

Darío Yesid Peña Ballesteros

Doctor en Corrosión

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

En primer lugar, a Dios, el dador de vida y esperanza, por sostenerme en cada paso de este camino, por renovar mis fuerzas en los momentos difíciles y por brindarme la claridad necesaria para continuar.

A mis padres, Oscar Higuera y Jariet Sierra, gracias por darme todo lo que he necesitado, por su apoyo incondicional y por ser el pilar que ha sostenido mis sueños desde el inicio.

A mis abuelitos, Ismael e Inés, gracias por tenerme siempre presentes en sus oraciones, por su amor silencioso y constante.

A mi hermana Silvia, por animarme y recordarme lo lejos que puedo llegar.

Y a mi novia Karen, por su amor incondicional, por mostrarme todo lo bonito de esta vida y por estar a mi lado con ternura, paciencia y fe. Gracias por ser refugio, inspiración y alegría en este proceso.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Universidad Industrial de Santander (UIS, Colombia) por su apoyo a través del proyecto 4241 - 4616, al «Ministerio de Ciencia y Tecnología (MINCIENCIAS)» y a la «Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH)» a través del proyecto 1102- 1035-92931, contrato 036 2023.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al doctor Adan León, cuya guía constante, conocimiento y compromiso fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación. Además de su orientación académica, agradezco profundamente su generosa disposición para aportar material de trabajo, equipos y recursos, sin los cuales este proyecto no habría sido posible. Su acompañamiento creó un entorno académico enriquecedor que fortaleció significativamente mi proceso investigativo.

Asimismo, extendiendo mi gratitud al doctor Darío Peña por su valiosa asesoría, así como por facilitar recursos técnicos y presupuestales claves para la ejecución del proyecto. Su experiencia, disposición para el diálogo crítico y apoyo constante marcaron una diferencia sustancial en el rumbo y calidad de este trabajo.

A mis compañeros del GIC, Andrey, Julián, Yeison, y a todos aquellos que hicieron parte de este camino, les agradezco profundamente por su dedicación, paciencia y colaboración a lo largo de esta investigación en un ambiente de trabajo respetuoso y motivador que no solo facilitó el desarrollo del estudio, sino que también enriqueció cada etapa del proceso. Su apoyo fue determinante para que esta experiencia se convirtiera en un verdadero impulso hacia la continuidad de mi deseo investigativo.

Oscar David Higuera S.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
Introducción	13
Objetivos	15
1.1. Objetivo General.....	15
1.2. Objetivos Específicos	15
2. Marco Referencial.....	16
2.1. Corrosión	16
2.1.1. Mecanismos de corrosión	16
2.1.2. Factores que afectan la corrosión	16
2.2. Fundamentos de la corrosión electroquímica	18
2.2.1. Celda electroquímica	18
2.2.2. Potenciostato	19
2.2.3. Potencial de electrodo	19
2.3. Tipos de corrosión electroquímica.....	20
2.3.1. Corrosión uniforme o generalizada	20
2.3.2. Corrosión localizada.....	21
2.3.3. Corrosión por picaduras	21
2.4. Técnicas electroquímicas para la evaluación de la corrosión	21
2.4.1. Medición del potencial de circuito abierto (OCP)	21
2.4.2. Prueba de resistencia a la polarización anódica	22

2.4.3.	Extrapolación de Tafel	23
2.5.	Acero API- N80Q.....	25
2.5.1.	Metalografía del acero API N-80Q.....	25
2.6.	Técnicas de caracterización post-corrosión	26
2.6.1.	Microscopia electrónica de barrido (SEM- Scanning Electron Microscopy)	26
2.6.2.	Difracción de rayos X (DRX).....	27
3.	Revisión de antecedentes	28
4.	Metodología	30
4.1.	Reactivos, materiales y equipos utilizados	31
4.1.1.	Reactivos	31
4.1.2.	Equipos.....	32
4.1.3.	Preparación del material.....	33
4.2.	Fase 1. Propiedades fisicoquímicas del agua de efluente obtenida en el desplazamiento de crudo con surfactante.....	33
4.3.	Fase 2. Evaluar el efecto de la composición de las aguas de efluente sobre la tasa de corrosión del acero API N-80, utilizando técnicas electroquímicas.....	34
4.3.1.	Construcción de la celda.	34
4.3.2.	Mediciones electroquímicas	35
4.4.	Fase 3. Análisis de la relación entre la reactividad del agua de efluente sobre los productos de corrosión formados en el acero API N-80Q y los mecanismos involucrados, mediante SEM-EDS y DRX.....	37

5.	Resultados.....	40
5.1.	Fase 1. Propiedades fisicoquímicas del agua de efluente obtenida en el desplazamiento de crudo con surfactante.....	40
5.2.	Resultados Fase 2. Evaluar el efecto de la composición de las aguas de efluente sobre la velocidad de corrosión del acero API N-80, utilizando técnicas electroquímicas.....	42
5.3.	Resultados Fase 3. Análisis de la relación entre la reactividad del agua de efluente sobre los productos de corrosión formados en el acero API N-80Q y los mecanismos involucrados, mediante SEM-EDS y DRX.....	47
6.	Conclusiones	54
7.	Recomendaciones.....	55
	Referencias bibliográficas.....	56
	Apéndices.....	58

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Composición química y propiedades mecánicas del acero API N-80Q.....	25
Tabla 2. Equipos	32
Tabla 3. Condiciones de registro DRX.....	38
Tabla 4. Composición iónica del agua de formación del campo Quifa.	40
Tabla 5. Caracterización completa de fluidos.....	40
Tabla 6. Caracterización de fluidos - metales.	41
Tabla 7. Velocidad de corrosión de cada experimento.	45
Tabla 8. EDS Acero API N-80 Blanco	47
Tabla 9. Efecto de la temperatura en las muestras de agua de producción sin SDBS.....	48
Tabla 10. Efecto de la temperatura en las muestras de agua sintética sin SDBS.	49
Tabla 11. Efecto de 1000 ppm de SDBS en las muestras de A.P. a 25°C y 65°C.....	50
Tabla 12. Efecto de 1000 ppm de surfactante en las muestras de A.S. a 25°C y 65°C....	51

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Curva característica de resistencia a la polarización anódica.....	22
Figura 2. Curva característica de Tafel	24
Figura 3. Diagrama Experimental	30
Figura 4. Celda electroquímica conectada a potencióstato y baño circulador.....	32
Figura 5. Cupón de acero API N-80Q.....	33
Figura 6. Potencial de corrosión.	43
Figura 7. Curvas de polarización anódica para las pruebas según diseño experimental. .	44
Figura 8. Efectos principales para velocidad de corrosión.	45
Figura 9. Diagrama de Pareto Estandarizado para Velocidad de Corrosión.....	46
Figura 10. SEM-EDS Acero API N-80Q Blanco	47
Figura 11. Difractograma DRX Acero API N-80Q.....	52
Figura 12. Resumen Difractogramas DRX	53

Glosario

Agua de Producción (A.P) = Se nombrará agua de producción a las muestras seleccionadas recolectadas de un campo de producción de hidrocarburos en Colombia

Agua Sintética (A.S) = Se nombrará así al tipo de agua preparada en laboratorio con salinidad de 1000 ppm.

Contraelectrodo (CE) = Electrodo de platino alta resistencia a la corrosión y alta estabilidad química, permite transferencia rápida de electrones.

Densidad de corriente de corrosión I_{corr} = Se refiere a la cantidad de corriente que fluye a través de un conductor debido a la corrosión y se expresa en (A/m²).

Difracción de rayos X (DRX) = Técnica analítica usada para estudiar la estructura cristalina, la composición química y otras propiedades de los materiales.

Dodecibencenosulfonato de sodio (SBDS) = Surfactante aniónico de alto contenido con propiedades de detergencia, humectación, formación de espuma, emulsificación y dispersión.

Electrodo de referencia (RE) = Este componente de plata cloruro de plata permite medir el potencial de otros electrodos en una celda electroquímica.

Electrodo de trabajo (WE) = Se usó cupones de acero API N-80Q en donde se llevan a cabo reacciones redox y permiten la transferencia de electrones.

Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS) = Técnica analítica usada en el análisis elemental de materiales.

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) = Técnica que usa un haz de electrones para obtener imágenes de alta resolución de la superficie de las muestras.

Milésimas de pulgada por año (mpy) = Unidad de medida utilizada para expresar la velocidad de corrosión en metales.

Potencial de corrosión (E_{corr}) = Medida electroquímica que indica la tendencia de un material a corroerse en un ambiente específico.

Recuperación mejorada de petróleo (RMP) = Métodos utilizados para aumentar la cantidad de petróleo que se puede extraer de un yacimiento después de que las técnicas de recuperación y primaria y secundaria han sido insuficientes.

Velocidad de corrosión (CR) = Parámetro que describe la tasa a la que un material se degrada debido a reacciones químicas y se mide en milésimas de pulgada por año.

Resumen

Título: Determinación de la corrosividad de un agua de efluente procedente del desplazamiento de crudo con surfactante en contacto con un acero API N-80*

Autor: Oscar David Higuera Sierra**

Palabras Clave: Corrosividad, aguas efluentes, microscopia electrónica de barrido (SEM), Difracción de rayos X (DRX), acero API N-80.

Descripción: La corrosión en la industria de hidrocarburos representa un desafío crítico debido al deterioro de los materiales, altos costos asociados a los diferentes procesos y riesgos operacionales. En este trabajo se evaluó la corrosividad de aguas de efluentes obtenidos en el desplazamiento de crudo con surfactante (SDBS) sobre acero API N-80Q, material ampliamente usado en tuberías de producción. Se construyó una celda electroquímica capaz de simular condiciones de superficie y yacimiento, en la cual se realizaron ensayos electroquímicos, polarización anódica y extrapolación de Tafel. Posteriormente, los cupones metálicos fueron analizados mediante SEM-EDS y DRX para identificar los mecanismos de daño.

Los experimentos se realizaron bajo un diseño factorial 2^3 , considerando tipo de agua (producción y sintética), temperatura (25°C y 65°C) y concentración de surfactante (0 y 1000 ppm). Los resultados electroquímicos demostraron mediante un análisis estadístico que la interacción entre la temperatura-tipo de agua y el efecto de la temperatura son las variables más significativas en la velocidad de corrosión. El análisis morfológico evidenció la formación de óxidos y picaduras asociadas a la presencia de cloruros, sulfatos y dureza reducida, lo que favorece la corrosión localizada.

Los resultados destacan la necesidad de evaluar la interacción entre surfactantes, condiciones operativas y composición del efluente para anticipar el desempeño de los materiales. Además, la celda diseñada se presenta como una herramienta confiable para estudios en condiciones de yacimiento.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de petróleo. Ingeniería de petróleo. Director: Adan Yovani León Bermúdez. Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Darío Yesid Peña Ballesteros. Doctor en Corrosión.

Abstract

Title: Determination of the corrosiveness of effluent water from crude oil displacement with surfactant in contact with API N-80 steel*

Author: Oscar David Higuera Sierra**

Key Words: Corrosiveness, effluent water, scanning electron microscopy (SEM), API N-80 steel.

Description: Corrosion in the hydrocarbon industry represents a critical challenge due to material deterioration, high costs associated with different processes, and operational risks. This study evaluated the corrosivity of effluent water obtained from surfactant-based displacement of crude oil (SDBS) on API N-80Q steel, a material widely used in production pipelines. An electrochemical cell capable of simulating surface and reservoir conditions at 65°C was constructed, in which electrochemical tests, anodic polarization, and Tafel extrapolation were performed. Subsequently, the metal coupons were analyzed using SEM-EDS and DRX to identify the damage mechanisms.

The experiments were carried out under a 2³ factor design, considering water type (production and synthetic), temperature (25°C and 65°C), and surfactant concentration (0 and 1000 ppm). The electrochemical results demonstrated through statistical analysis that the interaction between temperature and water type and the effect of temperature are the most significant variables in the corrosion rate. Morphological analysis showed the formation of oxides and pitting associated with the presence of chlorides, sulfates, and reduced hardness, which favors localized corrosion.

The results highlight the need to evaluate the interaction between surfactants, operating conditions, and effluent composition to anticipate the performance of materials. In addition, the designed cell is presented as a reliable tool for studies under reservoir conditions.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Petroleum Engineering. Director: Adan Yovani León Bermúdez. Doctor of Chemical Engineering. Co-director: Darío Yesid Peña Ballesteros. Doctor of Corrosión.

Introducción

La corrosión de los metales en la industria de hidrocarburos es un problema serio, tanto por los costos que genera como por los riesgos que puede implicar. Cuando el acero entra en contacto con las aguas asociadas a la producción de crudos, pueden contener varios tipos de sustancias químicas, incluidos surfactantes, y por tanto los equipos se pueden desgastar más rápido. Esto no solo significa inversión en reparaciones y mantenimientos, sino que también puede representar un peligro en la seguridad de las operaciones. Por eso, esta investigación se propuso estudiar qué tan rápido se corroe un tipo de acero muy usado en la industria, el API N-80Q, cuando está expuesto a aguas de producción en contacto con Dodecilmencenosulfonato de sodio (SBDS).

El SBDS se utiliza en los procesos de producción de hidrocarburos, particularmente en la recuperación mejorada de petróleo (RMP) como un surfactante para mejorar la eficiencia en la extracción de crudo. Su función principal es reducir la tensión interfacial entre el petróleo y el agua en el yacimiento, lo que facilita el desplazamiento del crudo atrapado en las formaciones rocosas hacia los pozos de producción. Este componente puede alterar la composición química del efluente y generar un entorno que podría impactar al material. Por ello, surge la necesidad de investigar cuál es el efecto de las aguas de efluentes sobre el acero API N-80Q, tanto a escala microscópica en la superficie como a nivel macroscópico, bajo condiciones de temperatura de operación por lo cual se construyó una celda electroquímica capaz de soportar ensayos con aguas de producción a una temperatura de 65 °C, simulando condiciones de yacimiento. Se emplearon muestras de agua con y sin la presencia del surfactante SBDS, tanto sintética (preparada en laboratorio) como de producción (obtenida en campo). La velocidad de corrosión fue determinada mediante ensayos

electroquímicos utilizando un potencióstato EMSTAT 4S (H.R) ®, y posteriormente se analizó la superficie de los cupones de acero mediante microscopía electrónica de barrido acoplada a espectroscopía de dispersión de energía (SEM-EDS), y difracción de rayos X (DRX) con el fin de identificar y comprender los mecanismos de daño presentes.

Los resultados obtenidos pueden aportar conocimientos clave para el desarrollo de estrategias de mitigación de la corrosión y selección adecuada de materiales. Asimismo, la celda electroquímica desarrollada representa una herramienta innovadora que permite evaluar, de manera más precisa y controlada, el comportamiento del material bajo condiciones térmicas representativas del entorno operativo, sentando así una base sólida para futuras investigaciones aplicadas en el sector del petróleo y gas.

Objetivos

1.1. Objetivo General

Determinar la corrosividad de un agua de efluente procedente del desplazamiento de crudo con surfactante en contacto con un acero API N-80.

1.2. Objetivos Específicos

Determinar las propiedades fisicoquímicas del agua de efluente obtenida en el desplazamiento de crudo con surfactante preseleccionado.

Evaluar el efecto de la composición de las aguas de efluente sobre la tasa de corrosión del acero API N-80, utilizando técnicas electroquímicas como resistencia a la polarización lineal, curvas de polarización potencio dinámicas y TAFEL.

Analizar la relación entre la reactividad del agua de efluente sobre los productos de corrosión formados en el acero API N-80 y los mecanismos involucrados, mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (DRX).

2. Marco Referencial

2.1. Corrosión

La corrosión se refiere al daño progresivo que sufre un metal debido a una reacción química o electroquímica con su entorno. Es importante distinguir este fenómeno de los deterioros ocasionados por factores físicos, los cuales no se clasifican como corrosión, sino que se describen con términos como erosión, desgaste o abrasión. En algunas situaciones, el daño físico puede combinarse con un ataque químico, recibiendo denominaciones como corrosión-erosión, desgaste corrosivo o corrosión por fricción (Revie & Uhlig, 2008).

2.1.1. *Mecanismos de corrosión*

La corrosión puede manifestarse a través de distintos mecanismos, entre ellos los más representativos son la corrosión electroquímica y la oxidación directa. Ambos procesos conllevan una transformación química del metal, pero difieren en sus condiciones y naturaleza.

2.1.1.1. Corrosión electroquímica: Se origina cuando el metal forma celdas electroquímicas internas en la región anódica el metal se oxida y libera electrones (disolviéndose), mientras que en la zona catódica esos electrones se consumen en reacciones de reducción. La disolución del metal por tanto tiene lugar en el ánodo (Buchanan & Stansbury, 2012a).

2.1.1.2. Oxidación directa o corrosión seca: Consiste en la combinación directa del metal con el ambiente. Este fenómeno en materiales metálicos a altas temperaturas con gases y vapores calientes. Proceso homogéneo y generalizado (Mars G. Fontana, 1990).

2.1.2. *Factores que afectan la corrosión*

El fenómeno de la corrosión está influenciado por múltiples variables, entre las cuales destacan tanto las propiedades del material expuesto como las condiciones del entorno que lo

rodea. La siguiente descripción de los principales factores que afectan este proceso se basa en la nota técnica de (Salazar Jiménez, 2015).

Acidez de la solución (pH): El pH de una solución indica la concentración de iones hidrógeno presentes en ella. Cuando el pH es inferior a 7, la solución se considera ácida y contiene una alta proporción de protones disponibles para aceptar electrones, lo que intensifica las reacciones en la región anódica. Por ello, los ambientes ácidos son generalmente más agresivos desde el punto de vista corrosivo que los neutros o alcalinos.

Presencia de sales disueltas: Las sales disueltas en un electrolito pueden influir significativamente en su acidez. Las sales ácidas, como los cloruros de aluminio, hierro o amonio disminuyen el pH de la solución, acelerando así la corrosión. Por el contrario, algunas sales alcalinas, como el fosfato trisódico, el tetraborato de sodio, el silicato de sodio y el carbonato de sodio, tienden a aumentar el pH y, en ciertos casos, actúan como inhibidores del proceso corrosivo.

Capas protectoras: La susceptibilidad de un material a la corrosión puede reducirse mediante la presencia de capas protectoras. Estas pueden ser aplicadas externamente, como recubrimientos, o generarse de forma natural a través del fenómeno de pasivación, en el cual se forman películas delgadas de óxidos metálicos que limitan el avance del ataque corrosivo.

Concentración de oxígeno: El contenido de oxígeno disuelto en el medio también es un factor crucial. En materiales ferrosos, un mayor nivel de oxígeno suele incrementar la velocidad de corrosión debido a la formación de productos no protectores. Sin embargo, en metales pasivables, una mayor concentración de oxígeno favorece la formación de capas pasivas que actúan como barreras eficaces frente al deterioro.

Temperatura: El aumento de temperatura acelera la velocidad de corrosión al mejorar la movilidad iónica y la difusión de oxígeno hacia la superficie metálica, incluso a través de capas

pasivas. Se ha observado que un incremento de tan solo 2 °C puede duplicar la tasa de corrosión, lo que convierte a la temperatura en un factor crítico, especialmente en procesos de oxidación a alta temperatura.

Velocidad de flujo del fluido: En sistemas que involucran transporte de líquidos o gases, un flujo más rápido tiende a intensificar la corrosión. Esto se debe a que se facilita el acceso de los agentes corrosivos a nuevas áreas metálicas y se interfiere con la formación o estabilidad de películas protectoras, promoviendo además fenómenos de erosión-corrosión.

2.2. Fundamentos de la corrosión electroquímica

La corrosión electroquímica es un proceso heterogéneo que ocurre cuando un metal entra en contacto con un medio conductor, estableciéndose reacciones de transferencia de carga entre la fase sólida (metal) y la fase líquida (electrolito). Este fenómeno requiere condiciones específicas para su desarrollo. Primero, el metal debe presentar zonas diferenciadas con comportamiento anódico y catódico, lo que permite la formación de micro celdas galvánicas. A su vez, debe existir un electrolito que conecte ambas regiones, facilitando la conducción iónica y cerrando el circuito electroquímico (Buchanan & Stansbury, 2012b).

Además, es necesaria una conexión eléctrica entre ánodo y cátodo que permita el flujo de electrones a través del metal. La movilidad iónica entre ambas zonas es crucial para el sostenimiento de las reacciones de oxidación y reducción. Estas condiciones suelen presentarse en ambientes con temperaturas moderadas, generalmente entre 100 y 150 °C, lo cual acelera la cinética de corrosión sin destruir las estructuras pasivantes (Buchanan & Stansbury, 2012b).

2.2.1. Celda electroquímica

Una celda electroquímica es un dispositivo experimental diseñado para estudiar reacciones electroquímicas mediante mediciones controladas, permitiendo evaluar procesos de oxidación-

reducción y corrosión en diversos materiales metálicos (Fontana, 2007). Este tipo de celda está constituida por tres electrodos principales: un electrodo de trabajo (el material en estudio, en este caso acero API N-80Q), un electrodo de referencia (Ag/AgCl) y un contraelectrodo (platino, Pt). Estos electrodos se encuentran sumergidos en un electrolito, que puede ser una solución acuosa con composición específica, como agua de producción o agua sintética enriquecida con surfactante (Bard & Faulkner, 2001).

2.2.2. Potenciostato

Un potenciostato es un instrumento electrónico que controla el voltaje de una celda electroquímica y mide la corriente resultante. Los potenciostatos se utilizan en diversas aplicaciones, entre ellas el electroanálisis, la detección, el diagnóstico biomédico y la nanotecnología (Augusto & Cruz, 2024).

En un potenciostato, el elemento central es un amplificador operacional, cuyo objetivo principal es regular el flujo de corriente hacia la celda electroquímica para mantener constante el potencial entre el electrodo de trabajo (WE) y el electrodo de referencia (RE). La señal de entrada al sistema, representada como V_{in} , corresponde al potencial deseado que se desea establecer entre WE y RE. Este valor es definido por el usuario mediante el potenciostato y puede ajustarse en función de las necesidades del experimento (por ejemplo, para realizar un barrido de potencial en una curva de polarización).

2.2.3. Potencial de electrodo

El potencial de electrodo es una propiedad fundamental en electroquímica que describe la tendencia de un material a participar en reacciones de oxidación o reducción cuando se encuentra en contacto con una solución electrolítica que contiene sus propios iones. En términos simples, el potencial de electrodo refleja la facilidad con la que un material metálico puede perder electrones

(oxidarse) o ganarlos (reducirse) en una interfaz electrodo-disolución. Esta medida es clave para comprender y controlar los procesos redox que ocurren en celdas electroquímicas, tales como la corrosión, la electrodeposición, la formación de películas pasivantes o la generación de corriente en una batería. Esta medida es clave para comprender y controlar los procesos redox que ocurren en celdas electroquímicas, tales como la corrosión, la electrodeposición, la formación de películas pasivantes o la generación de corriente en una batería (Echeverría et al., 2003).

Para determinar el potencial de un solo electrodo no basta con una única conexión directa; se requieren al menos dos terminales situados en puntos distintos para registrar la diferencia de potencial (Augusto & Cruz, 2024). Uno se enlaza al electrodo metálico de trabajo y el otro establece contacto con la solución. Al sumergir este segundo conductor se forma una nueva interfase solución-metal que añade su propia contribución al potencial medido. Como esta interfase adicional distorsiona el valor real del potencial del electrodo de trabajo, la medición debe realizarse frente a un electrodo de referencia cuyo potencial sea constante y reproducible (Echeverría et al., 2003).

2.3. Tipos de corrosión electroquímica

Los principales tipos de corrosión son los siguientes descritos y tomados de (Philip A. Schweitzer, 2010).

2.3.1. Corrosión uniforme o generalizada

Es aquella que afecta de manera homogénea a toda la superficie del metal expuesto deteriorándolo por completo. Este tipo de corrosión implica una relación directa entre pérdida del material, reducción del espesor y gravedad del fenómeno. Es relativamente fácil de predecir y controlar, por lo que un accidente causado por este tipo de ataque raramente ocurre. Es fácil de observar a simple vista en metales como el níquel y el cromo.

2.3.2. Corrosión localizada

Este tipo de corrosión representa un mayor riesgo dado que su detección y control tienen un poco más de exhaustividad respecto a la corrosión uniforme. Se presenta en zonas específicas del material, determinadas por la composición es decir la naturaleza del material, geometría y condiciones ambientales. Las principales manifestaciones de este tipo de corrosión incluyen corrosión galvánica, por fisura, por picaduras, por cavitación y microbiológica.

2.3.3. Corrosión por picaduras

La corrosión por picaduras es una forma de corrosión altamente localizada que ataca la superficie del metal en puntos específicos, generando cavidades o túneles que pueden tener un diámetro de entre 1 a 2 mm, aunque su profundidad puede ser considerable. A diferencia de la corrosión uniforme, este tipo de ataque perfora de forma impredecible y suele ser difícil de detectar hasta que se ha producido un daño severo.

2.4. Técnicas electroquímicas para la evaluación de la corrosión

La electroquímica ofrece un conjunto de técnicas experimentales altamente sensibles y precisas para estudiar los procesos de corrosión en materiales metálicos. Estas técnicas permiten no solo detectar la presencia de corrosión, sino también cuantificar su velocidad, evaluar mecanismos de degradación y analizar la eficacia de recubrimientos o inhibidores (Mars G. Fontana, 1990).

2.4.1. Medición del potencial de circuito abierto (OCP)

Esta técnica consiste en medir el potencial espontáneo de un electrodo metálico, teniendo en cuenta el principio de que toda superficie electrónica es equipotencial, lo que significa que posee el mismo potencial de electrodo en toda la superficie, el metal que sufre corrosión tiende a

tener un único potencial de electrodo, polarizando todas las áreas, lo que hace que se tenga un solo valor de potencial, el cual se conoce como potencial de circuito abierto(Andrés et al., 2006).

2.4.2. Prueba de resistencia a la polarización anódica

Una prueba de resistencia a la polarización anódica es un método de monitoreo de la velocidad de corrosión, puede dar una indicación de la resistencia a la corrosión de los materiales en un ambiente acuoso.

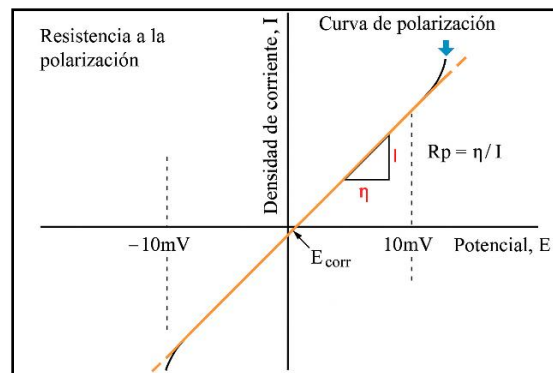
Es un fenómeno que se produce por ondas electromagnéticas, en donde el campo eléctrico está oscilando solo en el plano de polarización(Salazar, 2014). Esta técnica se basa en aplicar un pequeño barrido de potencial alrededor del circuito abierto y medir la constante resultante, a partir de esta se obtiene la pendiente de la curva-potencial(Addison, 2002).

Con este procedimiento se obtiene la curva de polarización, es decir, la variación del potencial en relación con el potencial de corrosión, E_{corr} .

En la Figura 1 se observa una curva de resistencia a la polarización típicas de un metal.

Figura 1.

Curva característica de resistencia a la polarización anódica



Nota: Modificado de (N. Anita et al., 2023).

2.4.3. *Extrapolación de Tafel*

Esta técnica electroquímica es utilizada para evaluar la velocidad de corrosión, basada principalmente en las reacciones redox que ocurren en la interfase metal-electrolito. El fundamento teórico parte de la ecuación de Butler-Volmer, que la relaciona la corriente generada en un electrodo con la variación del potencial aplicado respecto al potencial de equilibrio o corrosión (Bard & Faulkner, 2001).

A potenciales alejados del equilibrio (generalmente mayores a ± 50 – 100 mV respecto a E_{corr}) la ecuación de Butler–Volmer puede simplificarse, debido a que únicamente predomina uno de los procesos, ya sea anódico o catódico. En estas condiciones, se obtiene la ecuación de Tafel, una relación logarítmica lineal entre la corriente y el potencial aplicado (McCafferty, 2010).

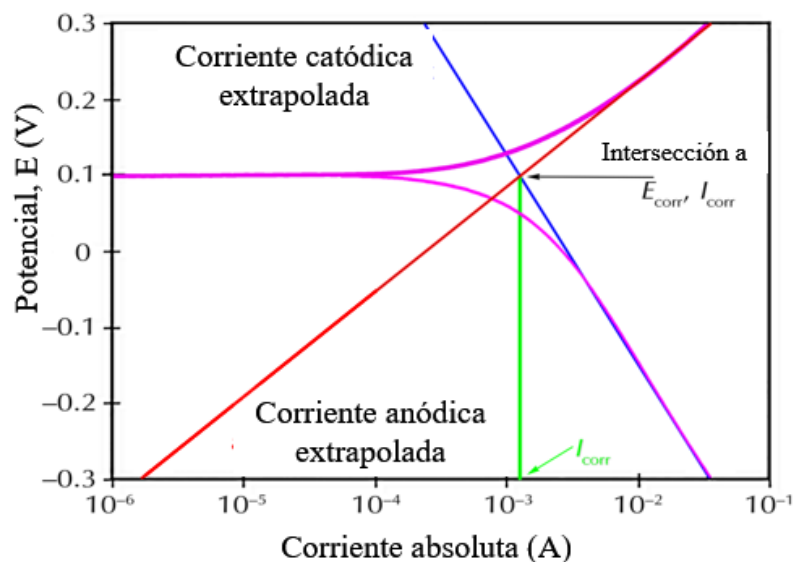
Al graficar el logaritmo de la corriente frente al potencial, se generan dos regiones lineales correspondientes a los procesos catódico y anódico. Estas líneas rectas son conocidas como líneas de Tafel y se caracterizan por sus pendientes denominadas pendientes de Tafel (β), las cuales contienen información relacionada con la cinética del proceso corrosivo. La extrapolación hacia el potencial de corrosión de ambas líneas Tafel permite identificar el punto de intersección, correspondiente a la densidad de corriente (I_{corr}), un parámetro fundamental para determinar cuantitativamente la velocidad de corrosión (Roberge, 2020).

La velocidad de corrosión es calculada a partir de la densidad de corriente de corrosión, aplicando una ecuación estándar que relaciona variables como la masa atómica, la densidad del metal y el número de electrones involucrados en la reacción corrosiva (Revie & Uhlig, 2011). Esta técnica presupone condiciones experimentales controladas, superficies metálicas homogéneas y ausencia de fenómenos de transporte masivo o difusión que pudiesen distorsionar las regiones lineales necesarias para la extrapolación (Jones, 2020).

En la figura 2 las pendientes de las curvas de polarización pueden obtenerse al trazar líneas tangentes sobre las porciones lineales de dichas curvas. El punto en el que estas líneas se interceptan corresponde, por extrapolación, al valor en el eje de corriente que representa la corriente de intercambio o, en términos prácticos para estudios de corrosión I_{corr} . (Valencia, 2020). En el eje vertical de la gráfica se representa el potencial eléctrico aplicado al electrodo de trabajo, con respecto a un electrodo de referencia. Este potencial se expresa generalmente en milivoltios y permite observar cómo responde el sistema electroquímico frente a diferentes condiciones de energía eléctrica. La parte superior del eje se identifica como la zona pasiva, y la inferior como la zona activa, indicando los extremos de comportamiento del metal: desde la pasividad inducida por películas protectoras hasta la disolución activa por corrosión. El eje horizontal muestra la intensidad de corriente en escala logarítmica. Este eje indica la velocidad con la que se producen las reacciones electroquímicas.

Figura 2.

Curva característica de Tafel



Nota. Modificado de (Gamry Instruments, s.f.).

2.5. Acero API- N80Q

El acero utilizado comúnmente en las tuberías de producción y utilizado en esta investigación cumple con la especificación API 5CT grado N-80, subdividido en los tipos N80-1 y N80-Q. Ambos presentan la misma composición química como se reporta en la tabla 1 junto a sus propiedades mecánicas.

Tabla 1

Composición química y propiedades mecánicas del acero API N-80Q.

Características	Acero APIN-80Q	Unidad
Carbono (C)	0,28–0,32 (OD > 9 5/8"): 0,22–0,29)	%
Silicio (Si)	0,17–0,37	%
Manganeso (Mn)	1,30–1,45 (OD > 9 5/8"): 1,30–1,60)	%
Cromo (Cr)	Máx. 0,25	%
Níquel (Ni)	Máx. 0,20	%
Cobre (Cu)	Máx. 0,20	%
Vanadio (V)	0,07–0,12	%
Fosforo (P)	Máx. 0,025	%
Azufre (S)	Máx. 0,020	%
Resistencia a la fluencia	552–758	MPa
Resistencia mínima a la tracción	689	MPa

Nota. OD = diámetro externo (Outside Diameter), tomado de: (OCTALSTEEL, 2023).

2.5.1. Metalografía del acero API N-80Q

La caracterización metalográfica permite identificar la microestructura y las posibles heterogeneidades presentes en materiales metálicos, siendo una técnica esencial en estudios de corrosión. Para este análisis se siguen procedimientos establecidos en la norma ASTM E3-11

(2017), que especifica los métodos estándar de preparación de muestras metalográficas para observación microscópica.

En el caso del acero API N-80Q, la microestructura observada está compuesta principalmente por martensita fina dispuesta en listones, una característica típica de aceros templados utilizados en aplicaciones de alta resistencia. Además, se identificaron inclusiones no metálicas de tipo óxido globular (Tipo D), con una severidad de 1,5 en la serie fina y 0,5 en la serie gruesa, conforme a los criterios de evaluación de inclusión establecidos en normativas metalúrgicas.

2.6. Técnicas de caracterización post-corrosión

2.6.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM- Scanning Electron Microscopy)

La microscopía electrónica de barrido (SEM) es una técnica que permite analizar detalladamente la topografía, la estructura, la composición química y la cristalografía (incluyendo orientación y estructura de grano), así como observar fenómenos dinámicos asociados a reacciones térmicas o corrosivas (Mahajan & Mhaske, 2012). Aunque comúnmente se dice que genera una "imagen" de la muestra, en realidad lo que registra no son fotones como en la microscopía óptica, sino la respuesta del material al ser bombardeado por un haz de electrones de alta energía, conocidos como electrones primarios (Vilá et al., 2010).

Al incidir sobre la superficie de la muestra, estos electrones provocan la emisión de distintas señales, las cuales son captadas por detectores específicos. Cada tipo de señal proporciona información diferente: desde la morfología superficial hasta la composición química o la conductividad eléctrica del material (Mahajan & Mhaske, 2012).

Para construir la imagen, el haz de electrones se desplaza sistemáticamente sobre un área definida mediante sistemas ópticos, permitiendo así un escaneo preciso de la superficie. Gracias a

esta técnica, se pueden alcanzar niveles de resolución extremadamente altos, con capacidad para distinguir detalles tan pequeños como 2 nanómetros, lo que la convierte en una herramienta esencial para estudios avanzados en ciencia de materiales (Vilá et al., 2010).

2.6.2. Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica poderosa y no invasiva que permite identificar materiales cristalinos, como los productos de corrosión en metales, basándose en la ley de Bragg (Bragg William Henry & Bragg William Lawrence, 1913). Cada material cristalino genera un difractograma único, que facilita su reconocimiento.

3. Revisión de antecedentes

La corrosión de tuberías y equipos en la industria de hidrocarburos representa un desafío crítico, especialmente cuando se aplican tecnologías de recuperación mejorada de petróleo. En estos procesos, el desplazamiento de crudo mediante agua u otros fluidos de inyección genera un efluente acuoso completo, cuyas condiciones operacionales son determinantes en la corrosión del material. El acero API N-80Q, ampliamente utilizado en tuberías y componentes de producción, presenta una sensibilidad particular ante los factores del medio, siendo la temperatura uno de los más influyentes.

La temperatura actúa como un acelerador de reacciones electroquímicas, afectando directamente la cinética de los procesos de corrosión. A medida que aumenta la temperatura, se incrementa la conductividad del medio, se reduce la viscosidad de los fluidos y se favorece la disolución de especies agresivas como cloruros o dióxido de carbono, lo cual intensifica el ataque del material. En entornos reales de yacimiento, donde las temperaturas pueden superar los 60°C, estas condiciones generan escenarios de corrosión acelerada, tanto uniforme como localizada.

La literatura también señala que, en comparación con otros aceros, el API N-80Q muestra una menor estabilidad térmica frente a medios corrosivos ricos en cloruros. Figueredo-Amaya et al. (2013) reportaron que este acero presentó mayores densidades de corriente de corrosión en ensayos electroquímicos realizados en presencia de CO₂ y cloruros a temperaturas superiores a 60°C, en comparación con otros aceros. Del mismo modo, Peña Saavedra y Quintero Ballena (2024) confirmaron mediante pruebas en laboratorio que el aumento de temperatura intensifica la desestabilización del sistema metal-solución, lo que se refleja en un incremento significativo de la velocidad de corrosión.

En investigaciones recientes se han realizado estudios tanto en laboratorio como en campo, orientados a la evaluación directa del comportamiento del acero API N-80Q bajo condiciones representativas de operación. Ensayos gravimétricos, técnicas electroquímicas, así como caracterización microestructural post-exposición, han permitido entender los mecanismos de ataque y su relación con variables como la temperatura, la presión y la formulación del fluido.

El efecto de la temperatura no solo impacta la velocidad de corrosión, sino también las morfologías del daño generado. A temperaturas elevadas, es más común la formación de ataques tipo picadura o intergranular, que resultan ser más peligrosos que la corrosión uniforme debido a su naturaleza y difícil detección.

Si bien otros factores como la composición química del agua de efluente, la presencia de microorganismos o el tipo de surfactante pueden también influir en la corrosividad del material, la temperatura sigue siendo uno de los factores con mayor impacto. Por esta razón, su estudio detallado resulta fundamental en la caracterización del comportamiento del acero bajo condiciones representativa de yacimiento.

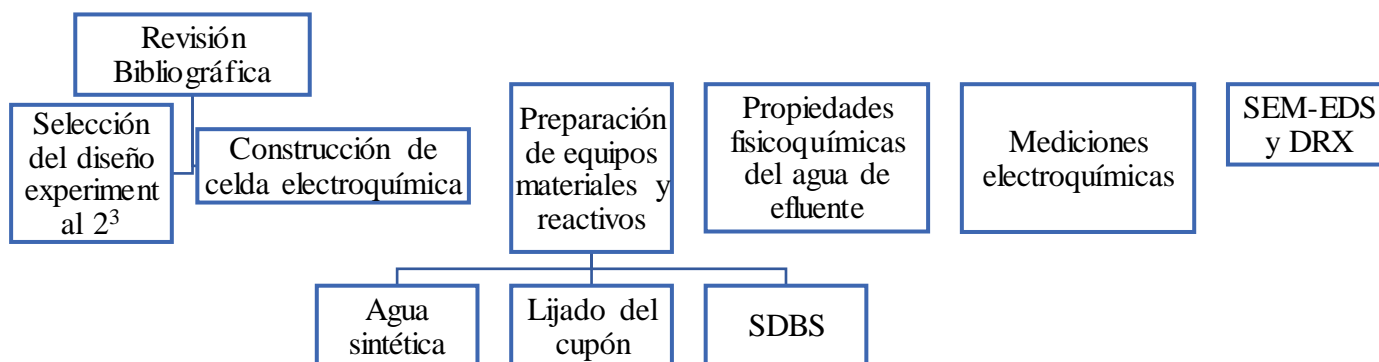
En resumen, los hallazgos recientes evidencian que la corrosividad del medio está fuertemente influenciada por factores como la presión, temperatura, tipo de surfactante y la composición química del agua de efluente. El acero API N-80Q, es especialmente vulnerable a la acción combinada de cloruros, ácidos orgánicos y surfactantes, que intensifican el contacto de la fase acuosa con la superficie metálica. En este contexto, el uso de inhibidores de corrosión se perfila como una estrategia crucial para preservar la integridad de los sistemas, siendo cada vez más común la evaluación de su eficiencia en entornos representativos de RMP.

4. Metodología

En la figura 3 se presenta el diagrama experimental propuesto para el desarrollo de la investigación.

Figura 3.

Diagrama Experimental



La metodología se diseñó con un enfoque experimental-aplicado para determinar la corrosividad de aguas de efluentes provenientes del desplazamiento de crudo con surfactante (SDBS) sobre el acero API N-80Q. Se empleó un diseño factorial completo 2^3 , considerando tres variables independientes.

- Tipo de agua: (A.P. y A.S).
- Temperatura: 25°C (ambiente) y 65°C (yacimiento).
- Concentración de SDBS: 0 ppm y 1000 ppm

La respuesta principal es la velocidad de corrosión, determinada mediante técnicas electroquímicas. La metodología se articuló en tres fases iniciando desde la determinación de las propiedades fisicoquímicas del agua de efluente utilizada en la investigación, cómo fase 2 la evaluación del efecto de la composición de las aguas de efluente sobre la tasa de corrosión del acero API N-80, utilizando técnicas electroquímicas y como fase 3 el análisis de la relación entre

la reactividad del agua de efluente sobre los productos de corrosión formados en el acero API N-80 y los mecanismos involucrados, mediante (SEM-EDS).

4.1. Reactivos, materiales y equipos utilizados

En esta sección se presentan detalladamente los reactivos, materiales y equipos empleados durante el desarrollo experimental de la investigación. La selección y preparación de estos componentes resultan fundamentales para garantizar validez, reproducibilidad y precisión de los resultados obtenidos.

4.1.1. Reactivos

- Agua sintética preparada en laboratorio: Se preparó como medio de referencia o blanco para establecer una comparación en las pruebas de polarización anódica frente al agua de producción. Para ello, se midió exactamente 0,5020 g de NaCl en una balanza analítica, posteriormente fueron aforados en un matraz volumétrico de 500 mL con agua destilada, esta composición puede variar según el volumen que se requiera preparar.

- Agua de producción: El electrolito empleado para las pruebas electroquímicas fue agua de producción procedente del desplazamiento de crudo con surfactante en un yacimiento colombiano junto al agua sintética mencionada en la sección anterior como blanco. Estas aguas se caracterizaron mediante análisis fisicoquímicos (pH, conductividad, salinidad, sólidos disueltos totales y volátiles y contenido de grasas y aceites) siguiendo métodos analíticos estándar (Standard Methods – SM).

- Surfactante SDBS: Las soluciones con surfactante SDBS (1000 ppm) se midieron 0,5020 g de SDBS en una balanza analítica y se transfirieron a un matraz volumétrico de 500 mL; a continuación, se añadió una pequeña porción de agua de producción (o sintética) para disolver completamente el SDBS, se completó el volumen hasta la línea de aforo con más agua del mismo

tipo y, finalmente, la solución resultante se agita durante 5 min a temperatura ambiente para asegurar una disolución homogénea.

4.1.2. Equipos

En la figura 4 se puede observar el montaje de la celda electroquímica con el cupón y los respectivos electrodos conectados al potenciostato y el baño circulador que se utilizó mediante las mediciones electroquímicas.

Figura 4.

Celda electroquímica conectada a potenciostato y baño circulador



Tabla 2.

Equipos

Ítem	Modelo / Detalle
Electrodo de referencia	Ag/AgCl (Gamry)
Contraelectrodo	Platino (Pt).
Termómetro	-
Potenciostato	EmStat 4S (H.R) PalmSens.

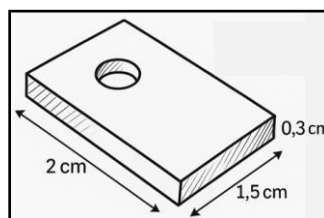
Software	PSTrace 5.11
Celda electroquímica	3 niveles en bloques de teflón
Baño / Circulador	Polystat CC1
Baño ultrasónico	Elma ultrasonic LC 30H
SEM	QUANTA FEG 650
EDS	EDAX APOLO X

4.1.3. Preparación del material

Los cupones de acero fueron sometidos a un proceso de desgaste mecánico progresivo, se inició con papel abrasivo de carburo de silicio (lija) N° 120, 400, 600, asegurando una superficie uniforme. Posteriormente, fueron sumergidos en acetona y sometidos a un baño ultrasónico durante 5 minutos para eliminar impurezas. Finalmente, se dejaron secar a temperatura ambiente para ser ensamblados en la celda electroquímica. La figura 4 muestra las dimensiones y la forma del cupón utilizado en los ensayos.

Figura 5.

Cupón de acero API N-80Q.



4.2. Fase 1. Propiedades fisicoquímicas del agua de efluente obtenida en el desplazamiento de crudo con surfactante.

La información obtenida tras la caracterización fisicoquímica del agua de efluente obtenida tras el desplazamiento de crudo con surfactante fue proporcionada por el Grupo de Investigación en Corrosión (GIC).

El estudio incluyó la caracterización básica del agua de inyección abarcando parámetros como pH, conductividad eléctrica, dureza, cloruros, sólidos totales disueltos (TDS), sólidos totales volátiles (VTS) y alcalinidad. De igual forma, se realizó una caracterización completa de las muestras de efluente, que incluyó análisis de metales traza mediante espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) y la determinación de la composición iónica (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , entre otros).

4.3. Fase 2. Evaluar el efecto de la composición de las aguas de efluente sobre la tasa de corrosión del acero APIN-80, utilizando técnicas electroquímicas.

4.3.1. Construcción de la celda.

Para llevar a cabo los ensayos electroquímicos, se diseñó y construyó una celda electroquímica adaptada específicamente a las condiciones requeridas en esta investigación. La celda, de configuración multinivel, fue ensamblada mediante bloques aislantes de teflón, unidos por cuatro tornillos de 20,5 cm de longitud ubicados en las esquinas. Estos tornillos permiten ajustar firmemente los niveles mediante tuercas y arandelas en la parte superior, facilitando la instalación precisa del electrodo de referencia (Ag/AgCl), el contraelectrodo (Platino) y un termómetro.

El nivel inferior de la celda dispone de una rosca interna de 1cm de diámetro, que permite acoplar fácilmente el cupón metálico objeto de estudio (Acero API N-80Q). Sobre esta base se instala el segundo nivel, que consiste en un cilindro acrílico de 8 cm de altura 4 cm de diámetro, herméticamente sellado en ambos extremos mediante empaques, formando el depósito del electrolito.

La parte superior está compuesta por una tapa también fabricada en acrílico, equipada con un serpentín metálico que permite la circulación constante de agua proveniente de un

baño/circulador, asegurando así que la solución mantenga una temperatura estable durante las pruebas simulando condiciones de yacimiento. Esta tapa posee tres orificios calibrados para alojar con precisión el electrodo de referencia, el contraelectrodo y el termómetro

Finalmente, la celda está conectada mediante los electrodos a un potenciostato modelo EMSTAT 4S (H.R)®, equipo que permite la ejecución de las mediciones electroquímicas necesarias para evaluar la corrosividad del medio sobre el acero API N-80Q.

4.3.2. Mediciones electroquímicas

Una vez ensamblada la celda electroquímica con todos los equipos y materiales previamente preparados, se procedió a estabilizar la temperatura del sistema en las pruebas que requerían el uso del baño circulador. A continuación, se realizaron las mediciones electroquímicas correspondientes a cada una de las condiciones establecidas en el diseño experimental.

En primer lugar, se registró el potencial de corrosión (E_{corr}) de cada muestra durante 15 a 17 minutos aproximadamente empleando el potenciostato EMSTAT 4S (H.R) y el software PSTrace 5.11. Durante esta etapa se buscó observar el comportamiento de la estabilización del potencial de circuito abierto del acero API N-80Q en contacto con cada tipo de agua y concentración de surfactante tanto a temperatura ambiente como a temperatura de yacimiento.

Posteriormente se llevó a cabo el ensayo de polarización anódica, aplicando un barrido de potencial desde -0,25V hasta 0,25V con un incremento de 0,01V, a una velocidad de barrido o (scan rate) de 0,00016 V/s. Se estableció un tiempo de estabilización inicial de 1200 segundos. Las pruebas de polarización anódica tardaron aproximadamente 1 hora y 14 minutos.

Una vez finalizadas las mediciones electroquímicas, los cupones fueron cuidadosamente retirados de la celda, enjuagados con agua destilada y secados al ambiente. Posteriormente se envolvieron en papel limpio y se almacenaron en bolsas herméticas con cierre tipo ziploc, con el

fin de evitar la contaminación o alteración superficial. Se preservaron en un ambiente seco y controlado dentro de un cuarto de almacenamiento, hasta su análisis posterior mediante SEM-EDS.

A partir de las curvas de polarización anódica obtenidas, se realizó el análisis mediante extrapolación de Tafel, seleccionando $\pm 250\text{mV}$ respecto a E_{corr} . En este intervalo se ajustaron las ramas anódica y catódica para determinar la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}). Las gráficas obtenidas se encuentran anexadas al final del documento. Esta magnitud fue empleada para calcular la velocidad de corrosión en milésimas de pulgada por año (mpy) siguiendo la metodología descrita en la norma ASTM G102 (2023). Practica estándar para el cálculo de tasas de corrosión e información relacionada a partir de mediciones electroquímicas) la cual indica:

$$CR = \frac{K * I_{\text{corr}} * EW}{\rho} \text{ (Ecuación 1). Donde:}$$

$$K = 0,1288$$

$$I_{\text{corr}} = (\text{Valor obtenido mediante pendientes de Tafel en } \mu\text{A}/\text{cm}^2)$$

$$EW = 55,84$$

$$\rho = 7,87 \text{ g}/\text{cm}^3$$

Posteriormente, las velocidades de corrosión obtenidas fueron exportadas a Statgraphics Centurion, donde se aplicó un análisis factorial completo (2^3) con el fin de determinar la significancia de los factores estudiados (tipo de agua, temperatura y concentración de surfactante y sus interacciones).

4.4. Fase 3. Análisis de la relación entre la reactividad del agua de efluente sobre los productos de corrosión formados en el acero API N-80Q y los mecanismos involucrados, mediante SEM-EDS y DRX.

Con el objetivo de analizar la relación entre la reactividad del agua de efluente y los productos de corrosión formados en el acero API N-80Q, se llevó a cabo un estudio morfológico utilizando SEM-EDS y DRX. Este análisis permitió identificar las características superficiales y los elementos químicos presentes en los cupones tras su exposición en las pruebas electroquímicas.

Fueron analizados nueve cupones en total: ocho expuestos a cada una de las combinaciones del diseño experimental (según tipo de agua, temperatura y concentración de SDBS), y un cupón blanco no expuesto, empleado como referencia para comparar cambios morfológicos y composicionales inducidos por los ambientes corrosivos.

La preparación de las muestras, así como el montaje sobre los *stubs* metálicos, para la elaboración del SEM-EDS fue realizada por el docente Carlos Alberto Villareal, responsable del manejo del microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FEG) modelo QUANTA FEG 650, operando bajo condiciones de alto vacío. Las imágenes se obtuvieron con un voltaje de aceleración de 20Kv, utilizando los detectores:

- Electrones secundarios (SE): Everhart-Thornley Detector (ETD), para evaluar la topografía superficial.
- Electrones retrodispersados (BSE): Backscattered Electron Detector (BSED) tipo SSD, para obtener contraste composicional.

Para el análisis químico por EDS, se utilizó el detector EDAX APOLO X, con una resolución de 126,1 eV (en Mn $K\alpha$) bajo un voltaje de aceleración de 20Kv. La adquisición y

procesamiento de los espectros fue realizada mediante el software EDX Genesis, el cual permitió obtener información semicuantitativa de los elementos presentes en la superficie de los cupones.

Para el análisis por DRX, se empleó un difractómetro de polvos marca Bruker modelo D8 ADVANCE, con geometría DaVinci, bajo las condiciones de registro presentadas en la tabla 3. Los difractogramas obtenidos se procesaron con el software especializado DIFFRAC.EVA, mediante el cual se realizó la identificación de fases cristalinas con el apoyo en la base de datos ICDD PDF-2-2021.

Tabla 3.

Condiciones de registro DRX

Condiciones de registro	
Voltaje (kV)	40
Corriente (mA)	40
Rendija de Divergencia (mm)	0,6
Rendijas Soller primario (°)	2,5
Rendijas Soller Secundario (°)	2,5
Tamaño de paso (°2Theta)	0,02
Tiempo por paso (s)	0,35
Rango de registro (°2Theta)	1,2
Radiación	30,0 a 100,0
Filtro	CuK α 1
Uso de anti-dispersor de aire	Níquel
Detector	Lineal LynxEye

Tipo de barrido	A pasos
Observaciones	Ninguna

5. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

5.1. Fase 1. Propiedades fisicoquímicas del agua de efluente obtenida en el desplazamiento de crudo con surfactante.

A continuación, se presentan las tablas 4,5 y 6 con los resultados correspondientes a las propiedades fisicoquímicas del agua de efluente obtenida en el desplazamiento de crudo con surfactante.

Tabla 4.

Composición iónica del agua de formación del campo Quifa.

Composición Iónica	Cationes		Aniones		Salinidad
	Na ⁺ y K ⁺	Ca ⁺²	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	
Concentración (mg/L)	327,4	6,9	180	525	<u>1039,3</u>

Tabla 5.

Caracterización completa de fluidos

Análisis	Unidades	Resultados
Acidez Total	mg CaCO ₃ /L	12,3 pH = 8,20
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	515,26 pH = 4,493
Alcalinidad Fenol	mg CaCO ₃ /L	<12,36 pH = 8,058
Cloruro	mg Cl ⁻ /L	151,5
Conductividad eléctrica	μS/cm	1426,9
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	21,881

Dureza Cálcica	mg CaCO ³ /L	15,811
Dureza Magnésica	mg CaCO ³ /L	6,07
Sulfato	mg SO ₄ ²⁻ /L	6,78
Nitrato	mg N-NO ³ /L	1,558
Sólidos Disueltos Totales	mg SDT/L	773
Sólidos Suspendidos Totales	mg SST/L	<13,4
Sólidos Totales Volátiles	mg STV/L	134
Sólidos Totales	mg ST/L	828
Grasas y/o Aceites	mg GyA/L	<6,3
pH	Unidades de pH	8,09
Turbiedad	NTU	1,6

Tabla 6.

Caracterización de fluidos - metales.

Análisis	Unidades	Resultados
Calcio	mg Ca/L	6,332
Hierro	mg Fe/L	<0,413
Magnesio	mg Mg/L	1,474
Potasio	mg k/L	8,839
Sodio	mg Na/L	332,87
Aluminio	mg Al/L	0,1079
Boro	mg B/L	0,647
Bario	mg Ba/L	0,1992
Bismuto	mg Bi/L	<0,001
Cadmio	mg Cd/L	<0,0076
Cobalto	mg Co/L	<0,0056
Cobre	mg Cu/L	<0,0067
Cromo Total	mg Cr/L	0,0079
Estroncio	mg Sr/L	0,2378

Galio	mg Ga/L	<0,01
Indio	mg In/L	<0,01
Litio	mg Li/L	0,1379
Manganeso	mg Mg/L	0,077
Níquel	mg Ni/L	<0,0079
Plata	mg Ag/L	<0,0151
Plomo	mg Pb/L	5,9279
Talio	mg Tl/L	<0,0075
Zinc	mg Zn/L	0,0299

Nota: Las muestras analizadas presentan una composición de metales similar, mostrando una mayor presencia de elementos como Calcio, Potasio, Aluminio, Boro, Bario y Estroncio.

El análisis indica un medio ligeramente alcalino (pH~8,1), con una alcalinidad total (515,26 mgCaCO₃/L) y baja dureza (21,88 mg CaCO₃/L), en la que predomina el calcio (6,33 mg/L) y magnesio (1,47 mg/L). Según Fontana, M. G. (2007). Las aguas de baja dureza pueden reducir la capacidad del agua a formar capas protectoras por lo tanto puede favorecer procesos de corrosión generalizada o localizada.

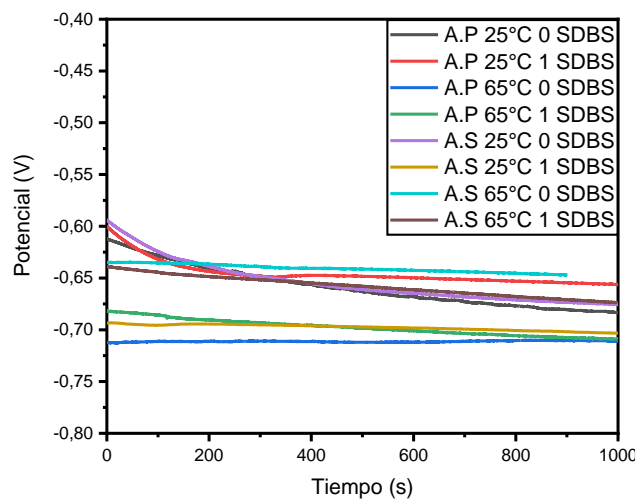
En conjunto, las condiciones fisicoquímicas observadas, especialmente la relación entre cloruros, dureza y contenido iónico permiten anticipar un comportamiento químicamente agresivo hacia materiales metálicos.

5.2. Resultados Fase 2. Evaluar el efecto de la composición de las aguas de efluente sobre la velocidad de corrosión del acero API N-80, utilizando técnicas electroquímicas.

La figura 5 resume el potencial de corrosión de cada prueba del diseño experimental realizado previamente a las pruebas de polarización anódica.

Figura 6.

Potencial de corrosión.

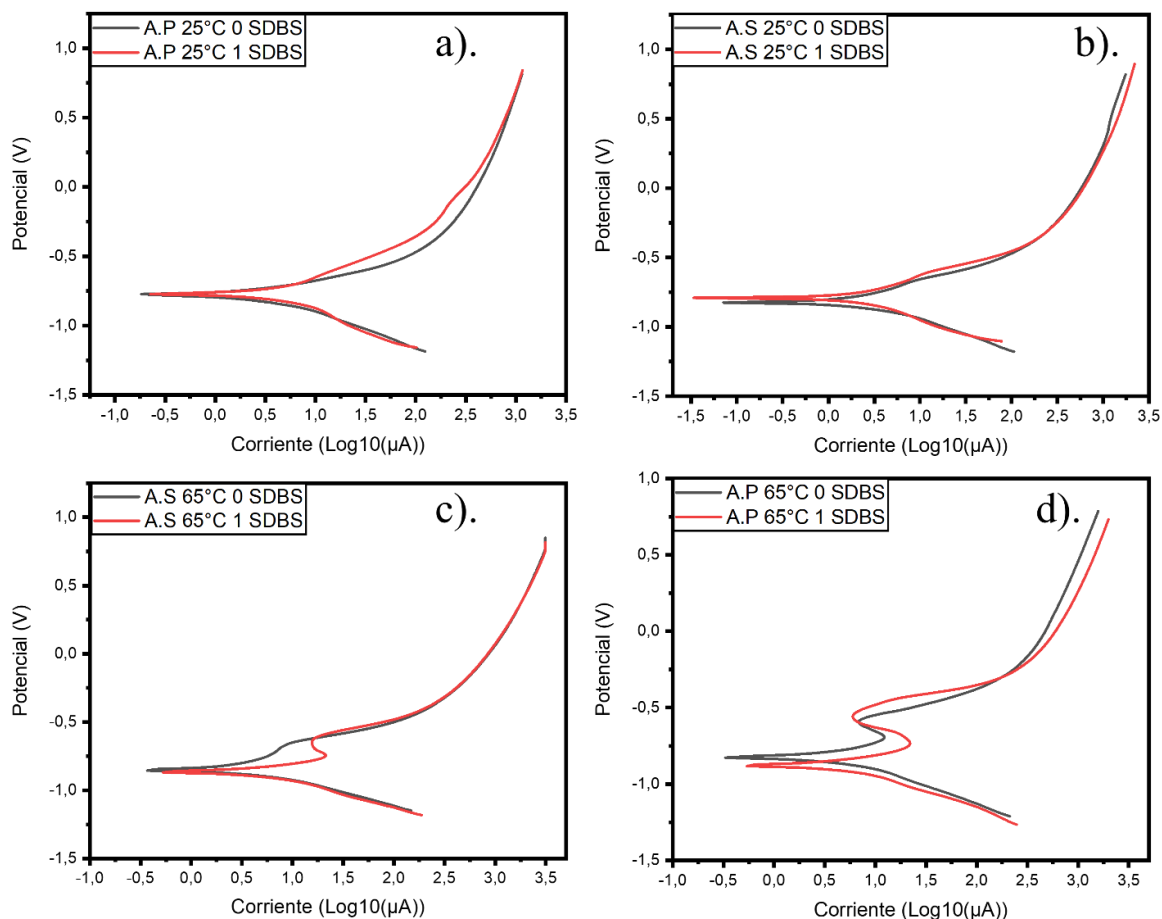


Desde el punto de vista termodinámico, la muestra de agua de producción a 65°C sin SDBS (A.P 65°C 0 SDBS) mostró más tendencia corrosiva con respecto al acero API N-80Q. Entre tanto, la muestra de agua sintética a 65°C sin SDBS (A.S 65°C 0 SDBS) tiene menos tendencia a ser corrosiva debido a que su potencial es más noble con respecto a los demás.

Las figuras de las pruebas electroquímicas se elaboraron haciendo uso de software *de uso libre* una vez obtenidos los valores en el potenciostato.

Figura 7.

Curvas de polarización anódica para las pruebas según diseño experimental.



Nota: Las curvas de polarización anódica corresponden a: a) Agua de producción a 25°C (0 y 1000ppm de SDBS), b) Agua sintética a 25°C (0 y 1000ppm de SDBS), c) Agua sintética a 65°C (0 y 1000ppm de SDBS), d) Agua de producción a 65°C (0 y 1000ppm de SDBS).

Desde el punto de vista cinético todos los gráficos mostraron transferencia de carga y ninguno mostró tendencia a la pasivación en la zona anódica.

A continuación, en la tabla 7, se presenta la velocidad de corrosión (CR) de las pruebas, incluyendo las condiciones de cada experimento calculadas a partir de la extrapolación de Tafel.

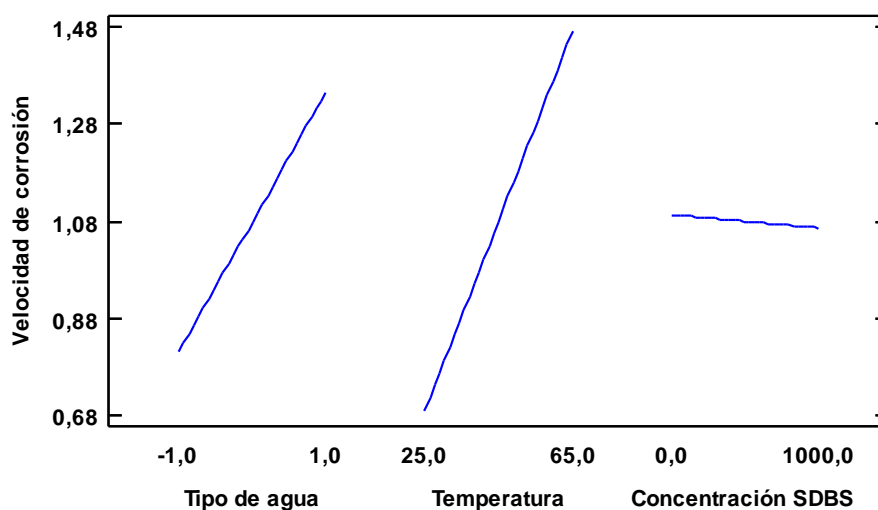
Tabla 7.*Velocidad de corrosión de cada experimento.*

Tipo de agua	Temperatura (°C)	Concentración de surfactante (ppm)	Velocidad de corrosión CR (mpy)	Clasificación según NACE SP0775-2013
Agua producción	25	0	0,697	Baja
Agua producción	25	1000	0,396	Baja
Agua producción	65	0	0,768	Baja
Agua producción	65	1000	0,516	Baja
Agua sintética	25	0	0,441	Baja
Agua sintética	25	1000	0,450	Baja
Agua sintética	65	0	1,369	Moderada
Agua sintética	65	1000	1,458	Moderada

Los resultados obtenidos muestran que la velocidad de corrosión del acero API N-80Q varía principalmente con la temperatura y el tipo de agua empleada. En general las velocidades se clasificaron según NACE SP0775-2013 como bajas a moderadas, siendo más elevadas en las pruebas con agua sintética a 65°C, donde alcanzaron valores cercanos a 1,4 mpy.

Figura 8.

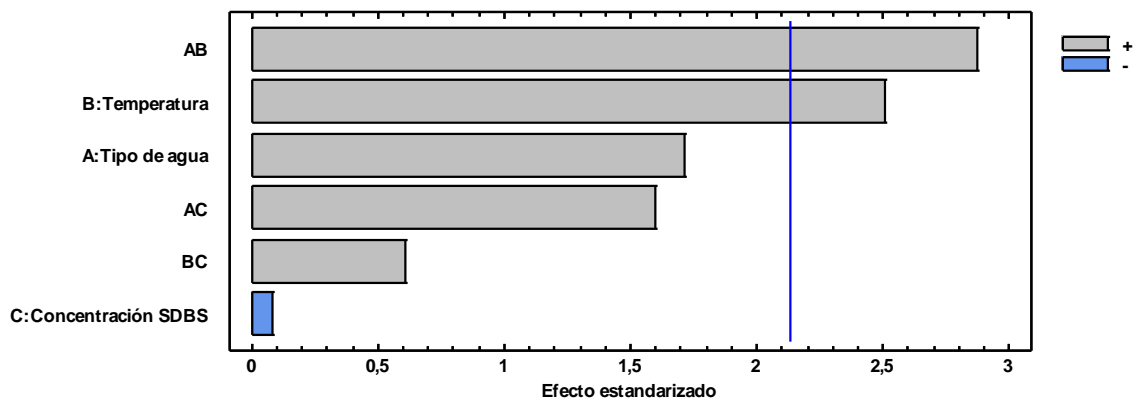
Efectos principales para velocidad de corrosión.



La figura 9 presenta el diagrama de Pareto estandarizado en el que se evidencia que la interacción tipo de agua-temperatura es el factor más significativo sobre la corrosión, seguido por la temperatura. En contraste, la concentración de surfactante SDBS presentó un efecto menos marcado, lo que indica que su influencia depende de las condiciones térmicas y de la composición iónica del medio

Figura 9.

Diagrama de Pareto Estandarizado para Velocidad de Corrosión



Estos resultados confirman que el incremento de la temperatura intensifica los procesos corrosivos, mientras que la presencia de surfactante utilizado tiene un efecto reducido en la respuesta de las variables.

5.3. Resultados Fase 3. Análisis de la relación entre la reactividad del agua de efluente sobre los productos de corrosión formados en el acero API N-80Q y los mecanismos involucrados, mediante SEM-EDS y DRX.

El Análisis de la relación entre la reactividad del agua de efluente sobre los productos de corrosión formados en el acero API N-80Q y los mecanismos involucrados, mediante SEM-EDS se presentan a continuación.

De acuerdo a las micrografías obtenidas se observa la formación de capas de óxidos bajo todas las condiciones de experimentación. También se observa la formación de picado debido posiblemente a los contenidos de cloruros, sulfatos, nitratos y a la dureza del agua de efluente.

Figura 10.

SEM-EDS Acero API N-80Q Blanco

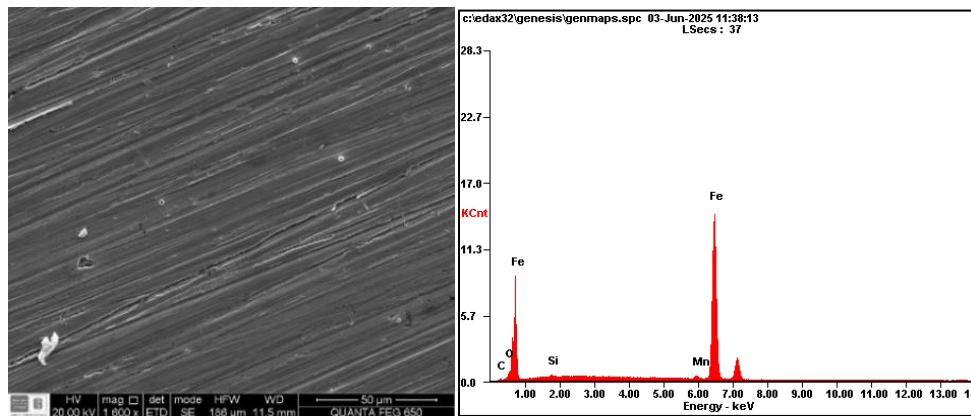


Tabla 8.

EDS Acero API N-80 Blanco

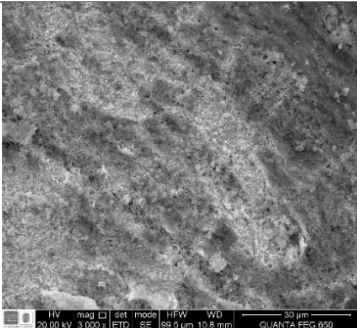
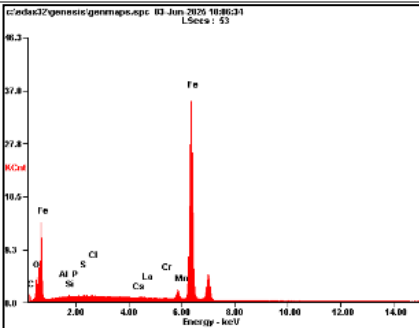
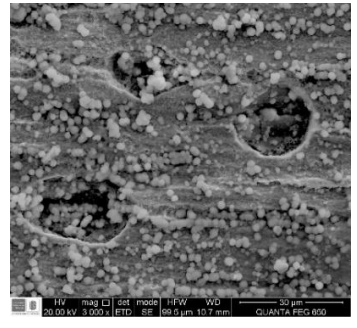
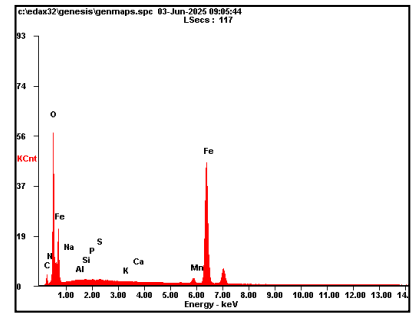
Elemento	% Peso	% Atómico
<i>FeK</i>	95.27	87.83
<i>OK</i>	01.60	05.16
<i>MnK</i>	01.61	01.51

<i>CK</i>	01.11	04.75
-----------	-------	-------

Nota: Superficie lisa con marcas de pulido; composición dominada por Hierro, sin evidencias de corrosión

Tabla 9.

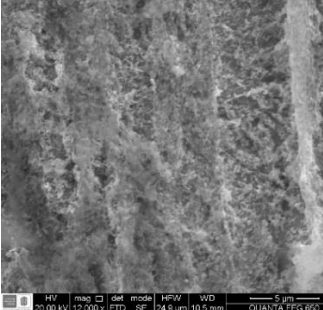
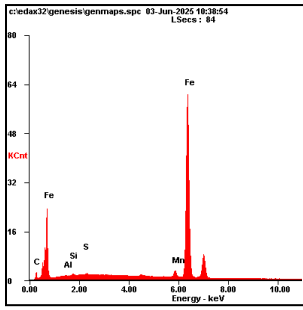
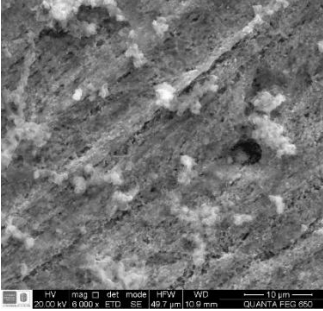
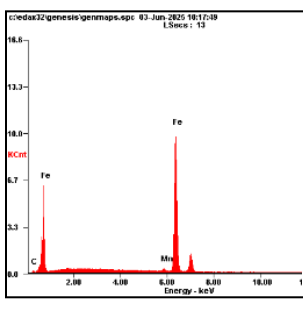
Efecto de la temperatura en las muestras de agua de producción sin surfactante.

Prueba	Imagen SEM	Imagen EDS	Elemento	%Peso	% Atómico
A.P.0 ppm SDBS 25°C			<i>FeK</i>	87.24	71.53
			<i>CK</i>	03.34	12.72
			<i>OK</i>	03.45	09.87
			<i>MnK</i>	03.44	02.87
			<i>SiK</i>	00.48	00.78
A.P.0 ppm SDBS 65°C			<i>FeK</i>	66.30	36.24
			<i>CK</i>	05.08	12.91
			<i>OK</i>	24.45	46.66
			<i>MnK</i>	02.48	01.38
			<i>SiK</i>	00.18	00.19

El agua de producción a temperatura ambiente muestra una superficie uniforme, con predominancia de Hierro (87,4%Wt) y la prueba con aumento de temperatura muestra una superficie con presencia de depósitos y cavidades, así como también una disminución notable de Hierro (66Wt%) indicando formación de óxidos.

Tabla 10.

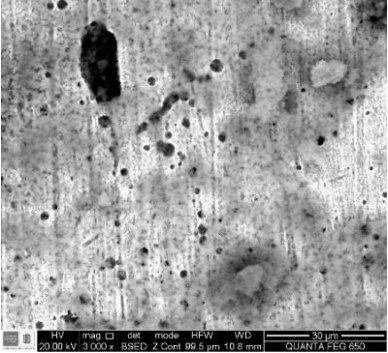
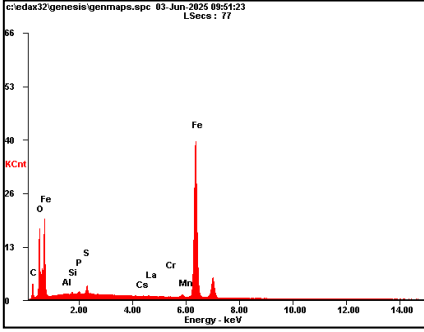
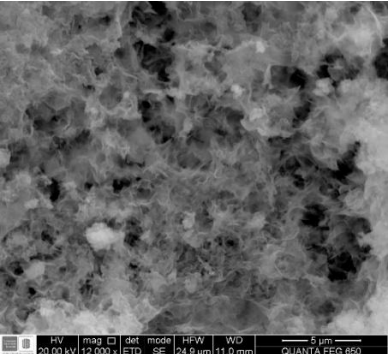
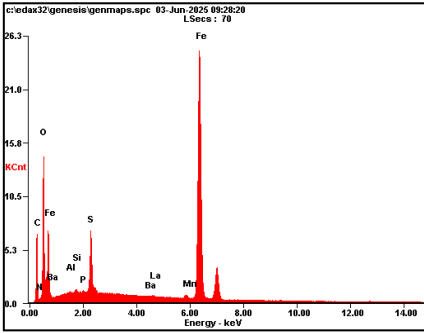
Efecto de la temperatura en las muestras de agua sintética sin surfactante.

Prueba	Imagen SEM	Imagen EDS	Elemento	% Peso	% Atómico
A.S. 0 ppm SDBS, 25°C			<i>FeK</i> <i>CK</i> <i>MnK</i>	91.69 04.16 02.98	78.83 16.63 02.60
A.S. 0 ppm SDBS, 65°C			<i>FeK</i> <i>MnK</i> <i>CK</i>	97.16 01.70 01.14	93.25 01.65 05.09

El agua sintética a temperatura ambiente muestra una superficie con surcos y líneas, su elemento primario es el Hierro (91%Wt) con baja interacción corrosiva, en la prueba del aumento de la temperatura también aumento el contenido de Hierro, se redujo el C y Mn indicando desprendimiento de depósitos.

Tabla 11.

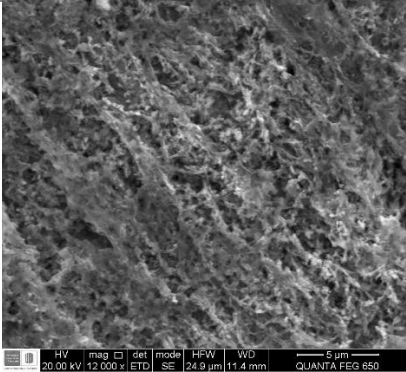
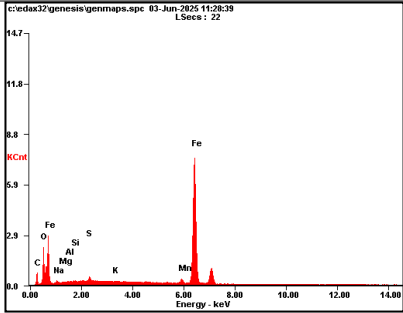
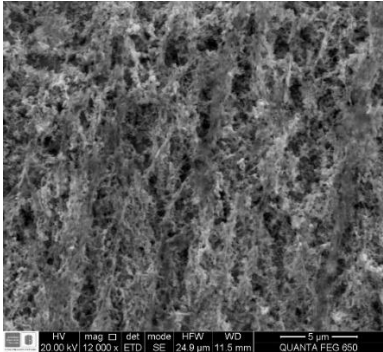
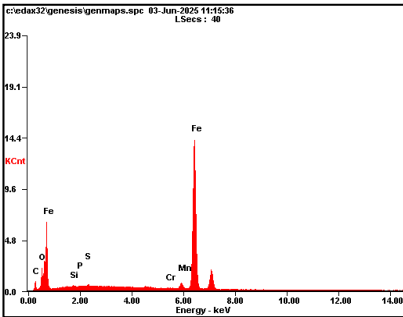
Efecto de 1000 ppm de surfactante en las muestras de agua de producción a 25°C y 65°C.

Prueba	Imagen SEM	Imagen EDS	Elemento	%	%
				Peso	Atómico
A.P 1000 ppm SDBS 25 25°C			<i>FeK</i>	87.24	71.53
			<i>CK</i>	03.34	12.72
			<i>OK</i>	03.45	09.87
			<i>MnK</i>	03.44	02.87
			<i>SiK</i>	00.48	00.78
A.P 1000 ppm SDBS, 65°C			<i>FeK</i>	66.30	36.24
			<i>CK</i>	05.08	12.91
			<i>OK</i>	24.45	46.66
			<i>MnK</i>	02.48	01.38
			<i>SiK</i>	00.18	00.19

El agua de producción con 1000 ppm de SDBS, a 25°C se observa una superficie con depósitos heterogéneos, indica presencia de compuestos orgánicos y óxidos superficiales. Al aumentar la temperatura a 65°C, se intensifica la corrosión, con una mayor reducción del Hierro en superficie y aumento significativo de oxígeno, sugiriendo una oxidación más agresiva.

Tabla 12.

Efecto de 1000 ppm de surfactante en las muestras de agua sintética a 25°C y 65°C.

Prueba	Imagen SEM	Imagen EDS	Elemento	%	%
				Peso	Atómico
A.S 1000 ppm SDBS 25 25°C			<i>FeK</i>	78.94	52.08
			<i>CK</i>	08.07	24.77
			<i>OK</i>	07.50	17.27
			<i>MnK</i>	02.49	01.67
			<i>NaK</i>	01.25	02.00
A.S 1000 ppm SDBS, 65°C			<i>FeK</i>	86.19	65.68
			<i>CK</i>	05.55	19.67
			<i>OK</i>	04.10	10.90
			<i>MnK</i>	03.11	02.41
			<i>SiK</i>	00.26	00.39

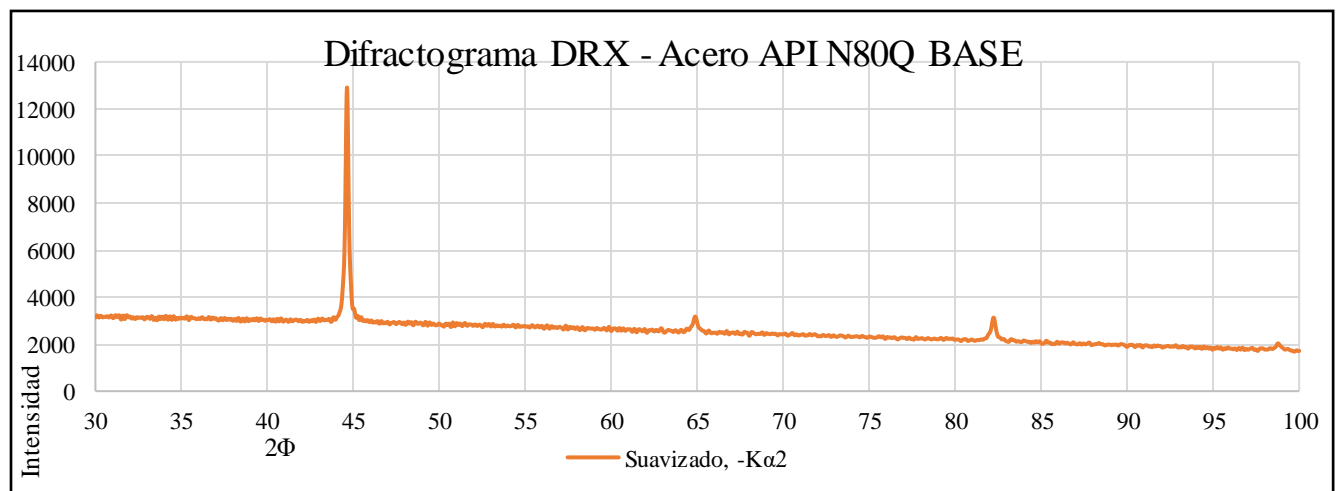
El agua sintética con 1000 ppm de SDBS a 25°C la superficie muestra depósitos irregulares con mayor contenido de C y O, asociados a la formación de productos de corrosión. A 65°C se observa una superficie más limpia con predominio de Hierro, acompañado de una disminución de O y C, lo que sugiere menor acumulación de compuestos orgánicos.

Con respecto a la influencia de la temperatura del agua sintética sobre acero API N-80Q, también se observa la formación de picaduras debido al contenido de cloruros.

La figura 11 corresponde al Difractograma de rayos X obtenido para una muestra de Acero API N-80Q sin haber sido expuesta a análisis electroquímicos ni a aguas de producción con surfactante. El análisis se realizó utilizando el software Diffrac.EVA, que empleó una búsqueda matemática con la base de datos PDF-2-2021 con el fin de identificar las fases cristalinas presentes.

Figura 11.

Difractograma DRX Acero API N-80Q



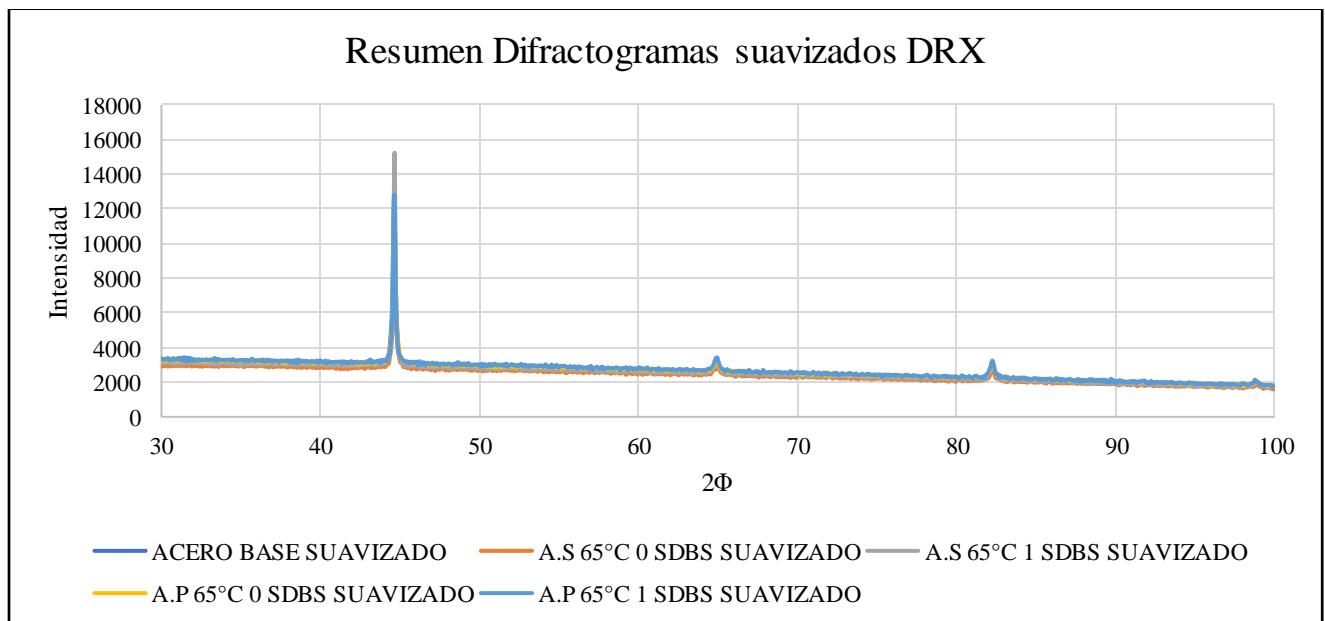
Se utilizó el software DIFFRAC.EVA en el cual se puede identificar mediante la herramienta 'Search/Math' los picos identificados provienen de Hierro sintético, y se observa principalmente en ángulos 2θ aproximados de $44,7^\circ$, 65° y $82,4^\circ$, alcanzando intensidades de hasta 17000 conteos. Estos indican que la fase principal del material es la ferrita (hierro alfa), típica de aceros al carbono como el API N-80Q, que presenta una microestructura de martensita.

En la figura 12 se puede apreciar los difractogramas del DRX para el acero API N-80Q en condición base y tras su exposición a aguas efluentes y sintéticas (A.P y A.S), a 65°C y en presencia y ausencia de surfactante SDBS, muestran que se mantiene los picos característicos de

la fase ferrítica del acero. Destaca el pico de mayor intensidad en $2\theta \approx 44^\circ$, correspondiente al plano cristalográfico (110) de la ferrita α -Fe, según la base de datos del International Centre for Diffraction Data (ICDD).

Figura 12.

Resumen Difractogramas DRX



Probar las aguas procedentes del desplazamiento de crudo con surfactante y sintéticas en contacto con el acero, sirvió para evidenciar como las condiciones reales de operación, particularmente la presencia de surfactante, los cloruros disueltos y la temperatura modifican de manera significativa la velocidad de corrosión y el mecanismo de corrosión.

6. Conclusiones

Se determinó que el agua de producción presenta una mayor complejidad química que el agua sintética, debido a la presencia de iones cloruro, bicarbonato, sulfato y trazas metálicas, las cuales incrementen su potencial corrosivo sobre el acero API N-80Q.

Se determinó mediante las mediciones de los ensayos electroquímicos que la temperatura es el factor principal que controla la corrosión del acero API N-80Q. Esto demuestra que el efecto del surfactante depende de la composición del agua, especialmente de su dureza y contenido de cloruros.

El agua de producción en contacto con SDBS presenta velocidades de corrosión bajas, garantizando la eficiencia del uso del surfactante a condiciones de operación.

Los análisis de SEM-EDS revelaron la formación de capas de óxidos en todas las condiciones, con un incremento en el contenido de oxígeno y reducción del hierro a medida que aumenta la agresividad del medio. Se observó corrosión localizada tipo picadura, atribuida principalmente a la acción de los cloruros y la sinergia con la temperatura y el surfactante.

El análisis DRX confirmó que la fase predominante del material sigue siguiendo ferrita (α -Fe), conservando los picos característicos del acero API N-80Q, aunque con señales adicionales asociadas a productos de corrosión como magnetita (Fe_3O_4) y hematita (Fe_2O_3).

7. Recomendaciones

Se recomienda profundizar en la interacción surfactante – agua: Antes de implementar surfactantes en procesos de recuperación mejorada o tratamiento de efluentes, evaluar su efecto en cada tipo de agua según su composición iónica y de uso operativo.

Adoptar monitoreo electroquímico avanzado y de caracterización periódica: Incorporar programas diagnóstico en línea mediante técnicas electroquímicas, junto con análisis de superficie SEM-EDS y DRX, permitiría detectar tempranamente productos de corrosión y mecanismos de daño.

Desarrollar materiales e inhibidores inteligentes adaptados a la temperatura, composición del agua y aditivos, apoyados en modelos predictivos y simulaciones que optimicen su selección y formulación según las condiciones reales de operación.

Referencias bibliográficas

Addison, W. (2002). *E. Optics*.

Andrés, J., Mattos, R., & Barcia, E. (2006). *Redalyc. Análisis de la evolución del potencial de circuito abierto del cobalto en medio levemente alcalino*.

Augusto, C., & Cruz, M. (2024). *UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS-UFAM FACULDADE DE TECNOLOGIA-FT PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA ALEXANDRE KENNEDY PINTO SOUZA PROJETO DE POTENCIOSTATO COM ESPELHO DE CORRENTE CMOS APLICADO A UMA CÉLULA ELETROQUÍMICA DE TRÊS ELETRODOS*.

Bard, A., & Faulkner, L. (2001). *electrochemical Methods: Fundamentals and Applications* (2nd ed.). Wiley.

Bragg William Henry, & Bragg William Lawrence. (1913). *The diffraction of X-rays by crystals*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rspa.1913.0040>

Buchanan, R. A., & Stansbury, E. E. (2012a). Electrochemical Corrosion. *Handbook of Environmental Degradation of Materials: Second Edition*, 87–125.
<https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3455-3.00004-3>

Buchanan, R. A., & Stansbury, E. E. (2012b). Electrochemical Corrosion. *Handbook of Environmental Degradation of Materials: Second Edition*, 87–125.
<https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3455-3.00004-3>

Echeverría, F., Peña, D., & Vásquez, C. (2003). *Measurement of electrode potential in oil in water emulsions*. <https://doi.org/https://doi.org/10.17533/udea.redin.327315>

- Fontana, M. G. (2007). *Corrosion engineering* (3^a ed.). *McGraw-Hill Education*.
(www.iranidata.com)
- Jones, D. A. (2020). *Principles and Prevention of Corrosion* (3rd ed.).
- Mahajan, L. H., & Mhaske, S. T. (2012). *Composite microspheres of poly(o-anisidine)/TiO₂, Materials Letters*.
- Mars G. Fontana. (1990). *Mars Fontana-Corrosion Engineering*. (www.iranidata.com)
- McCafferty, E. (2010). *Introduction to Corrosion Science*. *Springer-Verlag*.
- Philip A. Schweitzer. (2010). *CORROSION Fundamentals of Mechanisms, Causes, and Preventative Methods*.
- Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering*.
- Salazar Jimenez, A. (2015). *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)*.
- Salzar, S. (2014). *Polarización por Ondas Electromagnéticas*.
- Valencia, L. (2020). *DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL RECUBRIMIENTO ARC 855 POR TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS DE CORRIENTE DIRECTA*.
- Vilá, A., omerma, A., Trenado, J., Arbat, A., Gascon, D., Garrido, L., & Diáñez, A. (2010). *SEM/FIB for characterization of nanosized imagers, Procedia Engineerin. 5, 697–700*.

Apéndices

