

Análisis de los Cambios Morfológicos y Composicionales en el Acero al Carbono Sometido a
Condiciones de Producción de Energía Geotérmica.

Miguel Angel Rivero Sanabria, Andrea Lizeth Santamaría de la Ossa

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Adan Yovani León Bermúdez

Doctor en Ingeniería Química

Codirector

Zuly Himelda Calderón Carrillo

Doctora en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Dedico especialmente este logro a mi padre, Ernesto Rivero Velásquez, por su apoyo incondicional y por ser mi ejemplo de fortaleza, dedicación, resiliencia y perseverancia. Gracias por creer en mí siempre y por brindarme lo que estuvo a su alcance para llegar hasta aquí.

A la memoria de mi amada madre Mariela Sanabria Cruz, que siempre me brindó todo su amor, valores y tiempo. Aunque ya no estás físicamente, tu amor y tu fe en mí, siguen siendo mi mayor fuerza para seguir adelante. Gracias por ser la luz que ha guiado cada paso en mi vida. Este logro es para ti, con mi alma y todo mi corazón.

A mi querida novia, Angy Estefani Silva Lopez, que durante 7 años ha estado conmigo en los momentos llenos de alegría y ha sido mi hombro en momentos difíciles. Hemos compartido sonrisas, metas y también caídas, y eso hace que nuestro amor sea cada vez más fuerte.

A mi hermana, Diana Carolina Rivero Sanabria, su apoyo, amor y sabiduría han sido fundamentales en todo mi proceso. Gracias por creer en mí y por inspirarme a seguir mis sueños. Esta tesis es un reflejo de nuestras luchas y logros compartidos.

A mis sobrinos Dulce María Martínez Rivero y Carlos Mario Martínez Rivero, su energía y alegría iluminan mi vida. Siempre persigan sus sueños y nunca dejen de aprender. Recuerden que el esfuerzo, dedicación y responsabilidad siempre dan frutos. ¡los quiero mucho!

Miguel Angel Rivero Sanabria

Dedicatoria

Dedico con todo mi amor esta tesis a mis padres, por inculcarme valores y principios para la vida. A mi padre Reinaldo, por su esfuerzo, sabiduría, apoyo y los valiosos consejos brindados durante este proceso. A mi madre Rocio, por su amor incondicional, su amistad y su forma de hacerme los días mejores.

A mi hermano Reinaldo, quien ha sido testigo de mi proceso, por su compañía, sus consejos y amor. A mis hermanas, Xiomara y Yasbleidy, por ser mi apoyo y cómplices de risas.

A mis sobrinos, Thomas, Evelyn y Evangelin, por ser mi fuente de inspiración y motivación para seguir aprendiendo.

A mis abuelos, por su amor y buenos deseos en mi andar.

A toda mi familia, gracias por ser parte de mi vida y permitirme ser parte de su orgullo.

A mis amigos Manuel y Edgar, por su amistad y compañía, por hacerme sentir en casa y convertir mis días grises en soleados.

Andrea Lizeth Santamaría de la Ossa

Agradecimientos

Los autores de este libro expresan su agradecimiento a:

- La Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería de Petróleos.
- Nuestro director, el Dr. Adán Yovani León Bermúdez y a nuestra codirectora, la Dra. Zuly Himelda Calderón Carrillo.
- El Grupo de Investigaciones en Corrosión, por su acompañamiento en la realización de este trabajo de grado.
- El laboratorio de Rayos X en el Parque Tecnológico de Guatiguará, por la realización de las pruebas DRX.
- Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander (UIS) y a los proyectos Internos VIE-UIS No. 3914 y 3910 por su apoyo en el desarrollo de pruebas, proporcionar recursos y equipos adquiridos por el proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo general	15
1.2 Objetivos específicos	15
2. Fundamentos Teóricos	16
2.1. Energía geotérmica	16
2.1.1. Definiciones relacionadas a la energía geotérmica	17
2.1.2. Clasificación de la energía geotérmica	18
2.2. Geotermia en Colombia	18
2.2.1. Potencial geotérmico en Colombia	19
2.3. Corrosión.....	21
2.3.1. Factores que influyen en la corrosión	22
2.4. Corrosión en materiales debido a fluidos geotérmicos	23
2.5. Acero al carbono	24
2.6. Pasivación	25
2.7. Técnicas analíticas para caracterización de muestras	25
2.8. Técnica de gravimetría discontinua	26
3. Evaluación Experimental	27
3.1. Fluido geotérmico	27
3.2. Diseño experimental	28

3.3. Condiciones operacionales.....	29
3.3.1. Procedimiento experimental	30
3.4. Protocolo experimental	31
4. Resultados y análisis.....	32
4.1. Cálculo de la velocidad de corrosión.....	32
4.2. Caracterización acero base.....	34
4.3. Caracterización del acero API N80-Q en condiciones de producción de energía geotérmica	36
4.3.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	36
4.3.2. Espectroscopia de energía dispersa (EDS)	39
4.3.3. Difracción de Rayos X (DRX).....	40
5. Conclusiones	43
6. Recomendaciones	44
Referencias Bibliográficas	45
Apéndices.....	50

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Clasificación energía geotérmica en función de su entalpía por diferentes autores</i>	18
Tabla 2 <i>Áreas que cuentan con recursos hidrotermales en Colombia</i>	21
Tabla 3 <i>Unidades de velocidad de corrosión según la norma ASTM G1-03</i>	27
Tabla 4 <i>Composición química del acero API N80-Q</i>	34
Tabla 5 <i>Composición química de la superficie del acero API N80-Q sometido 40 y 140 horas a condiciones de producción de energía geotérmica de media y alta entalpía.....</i>	39
Tabla 6 <i>Compuestos y productos de corrosión identificados</i>	41
Tabla 7 <i>Condiciones operacionales para el presente trabajo de investigación.....</i>	53
Tabla 8 <i>Recopilación de estudios científicos para la selección del acero al carbono</i>	61

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Sistema Geotérmico</i>	16
Figura 2 <i>Mapa Preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia</i>	20
Figura 3 <i>Diseño experimental para el presente trabajo de investigación</i>	28
Figura 4 <i>Esquema del reactor Batch</i>	29
Figura 5 <i>Diagrama del procedimiento experimental del trabajo de investigación</i>	30
Figura 6 <i>Porcentaje de variación de pesos de los cupones</i>	33
Figura 7 <i>Velocidad de corrosión acero al carbono API N80-Q</i>	33
Figura 8 <i>Micrografías electrónicas del acero API N80-Q y su composición química</i>	35
Figura 9 <i>Micrografías del acero API N80-Q en contacto con fluido correspondiente a media entalpía evaluado a 40 y 140 horas</i>	37
Figura 10 <i>Micrografías del acero API N80-Q en contacto con fluido correspondiente a media entalpía evaluado a 40 y 140 horas</i>	38
Figura 11 <i>Difractograma de productos formados en la superficie del acero a condiciones de producción de energía geotérmica de media entalpía</i>	40
Figura 12 <i>Reactor tipo Batch</i>	51
Figura 13 <i>Ultrasonido LC 30 H</i>	52
Figura 14 <i>Balanza OHAUS</i>	53
Figura 15 <i>Diseño muestra acero al carbono API N80-Q</i>	54

Figura 16 <i>Diferencia de pesos de las muestras</i>	55
Figura 17 <i>Composición química de un acero API N80-Q en contacto de con un fluido geotérmico de media entalpía durante 15 horas</i>	56
Figura 18 <i>Composición química de un acero API N80-Q en contacto de con un fluido geotérmico de media entalpía durante 80 horas</i>	56
Figura 19 <i>Composición química de un acero API N80-Q en contacto de con un fluido geotérmico de alta entalpía durante 15 horas</i>	57
Figura 20 <i>Composición química de un acero API N80-Q en contacto de con un fluido geotérmico de alta entalpía durante 80 horas</i>	58
Figura 21 <i>Difractogramas de la capa pasivante formada sobre la superficie del acero API N80-Q bajo condiciones de media entalpía durante (A)15 horas y (B) 80 horas</i>	58
Figura 22 <i>Difractogramas de la capa pasivante formada sobre la superficie del acero API N80-Q bajo condiciones de alta entalpía durante (A)15 horas y (B) 80 horas</i>	59

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Técnicas de caracterización	50
Apéndice B. Descripción equipos de laboratorio	51
Apéndice C. Determinación de las condiciones de estudio	53
Apéndice D. Diferencia de pesos de las muestras	55
Apéndice E. Caracterización metalográfica.....	55
Apéndice F. Estudios científicos selección del acero al carbono	61

Resumen

Título: Análisis de los Cambios Morfológicos y Composicionales en el Acero al Carbono Sometido a Condiciones de Producción de Energía Geotérmica *

Autor: Miguel Angel Rivero Sanabria, Andrea Lizeth Santamaría de la Ossa **

Palabras Clave: Energía geotérmica, Acero al Carbono, Morfológico.

Descripción: El objetivo de este estudio, es determinar los cambios morfológicos y composicionales que experimentan las tuberías de acero al carbono al ser expuestas a condiciones de producción de energía geotérmica. Con base en información de estudios previos, se concluyó que el acero al carbono API N80-Q es un metal ampliamente utilizado para la producción de energía geotérmica. Para ello, se evaluó la velocidad de corrosión y se caracterizó el acero API N80-Q simulando las condiciones típicas de un yacimiento geotérmico, tales como son la temperatura, presión y fluido geotermal. La energía geotérmica ha ganado relevancia debido a su contribución en la diversificación de la matriz energética; sin embargo, el impacto corrosivo es un factor crucial al implementar proyectos para extraer esta energía del interior de la tierra. Por tal motivo, este estudio se centró en analizar los efectos de un fluido geotermal de media y alta entalpía (150 °C y 250 °C) sobre el acero al carbono API N80-Q, bajo presiones de 360 y 300 psig, respectivamente, y con diferentes tiempos de exposición. Para evaluar la cinética de corrosión, se utilizó la técnica de gravimetría discontinua. El análisis morfológico, la composición química y los productos de corrosión fueron estudiados mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Espectroscopia de Energía Dispersa y Difracción de Rayos X. Los resultados confirmaron la formación de una película de productos de corrosión en la superficie del acero, compuesta por FeCO_3 , Fe_3O_4 , $\text{Fe}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}$ y $\text{Fe}_{10.8}\text{Ni}$, la cual redujo progresivamente la velocidad de corrosión hasta alcanzar un estado de pasivación del material.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Pregrado. Director: Adan Yovani León Bermúdez. Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Zuly Himelda Calderón Carrillo. Doctora en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Analysis of Morphological and Compositional Changes in Carbon Steel Subjected to Geothermal Energy Production Conditions *

Author(s): Miguel Angel Rivero Sanabria, Andrea Lizeth Santamaría de la Ossa **

Key Words: Geothermal Energy, Carbon Steel, Morphological

Description: The objective of this study is to determine the morphological and compositional changes that carbon steel pipes undergo when exposed to geothermal energy production conditions. Based on information from previous studies, it was concluded that API N80-Q carbon steel is a widely used metal for geothermal energy production. For this purpose, the corrosion rate was evaluated, and API N80-Q steel was characterized by simulating typical geothermal reservoir conditions, such as temperature, pressure, and geothermal fluid. Geothermal energy has gained importance due to its contribution to the diversification of the energy matrix; however, the corrosive impact is a crucial factor when implementing projects to extract this energy from within the earth. Therefore, this study focused on analyzing the effects of a medium- and high-enthalpy geothermal fluid (150 °C and 250 °C) on API N80-Q carbon steel, under pressures of 360 and 300 psig, respectively, and with different exposure times. To evaluate the corrosion kinetics, the discontinuous gravimetry technique was used. The morphological analysis, chemical composition, and corrosion products were studied using Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive Spectroscopy, and X-ray Diffraction. The results confirmed the formation of a corrosion product film on the surface of the steel, composed of FeCO_3 , Fe_3O_4 , $\text{Fe}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}$, and $\text{Fe}_{10.8}\text{Ni}$, which progressively reduced the corrosion rate until the material reached a passivation state.

* Degree Work

**Physicochemical Engineering Faculty. School of Petroleum Engineering. Undergraduate. Director: Adan Yovani León Bermúdez. PhD in Chemical Engineering. Codirector: Zuly Himelda Calderón Carrillo. PhD in Chemical Engineering.

Introducción

La energía geotérmica es una fuente renovable utilizada en más de 78 países para la generación de electricidad y usos comunes. Sin embargo, la explotación del potencial geotérmico ha sido limitada; en 2010, la capacidad instalada alcanzó solo 10,715 MW, representando apenas el 0,4% de la demanda energética mundial (Gutiérrez & Alvarado, 2010). A pesar de esto, en la actualidad la energía geotérmica está ganando mayor relevancia, impulsada por la diversificación de la matriz energética y la necesidad de reducir las emisiones de CO₂.

Uno de los principales desafíos en la producción de energía geotérmica son las altas tasas de corrosión provocadas por los productos corrosivos presentes en los fluidos geotérmicos. Según Gallegos & Guillén (2023), factores como el oxígeno, los iones H⁺ (pH), los iones Cl⁻, los iones SO₄²⁻, NH₃, NaCl, CO₂ y H₂S son responsables de diversos tipos de corrosión, incluyendo la corrosión por picaduras, la corrosión uniforme y el agrietamiento inducido por hidrógeno. Esta problemática ha limitado la expansión rápida de la producción de energía geotérmica.

Hasta la fecha, no hay gran número de estudios sobre los efectos de los productos corrosivos de los fluidos geotérmicos en el acero al carbono utilizado en las tuberías de producción. Por ello, este trabajo de investigación tiene como objetivo determinar y analizar los cambios morfológicos y composicionales del acero al carbono API N80-Q (uno de los materiales más empleados en la industria petrolera y geotérmica), bajo condiciones de producción geotérmica. Se buscará corroborar si la interacción del acero con el fluido geotérmico genera una capa pasivante que proteja el metal de la corrosión.

El presente estudio se centra en el análisis de los cambios en el acero API N80-Q cuando se expone a condiciones geotérmicas de media y alta entalpía, y se desarrolla en tres etapas.

En la primera etapa, se presentan el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo, junto con una revisión bibliográfica sobre la energía geotérmica, los principales proyectos geotérmicos en Colombia, la corrosión, la corrosión asociada a fluidos geotérmicos, los factores que influyen en la corrosión, las generalidades del acero al carbono y la pasivación. Con base en esta información, se llevan a cabo pruebas experimentales en el laboratorio utilizando un reactor Batch. Finalmente, en la etapa final, con los resultados, se abre la posibilidad de realizar estudios complementarios, como el uso de Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X para confirmar las fases cristalinas observadas y la evaluación en rangos más amplios de temperatura, presión y tipos de fluidos. Además, incorporar condiciones de baja entalpía y concentraciones variables de CO₂ permitirá profundizar en los factores que impactan la durabilidad del acero en estos ambientes.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Determinar los cambios morfológicos y composicionales en el acero al carbono sometido a condiciones de producción de energía geotérmica.

1.2 Objetivos específicos

Seleccionar el acero al carbono adecuado para la configuración de pozos en producción de energía geotérmica mediante revisión bibliográfica.

Desarrollar pruebas de corrosión por inmersión del acero al carbono previamente seleccionado en un reactor Batch a escala de laboratorio, bajo condiciones de temperatura, presión y fluidos aplicados durante la producción de energía geotérmica.

Analizar el efecto de las condiciones de producción de energía geotérmica sobre los cambios morfológicos y composicionales del acero al carbono, mediante las técnicas de Gravimetría Discontinua, Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS) y Difracción de Rayos X (DRX).

2. Fundamentos Teóricos

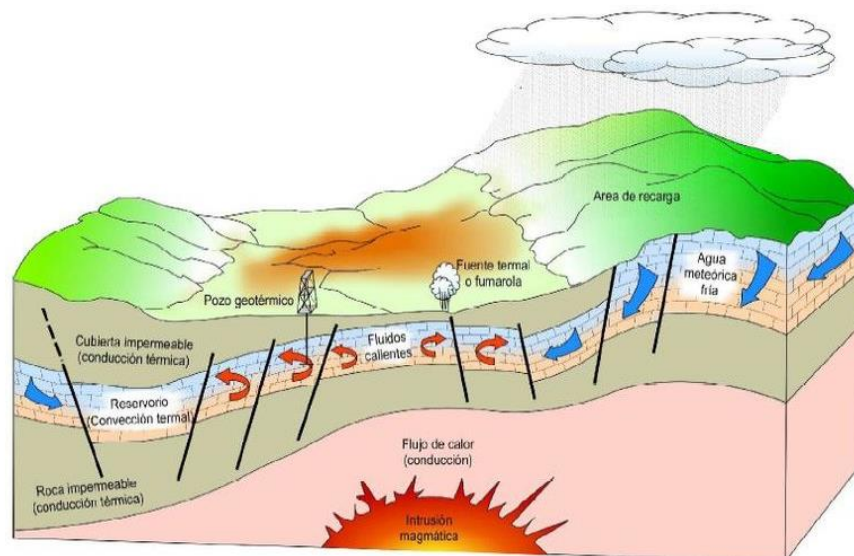
A continuación, se presenta el marco de referencia de investigaciones para el tema de desarrollo en este proyecto.

2.1. Energía geotérmica

La energía geotérmica es el calor que se encuentra contenido en el interior de la Tierra, generando fenómenos geológicos a escala planetaria. Este término se emplea para indicar la cantidad de calor que puede o podría ser recuperado y explotado por el humano (Dickson & Fanelli, 2004). La energía geotérmica se genera, principalmente, por la desintegración de los isótopos que existen en las rocas (principalmente Potasio, Torio y Uranio). El calor se transmite principalmente por conducción desde los materiales que conforman el subsuelo hasta superficie, donde se libera, pero estos materiales se caracterizan por tener baja conductividad haciendo que gran parte de la energía se almacene en el interior del planeta (Mundial. et al, 2017).

Figura 1

Sistema Geotérmico



Nota. Esta figura muestra el modelo de un sistema geotérmico hidrotermal. Tomado de Dikson et al. (2004)

2.1.1. Definiciones relacionadas a la energía geotérmica

En torno a la energía geotérmica, es necesario la recopilación de algunas definiciones que faciliten la comprensión de este tipo de energía.

- **Gradiente geotérmico:** Es la variación de la energía en función de la profundidad y condiciones geológicas. Conocer de forma precisa el gradiente geotérmico permite la aplicación de registros de pozos a hueco abierto y entubados, diseño de cementación y modelado de cuencas para determinar la roca madre entre otras (Kabir et al., 1997).
- **Conductividad térmica:** Es un parámetro indispensable para para describir la transferencia de energía térmica. La conductividad térmica está asociada con propiedades propias del material, tales como: Densidad, porosidad, textura y composición del material (Zhao et al., 2018).
- **Flujo de energía o calor:** Movimiento de la energía desde el interior de la tierra hacia la superficie. El flujo de calor se calcula a partir de registros de temperatura y profundidad de pozo, así como con datos conocidos de gradientes geotérmicos de la zona (Okeifufe et al., 2020).

Aplicando la ecuación 1 se obtiene el flujo de calor:

$$Q = -K * G$$

Ecuación 1.

Donde:

- Q = Flujo de calor en W/m².
- K = Conductividad térmica de la formación W/m°C.
- G = Gradiente geotérmico °C/m.

- Reservorio geotérmico: Zona en el interior de la Tierra que contiene calor almacenado en rocas y también en fluidos. Para su respectiva caracterización, se emplea el análisis de presión con el fin de mejorar la eficiencia del desarrollo (Wei et al., 2021).

2.1.2. Clasificación de la energía geotérmica

La energía geotérmica puede ser clasificada mediante su entalpía. La entalpía es crucial porque determina las aplicaciones más apropiadas para cada recurso. El recurso de alta entalpía se utiliza para la generación de electricidad, mientras que el recurso de baja entalpía se utiliza principalmente para calefacción.

Tabla 1

Clasificación energía geotérmica en función de su entalpía por diferentes autores

Clase de sistema	Muffler & Cataldi (1978)	Hochstein (1990)	Benderitter & Cormy (1990)	Haene. Rybach Stegena (1998)
Baja entalpía	< 90 °C	< 125 °C	< 100 °C	<150 °C
Media entalpía	90 °C a 150 °C	125 °C a 225 °C	100 °C a 200 °C	NA
Alta entalpía	> 150 °C	>225 °C	> 200 °C	>150 °C

Nota. Clasificación de baja, media y alta entalpía por diferentes autores.

2.2. Geotermia en Colombia

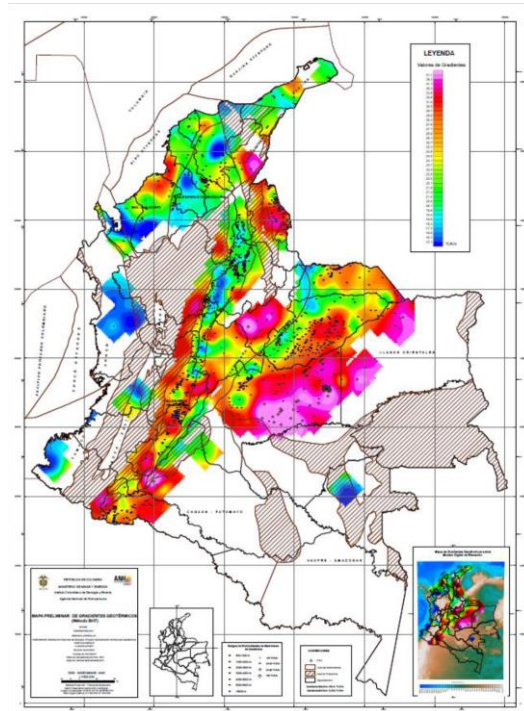
La ubicación geográfica de Colombia es favorecida ya que cuenta con zonas geológicas estratégicas para la producción de energía geotérmica debido a la localización sobre el cinturón de fuego del pacífico. Esta región se caracteriza porque el gradiente del subsuelo presenta alto grado y se refleja en la actividad volcánica presente (Marzolf, 2014).

La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), en 1982 realizó estudios que demostraron que Colombia cuenta con un alto potencial geotérmico debido a la presencia de actividad volcánica en la cordillera occidental y oriental. Las zonas que se estudiaron mostraron un potencial suficiente para permitir la generación de 1000 MW aproximadamente (Porrás, 2013).

2.2.1. Potencial geotérmico en Colombia

Colombia cuenta con una anomalía térmica originada por la actividad tectónica del subsuelo. Esta anomalía es la fuente de energía de al menos 21 sistemas geotérmicos tipo hidrotermal. La magnitud de los recursos geotérmicos fue estimada por expertos a finales del siglo pasado entre 700 y 1370 MW (Alfaro et al., 2021).

Para el año 2008, la ANH y el INGEOMINAS dieron inicio a un proyecto llamado “Actualización del Mapa Geotérmico de Colombia” con el fin de promover el estudio e investigación del flujo de calor terrestre y plasmar los resultados en un mapa. El mapa de gradiente geotérmico se construyó a partir de mediciones de temperatura de fondo de pozo, realizadas aproximadamente en 4600 pozos perforados en el sector petrolero. Se identificó anomalías geotérmicas, con temperaturas superiores a 40 °C, pertenecientes a profundidades someras en zonas de la Cordillera Central, en la cordillera Oriental y en cuencas de los Llanos Orientales, Putumayo, Catatumbo y Valle Inferior del Magdalena. Además, se registró que el pozo geotérmico Nereidas-1 presenta un gradiente geotérmico máximo registrado, alrededor de 140°C/km debido a la ubicación en el flanco occidental de la actividad volcánica del Nevado del Ruiz (Alfaro et al., 2009).

Figura 2*Mapa Preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia*

Nota. Esta figura muestra el mapa de Colombia identificando las zonas con estudios de gradientes geotérmicos. Tomada de Alfaro et al. (2009).

Con el estudio de reconocimiento de los recursos geotérmicos de Colombia realizado por la OLADE, Geotérmica Italiana en 1982, CHEC, CONTECOL, Geotérmica Italiana en 1983, Geocónsul en 1992, se identificaron gran parte de las zonas hidrotermales del país (Alfaro et al., 2020).

En algunas de estas áreas mencionadas anteriormente se han realizado estudios de exploración, la Tabla 2 los describe de manera breve.

Tabla 2*Áreas que cuentan con recursos hidrotermales en Colombia*

Área geotérmica	Referencia de la Identificación
Complejo volcánico Chiles - Cerro Negro	
Volcán Azufral	
Volcán Doña Juana	
Volcán Sotará	
Volcán Puracé	
Volcán de Paipa	OLADE y Geotérmica Italiana (1982)
Volcán Galeras	
Volcán Cumbal	
Volcán Nevado del Huila	
Volcán Cerro Bravo	
Volcán Nevado del Ruiz sectores: Nereidas-Botero Londoño Villamaría-Termalés Hacienda Granates	CHEC, CONTECOL, Geotérmica Italiana (1983); Geocónsul (1992)
Volcán Paramillo de Santa Rosa	
Laguna del Otún	
Volcán Nevado del Tolima	
Volcán Cerro Machín	
San Diego	SGC (2013)
Volcán de Sibundoy	
Caldera Gabriel López	
Sotará-Sucubún	SGC (2020)
Iza	

Nota. Esta tabla muestra diferentes áreas de Colombia que cuentan con recursos hidrotermales.

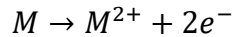
Tomado de Alfaro et al. (2020).

2.3. Corrosión

La corrosión es la degradación de un material el cual está expuesto a un ambiente y puede presentarse a bajas (principalmente soluciones acuosas) o altas temperaturas (Reacciones

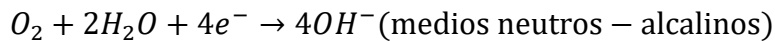
gaseosas) (Marulanda et al., 2007). Por lo tanto, se concluye que los metales se corroen principalmente por un mecanismo electroquímico. En los procesos corrosivos se da un intercambio en la superficie del metal (León, 2006). Esto se puede reducir a las reacciones 1, 2 y 3:

Oxidación:

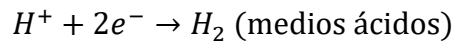


Reacción 1

Reducción:



Reacción 2



Reacción 3

2.3.1. Factores que influyen en la corrosión

Existen diversos factores que influyen en el proceso de corrosión, donde es necesario tener en cuenta las características del material y del ambiente circundante. A continuación, se mencionan algunos factores, siendo estos los de mayor impacto corrosivo.

- Sales disueltas: El proceso de corrosión se acelera por el efecto de acidez cuando las sales ácidas se diluyen en una solución electrolítica disminuyendo su pH. Algunos ejemplos son el cloruro de hierro, cloruro de aluminio y cloruro de amonio (Charng y Lansing, 1982).
- Acidez de la solución: El pH de una solución es una propiedad que indica la cantidad de iones de hidrogeno libres en ella. Si el pH de la solución es inferior a siete ($pH < 7$) se considera que la solución es ácida. Debido a la capacidad de recibir electrones, las soluciones ácidas son más corrosivas que las neutras ($pH = 7$) o que

las soluciones alcalinas ($\text{pH} > 7$), ya que se liberan electrones de dichas reacciones (Charng & Lansing, 1982).

- Capas protectoras: La corrosión puede mitigarse con la implementación de capas protectoras sobre la superficie del material. Estas pueden ser artificiales, en forma de recubrimiento o pueden darse como resultado del fenómeno de pasividad, formándose capas de óxidos metálicos que reducen el proceso corrosivo (Charng & Lansing, 1982).
- Concentración de oxígeno: Dependiendo de la naturaleza del material, la concentración de oxígeno en un medio electrolítico puede acelerar o retardar el proceso corrosivo (Charng & Lansing, 1982).
- Temperatura: Al incrementarse la temperatura, la velocidad de corrosión aumenta, debido a que se acelera la difusión de oxígeno del medio hacia el material afectado. Experimentalmente se ha demostrado que, con el aumento de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ la tasa de corrosión llega a duplicarse (Charng & Lansing, 1982).

2.4. Corrosión en materiales debido a fluidos geotérmicos

La corrosión que presentan las tuberías para la producción de recursos energéticos y los equipos de las plantas es un problema que aqueja la industria de manera significativa.

La corrosión en los materiales es una gran preocupación y surge de combinarse temperaturas elevadas y la presencia de agentes corrosivos en la salmuera. La mayoría de los fenómenos de corrosión son ocasionados principalmente por las siguientes agentes: oxígeno, sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono, amoníaco, cloruro, sulfato y iones de hidrógeno. Incluso

a bajas concentraciones en ppm de agentes corrosivos tales como el Sulfuro de Hidrógeno y Oxígeno, aceleran la corrosión (Mundhenk et al., 2013).

2.5. Acero al carbono

El acero al carbono representa aproximadamente el 90% de la producción total a nivel mundial en cuanto a aceros. La composición de los aceros al carbono comprende elementos como lo son el hierro y carbono (no superan el 1%) y aleaciones tales como silicio y manganeso. (Anais., et al, 2013). El acero al carbono integra propiedades mecánicas, físicas, químicas y térmicas las cuales lo convierten en un material confiable. Sin embargo, las sales fundidas aceleran fuertemente la corrosión en el material (Marulanda, 2009).

Es de gran importancia realizar una correcta selección del tipo de acero al carbono para los distintos ambientes y condiciones propias de cada yacimiento. Por tal motivo, se llevó a cabo una recopilación de estudios científicos que abordan el comportamiento de estos aceros sometidos a condiciones geotérmicas. La Tabla 9 en el Apéndice F presenta dichos estudios.

El acero seleccionado para el desarrollo del presente trabajo fue el API N80-Q por las siguientes razones:

- Resistencia a altas temperaturas: El acero API N80-Q soporta altas temperaturas, lo cual es vital en entornos geotérmicos donde las temperaturas pueden superar los 330 °C (Ura-Bińczyk et al., 2019). Esta resistencia térmica asegura la integridad de la tubería y funcionalidad en condiciones extremas.
- Resistencia a la corrosión: Los fluidos geotérmicos normalmente contienen componentes corrosivos tales como: CO₂, H₂S, HCl y NH₄Cl (Ura-Bińczyk et al., 2019). El acero API N80-Q tiene una buena resistencia a la corrosión en estos

ambientes geotérmicos, lo que es esencial para maximizar la vida útil de los componentes del pozo.

- Relación coste – eficiencia: El acero API N80-Q comparado con otros como los inoxidable a las aleaciones resistentes a la corrosión, ofrece una excelente relación coste – beneficio (Ura-Bińczyk et al., 2019). Esto es importante en los proyectos geotérmicos donde el presupuesto y el riesgo es crítico.

Principalmente por estas razones, se considera que el acero al carbono API N80-Q es una opción viable y justificada para la producción de energía geotérmica debido a su capacidad con altas temperaturas y ambientes corrosivos, su contribución esencial a la integridad mecánica y operativa del pozo, su coste – beneficio, entre otras.

2.6. Pasivación

La pasivación de un metal puede definirse como la pérdida de reactividad química que experimenta el metal sometidos a determinados medios. Existen algunos metales inertes y se comportan como si fuesen metales nobles, ocasionando que la velocidad de corrosión disminuya (Medina, 1996).

2.7. Técnicas analíticas para caracterización de muestras

Con el fin de observar detalladamente la morfología, composición química y textura de las muestras antes y después de ser sometidas a condiciones de producción de energía geotérmica, son utilizadas las siguientes técnicas analíticas: Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS), Gravimetría Discontinua y Difracción de Rayos X (DRX).

2.8. Técnica de gravimetría discontinua

En un análisis gravimétrico se evalúa la tasa de corrosión del acero al carbono mediante la ganancia o pérdida de masa del cupón o muestra a lo largo del tiempo en que ha sido expuesto a las condiciones simuladas. Esta prueba se basa en pesar la muestra antes y después de ser sometida a condiciones de laboratorio. (Mayerly, 2022). Esta técnica está regida por la norma ASTM G1-03 que contiene las instrucciones y procedimiento para la preparación de la muestra, evaluación del daño inducido por la corrosión, así como la eliminación de los productos de corrosión. Aplicado la Ecuación 2 se determina la velocidad de corrosión teniendo como dato experimental la pérdida de peso y estableciendo las unidades de milésimas de pulgada por año.

$$\text{Velocidad de Corrosión} = \frac{K * W}{A * T * D}$$

Ecuación 2

Donde:

K = Constante de velocidad de corrosión

W = Pérdida de masa en gramos

A = Área expuesta al medio en cm²

T = Tiempo de exposición en horas

D = Densidad en g/cm³

Tabla 3

Unidades de velocidad de corrosión según la norma ASTM G1-03

Unidades Velocidad de Corrosión	Siglas en Inglés	Constante (K)
Milésimas de pulgada por año	mpy	3.45×10^6
Milímetros por año	mm/y	8.76×10^4
Pulgadas por mes	ipm	2.87×10^2

Nota. Diferentes unidades en las que se puede expresar la velocidad de corrosión. Tomado de: ASTM G1-03 (ASTM, 2017).

3. Evaluación Experimental

Se ha realizado una evaluación experimental para determinar y comprender los efectos causados por un fluido geotérmico sobre el acero al carbono. El diseño experimental de la investigación es el pilar para la evaluación respectiva del acero API N80-Q.

3.1. Fluido geotérmico

En el presente trabajo de investigación, se indujo un contacto entre el acero API N80-Q y un fluido geotérmico, el cual es una salmuera de 5000 ppm de Cloruro de Sodio (NaCl).

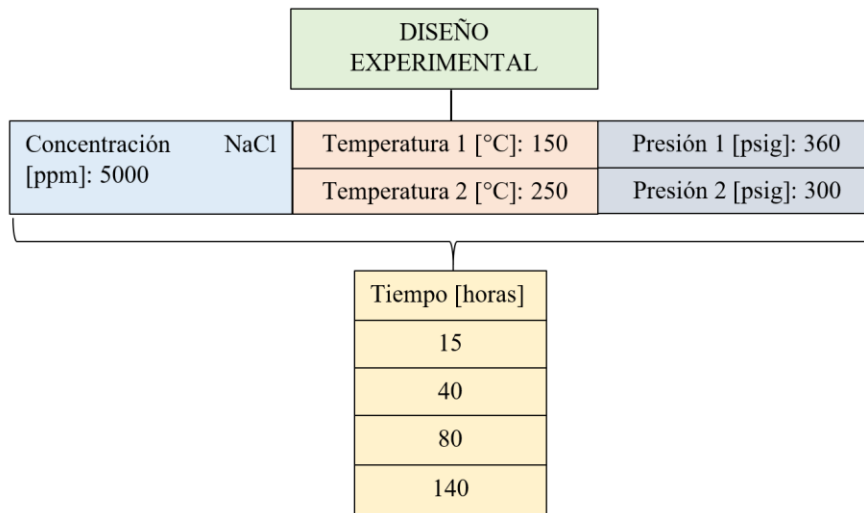
En función de lo anterior, para motivos del desarrollo del trabajo de investigación, se seleccionó el acero API N80-Q dada su composición química, sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas. Estos aspectos hacen que el acero API N80-Q sea confiable, duradero y tenga un costo relativamente bajo en comparación con otro tipo de aceros (Paredes et al., 2015).

3.2. Diseño experimental

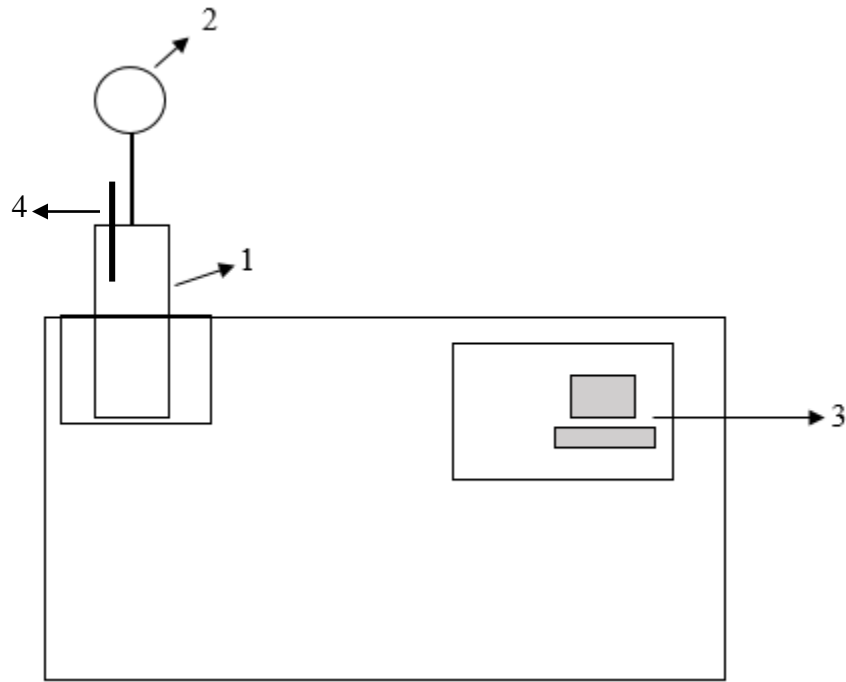
Configuración básica donde se consideran 2 temperaturas (media y alta entalpía), dos presiones (una presión a cada temperatura) y la realización de la prueba a cinco (5) tiempos.

Figura 3

Diseño experimental para el presente trabajo de investigación



El fluido empleado es una salmuera con una concentración de 5000 ppm de Cloruro de Sodio (NaCl). Esta concentración fue seleccionada a partir de una recopilación de información mediante revisión bibliográfica. La Figura 5 muestra el montaje experimental para la realización de las pruebas, donde se tiene un reactor Batch y en su interior una porta cupones hecho de teflón. En él se sitúan y aseguran los cupones de acero API N80-Q. Como se observa en la figura 6, se sitúan 2 cupones los cuales tiene contacto directo con el fluido (salmuera para este trabajo de investigación).

Figura 4*Esquema del reactor Batch*

Nota. Esta figura ilustra el esquema del reactor Batch: (1) envase cilíndrico, (2) manómetro, (3) controlador de temperatura, (4) termocupla.

3.3. Condiciones operacionales

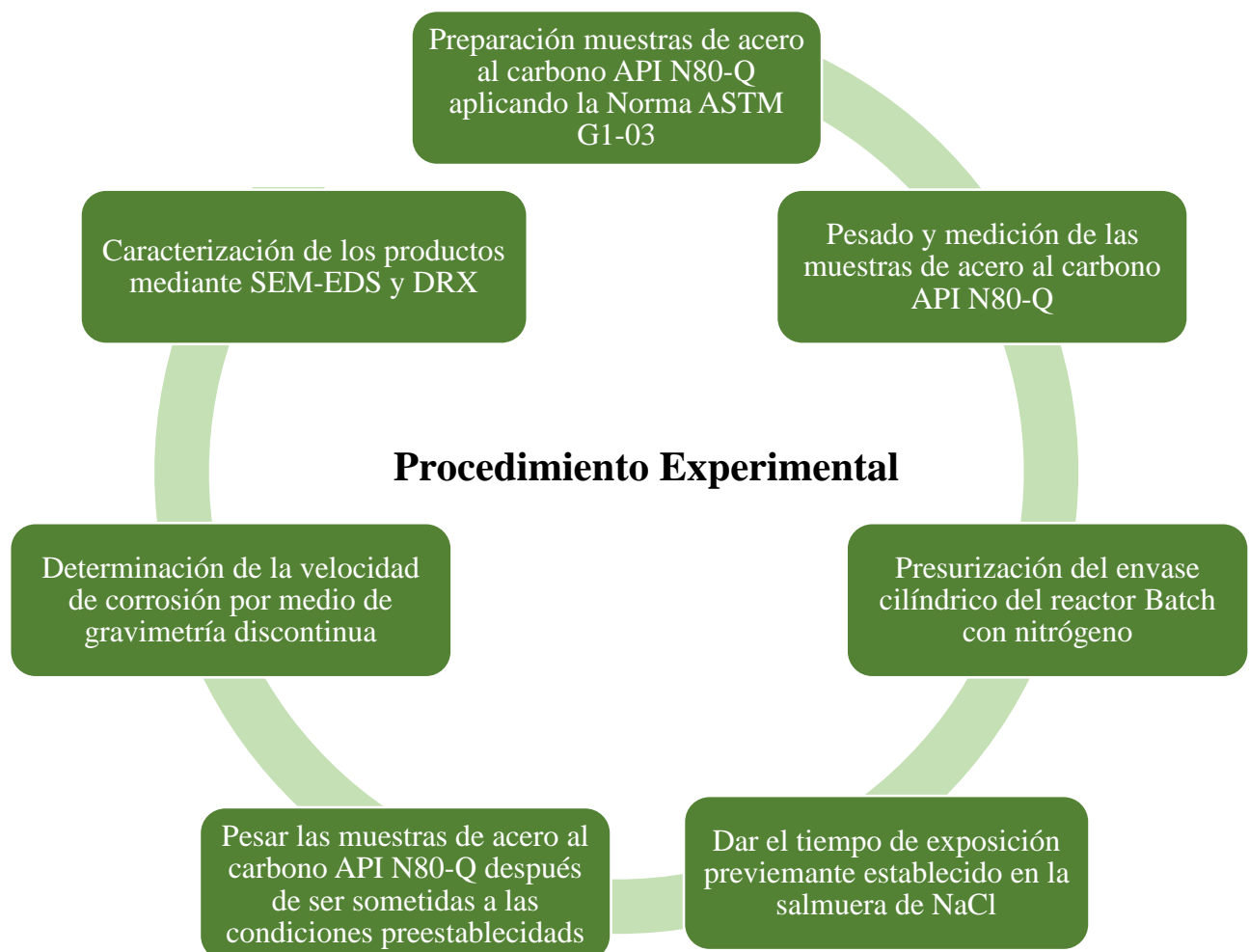
Para el desarrollo del presente trabajo de investigación, se establecieron 2 temperaturas: la primera de 150 °C (media entalpía) y la segunda de 250 °C (alta entalpía). Así mismo 2 presiones: 360 psig para la temperatura de 150 °C y 300 psig para la temperatura de 250 °C. Se establecieron 4 tiempos de exposición los cuales son: 15, 40, 80 y 140 horas. En cuanto al fluido geotérmico, se emplearon 25 mL de agua destilada con una concentración de 5000 ppm de NaCl. Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo de acuerdo con el siguiente procedimiento:

3.3.1. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental cuenta con parámetros clave, como lo son las variables de presión, temperatura, tipo de fluido geotérmico, así como el tiempo de exposición del acero N80 a estas condiciones preestablecidas. En la etapa de preparación de muestras, se empleó un equipo de ultrasonido y también acetona, con el fin de eliminar impurezas en los cupones de acero N80 evitando que estas alteraran los resultados posteriores de SEM-EDS y DRX. La Figura 6 ilustra el procedimiento experimental mediante un diagrama.

Figura 5

Diagrama del procedimiento experimental del trabajo de investigación



3.4. Protocolo experimental

- a. Preparación de muestras: Se registró inicialmente la masa de cada uno de los cupones o muestras. Luego, se sumergieron en el fluido geotérmico utilizando una porta cuponera, asegurando así que el fluido cubriera por completo los cupones. El volumen de cloruro de sodio también fue establecido en base a la premisa de que los cupones debían estar completamente sumergidos en el fluido. Estableciéndose en 25 mL.
- b. Fase de reactividad: Para la fase de media entalpía, se presurizó el envase cilíndrico que contiene los cupones con nitrógeno a 360 psig, mientras que para la fase de alta entalpía se aplicó una presión de 300 psig. Esto se realizó con el propósito de someter al nitrógeno a condiciones isotérmicas.
- c. Desmontaje del reactor: Al finalizar cada una de las pruebas, se apagó el reactor para permitir que alcanzara por sí mismo la temperatura ambiente. Posteriormente, se extrajeron el fluido y los cupones para continuar con el procedimiento a seguir.
- d. Limpieza de los cupones: Siguiendo la Norma ASTM G31-72, se efectuó la limpieza de los cupones para eliminar cualquier traza del fluido geotérmico de su superficie. Una vez realizada la limpieza y el secado, se registró la masa con el objetivo de determinar la velocidad de corrosión.
- e. Pruebas de caracterización: Para el análisis SEM-EDS, se seleccionaron nueve (9) cupones gravimétricos. Cuatro de estos cupones fueron sometidos a una presión de 300 psig, a una temperatura de 250 °C y a cuatro tiempos de exposición (15, 40, 80, 140 horas). Los otros cuatro cupones fueron expuestos a una presión de 360

psig, a una temperatura de 150 °C y a los mismos tiempos que los anteriores. Además, se incluyó un cupón base que no fue sometido a ningún tipo de exposición, pero que fue preparado de acuerdo con la Norma ASTM G1-03.

- f. La evaluación de los cupones gravimétricos seleccionados se realizó mediante Difracción de rayos X en el laboratorio ubicado en el Edificio de Investigaciones de la Universidad Industrial de Santander.

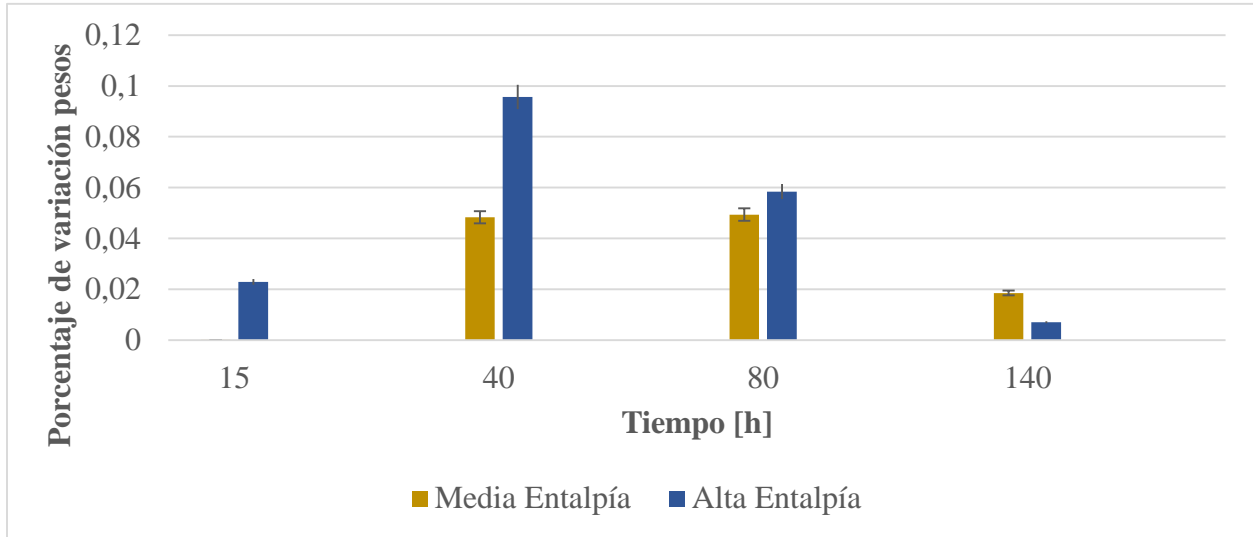
Prueba de gravimetría discontinua: Para obtener datos más precisos, se utilizó una balanza OHAUS Discovery de 5 cifras decimales ubicada en el laboratorio de Resonancia Magnética Nuclear en el parque tecnológico de Guatiguará. Se pesaron 16 cupones gravimétricos antes y después de cada prueba, y con la Ecuación 2 se calculó la velocidad de corrosión.

4. Resultados y análisis

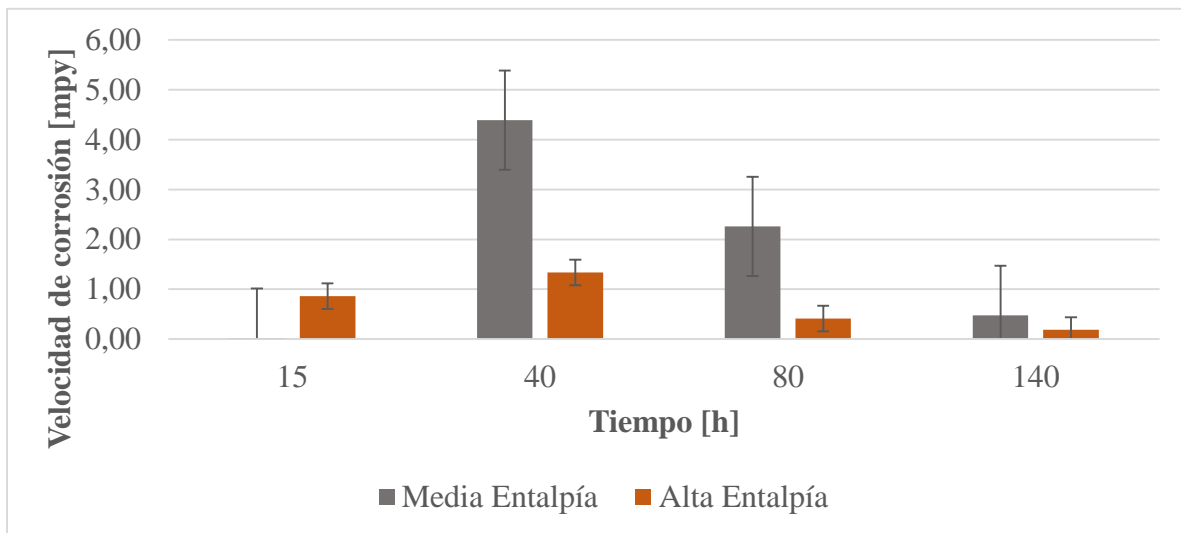
Esta sección comprende los resultados obtenidos a lo largo de la ejecución del proyecto siguiendo las etapas descritas en el procedimiento experimental.

4.1. Cálculo de la velocidad de corrosión

Haciendo uso de la técnica de gravimetría discontinua, se obtuvo la pérdida de masa de los cupones después de ser sometidos a las pruebas. En cada prueba se emplearon dos cupones, los cuales presentaron una ligera variación. Por este motivo, se realizó un promedio aritmético para obtener un valor representativo. La Figura 7 ilustra el porcentaje de variación de los pesos de los cupones antes y después de las pruebas.

Figura 6*Porcentaje de variación de pesos de los cupones*

Se observa que el porcentaje de mayor variación de peso de los cupones en cada uno de los tiempos es para media entalpía, excepto para 140 horas. Además, se evidencia que a las 40 horas se obtuvo el mayor porcentaje de variación de peso.

Figura 7*Velocidad de corrosión acero al carbono API N80-Q*

Nota. Esta figura ilustra la velocidad de corrosión para 4 tiempos

En la Figura 8 se visualiza que la mayor velocidad de corrosión corresponde a media entalpía (150°C), excepto para un tiempo de 15 horas. También puede observarse que, para los dos tipos de entalpías, la mayor velocidad de corrosión se obtiene para un tiempo de 40 horas. Posiblemente a partir de este tiempo se haya formado una capa pasivante sobre la superficie del acero N80 debido al contacto entre el fluido geotérmico y los cupones. Dugarte et al (2015) menciona que en la interacción de una salmuera de agua destilada concentrada con cloruro de sodio (NaCl) y el acero al carbono API N80-Q, forma productos de corrosión, principalmente carbonato de hierro (FeCO_3) debido a las reacciones electroquímicas. Estos autores mencionan que la velocidad de corrosión del FeCO_3 juega un papel importante en la corrosión del acero N80. Teniendo que una precipitación significativa de carbonato de hierro sobre la superficie del acero, da lugar a una película pasivante.

4.2. Caracterización acero base

Mediante revisión bibliográfica se obtuvo la composición química del acero API N80-Q.

Tabla 4

Composición química del acero API N80-Q

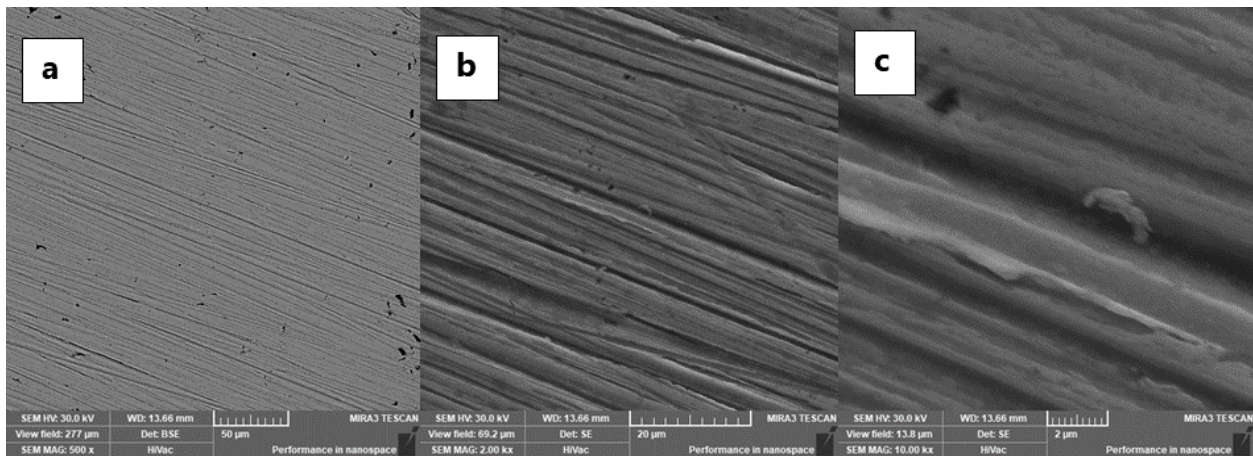
% porcentaje en peso							
C	P	S	Si	Mn	Ni	Cu	Cr
0,255	0,013	<0,150	0,308	1,424	0,0077	0,0081	0,011

Nota. Evaluación de la corrosión en el acero al carbono API N80-Q bajo un ambiente de dióxido de carbono-vapor de agua en condiciones reales de operación a escala de laboratorio. Universidad Industrial de Santander. Peña, A., & Quintero, K. (2024).

Para evaluar el efecto del fluido geotermal seleccionado sobre el acero al carbono API N80-Q, fue necesario realizar un estudio cualitativo y cuantitativo de la morfología del acero base (sin ningún tipo de tratamiento) mediante microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de energía dispersa. En la Figura 9 se puede observar que la superficie del acero base es homogénea con presencia de elementos hierro, carbono, oxígeno, cromo y Níquel.

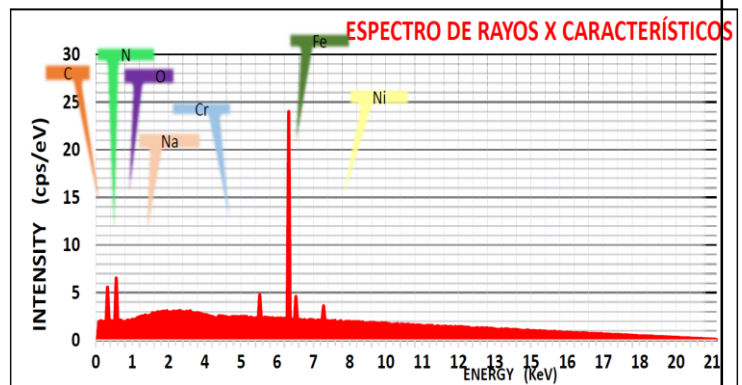
Figura 8

Micrografías electrónicas del acero API N80-Q y su composición química



d

Elemento	Wt%	At%
Carbono	9,77	11,72
Oxígeno	20,37	17,32
Cromo	3,04	3,65
Hierro	63,46	64,09
Níquel	3,36	3,22



Nota. Esta figura muestra las micrografías de la superficie del acero API N80-Q sin la aplicación de algún tipo de proceso, con aumentos de 50, 20 y 2 μm , respectivamente para a, b y c. (d) muestra la composición química obtenida mediante la técnica de espectroscopía de energía dispersa (EDS)

Los resultados obtenidos del acero al carbono API N80-Q mediante la caracterización por microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de energía dispersa (EDS) no reflejan completamente la composición química del acero. No obstante, el acero utilizado para este estudio corresponde al tipo de acero especificado en a en la Tabla 5.

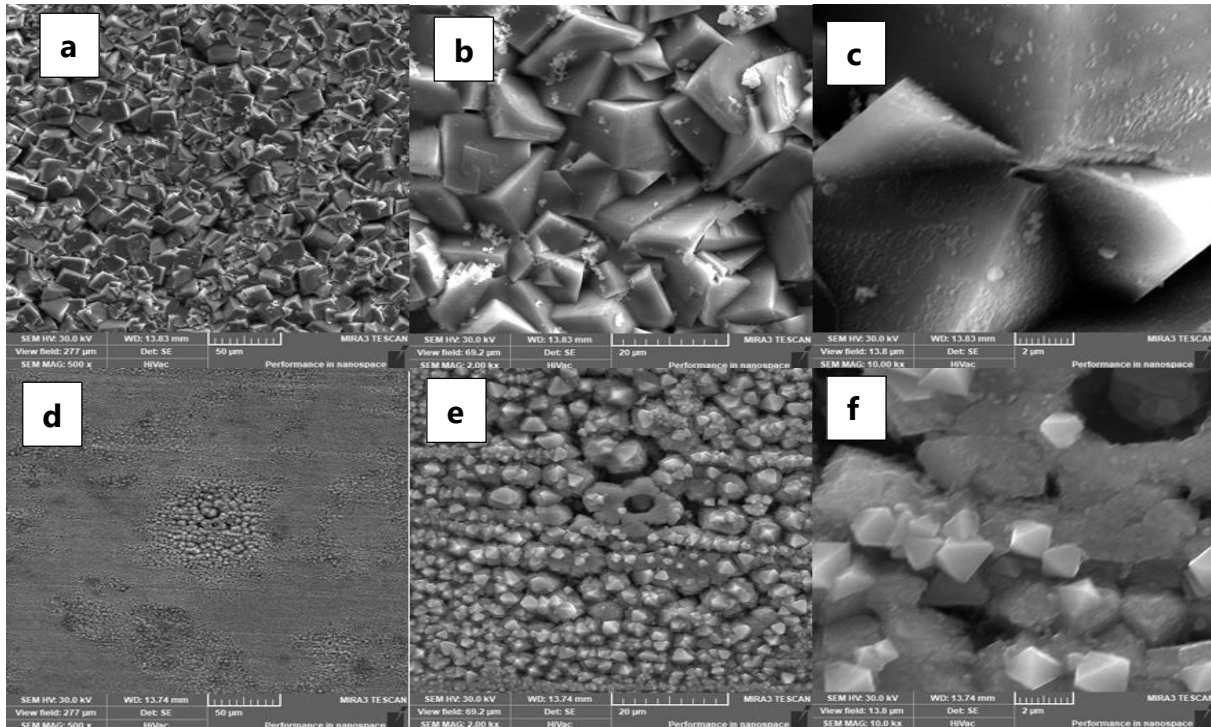
4.3. Caracterización del acero API N80-Q en condiciones de producción de energía geotérmica

4.3.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

En las Figuras 10 y 11 se observan las micrografías obtenidas por SEM de la superficie del acero API N80-Q, sometido a condiciones de producción de energía geotérmica de media y alta entalpía, respectivamente a 40 y 140 horas. Las micrografías correspondientes a los tiempos de 15 y 80 horas, tanto para media como alta entalpía, se encuentra en el apéndice E.

Figura 9

Micrografías del acero API N80-Q en contacto con fluido correspondiente a media entalpía evaluado a 40 y 140 horas



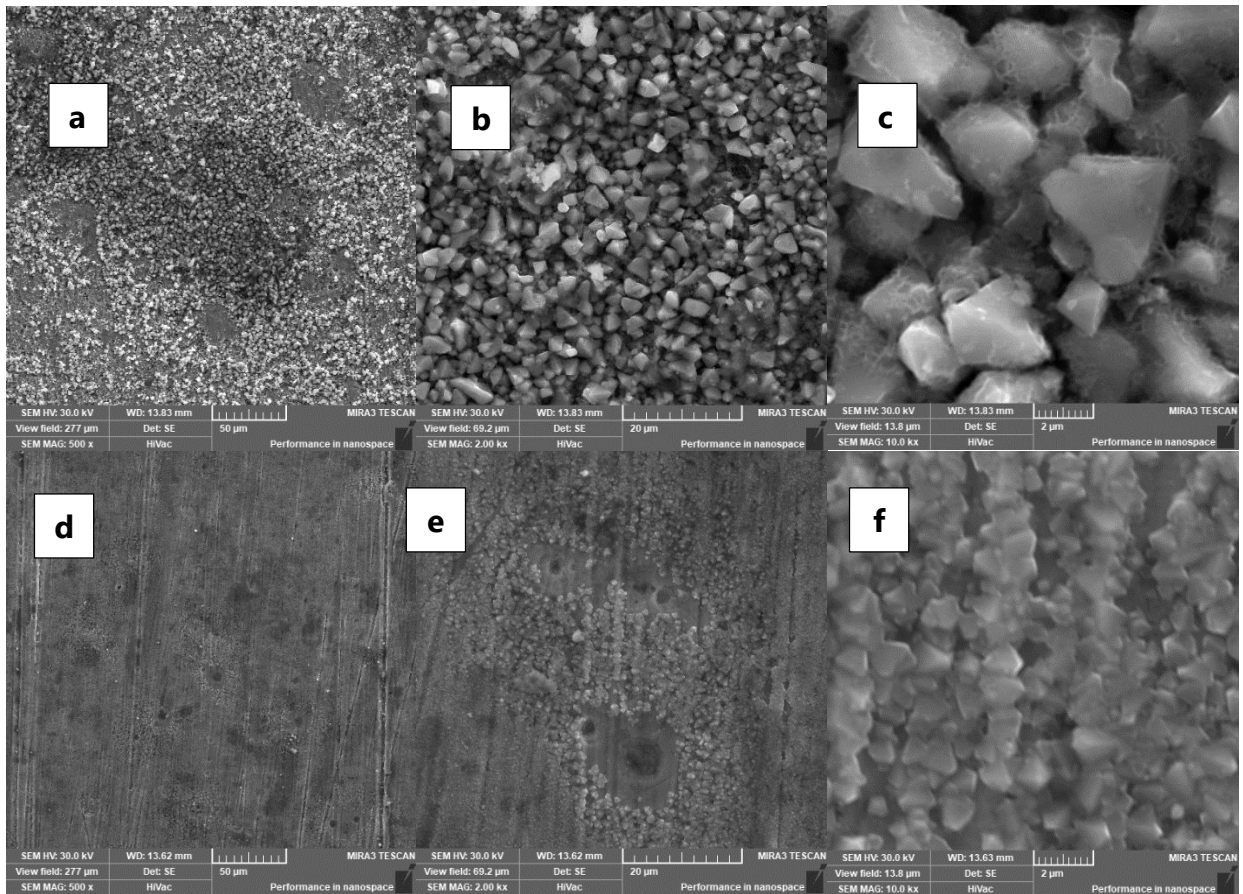
Nota. La figura muestra, mediante micrografías, los productos formados en la superficie del acero API N80-Q al ser sometido a condiciones de producción de energía geotérmica de media entalpía. Las figuras a, b y c corresponden a la superficie de una muestra de acero API N80-Q sometida a estas condiciones durante 40 horas; mientras que d, e y f a un tiempo de 140 horas. Los aumentos de las figuras son de 50, 20 y 2 µm, respectivamente.

En la figura 10 se observa que los productos de corrosión tienen geometrías cúbicas, tratándose posiblemente de la formación de sales. En la micrografía c, estos productos tienen un tamaño mayor que en la micrografía f, lo que podría deberse a que en la micrografía c el tiempo de exposición fue de 40 horas, mientras que en la micrografía f fue de 140 horas. Probablemente de 40 a 140 horas se generó una capa pasivante que con el transcurso de las horas se fue

compactando y adhiriéndose fuertemente a la superficie del acero API N80-Q. Es probable que parte de esta capa pasivante, sean óxidos de hierro y óxidos de cromo.

Figura 10

Micrografías del acero API N80-Q en contacto con fluido correspondiente a media entalpía evaluado a 40 y 140 horas



Nota. La figura muestra, mediante micrografías, los productos formados en la superficie del acero API N80-Q al ser sometido a condiciones de producción de energía geotérmica de alta entalpía. Las figuras a, b y c corresponden a la superficie de una muestra de acero API N80-Q sometida a estas condiciones durante 40 horas; mientras que d, e y f a un tiempo de 140 horas. Los aumentos de las figuras son de 50, 20 y 2 μm , respectivamente.

Para alta entalpía se observa que para 40 horas los productos de corrosión son de mayor tamaño que a las 140 horas. Al igual que en el caso de media entalpía, es posible que se haya formado una capa pasivante de productos de corrosión, generada por la interacción entre el acero y el fluido geotérmico. Esta capa se habría adherido a la superficie del acero, reduciendo la corrosión de este. Por esta razón, en la Figura 8 se observa que la velocidad de corrosión disminuyó significativamente entre las 40 a 140 horas.

4.3.2. Espectroscopia de energía dispersa (EDS)

Los resultados obtenidos mediante la técnica de espectroscopia de energía dispersa, en la Tabla 6, indican que, tanto en condiciones de media entalpía (150 °C y 360 psig) como para alta entalpía (250 °C y 300 psig), se observa un incremento en los pesos de los elementos de hierro, cromo y níquel.

Tabla 5

Composición química de la superficie del acero API N80-Q sometido 40 y 140 horas a condiciones de producción de energía geotérmica de media y alta entalpía

Elemento		C	N	O	Na	Cr	Fe	Ni
Media Entalpía	40 horas	17,06	6,75	20,27	5,40	3,29	45,74	1,48
	140 horas	15,10	5,82	21,57	4,74	2,59	48,38	1,80
Alta Entalpía	40 horas	13,86	9,14	19,78	6,03	2,3	47,5	1,39
	140 horas	13,41	6,19	17,07	6,43	2,82	51,34	2,75

Se detectó la presencia de elementos como hierro, oxígeno y carbono, que podrían haber formado óxidos y carbonatos de hierro. Además, se identificaron nitrógeno, cromo, sodio y níquel, pertenecientes cuales pertenecen al material base. Para determinar la composición de la capa

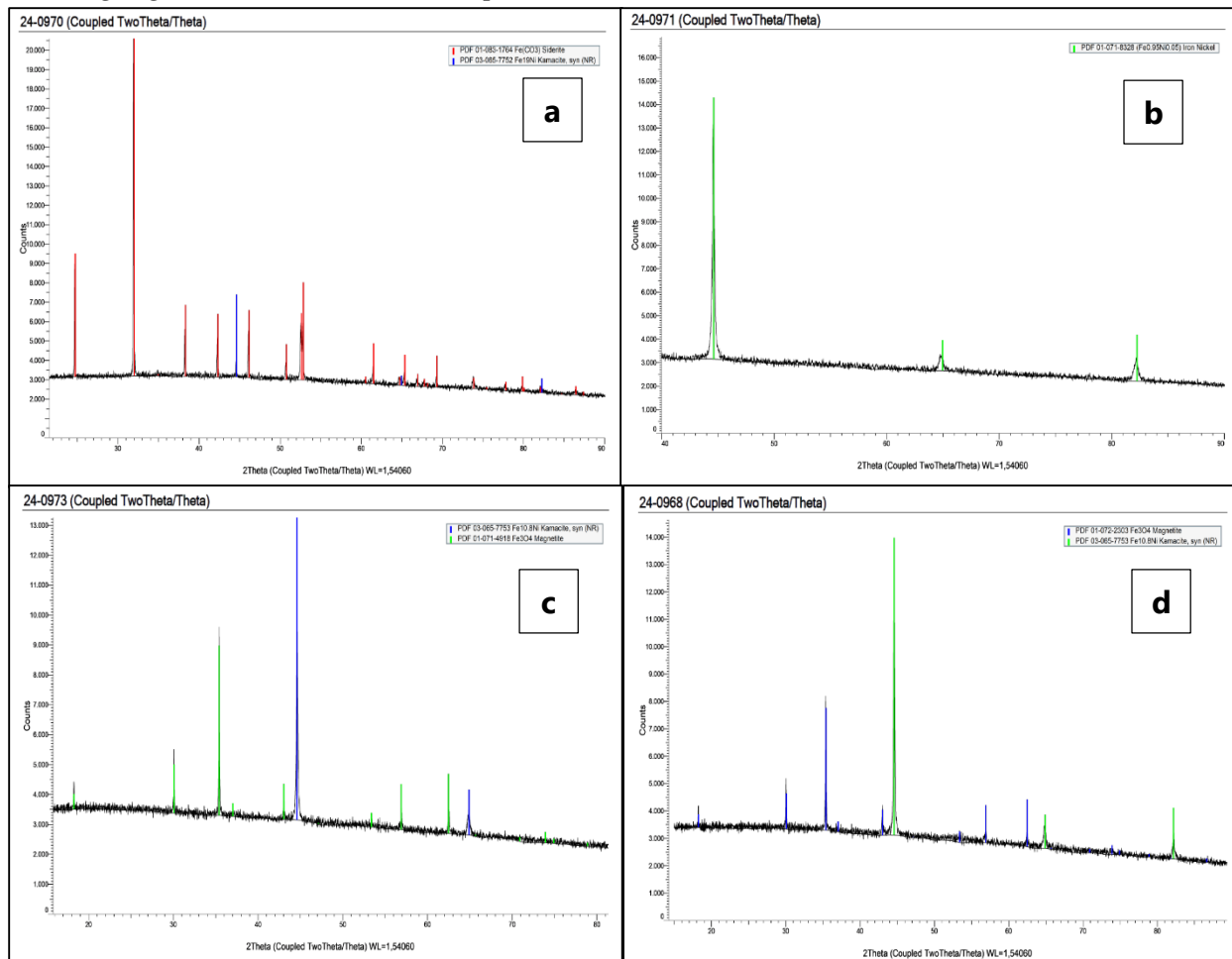
formada sobre la superficie de la muestra de acero, se utilizó el análisis de difracción de rayos X (DRX).

4.3.3. Difracción de Rayos X (DRX)

Los resultados presentados en las figuras 11, 12, 21 y 22 indican la presencia de diferentes fases cristalinas como la Siderita ($\text{Fe}(\text{CO}_3)$), Camacita ($\text{Fe}_{10.8}\text{Ni}$), Hierro-Níquel ($(\text{Fe}_{0.95}\text{Ni}_{0.05})$), Magnetita (Fe_3O_4) formadas por el contacto directo entre el fluido geotérmico y la muestra de acero API N80-Q.

Figura 11

Difractograma de productos formados en la superficie del acero a condiciones de producción de energía geotérmica de media entalpía.



Nota. La figura presenta los difractogramas de los productos de corrosión formados en la superficie del acero API N80-Q bajo condiciones de producción de energía geotérmica de media y alta entalpía. Los difractogramas (a) y (b) corresponden a media entalpía a 40 y 140 horas, respectivamente, mientras que los difractogramas (c) y (d) pertenecen a alta entalpía en los mismos intervalos de tiempo.

La Tabla 7 contiene los productos encontrados mediante un difractómetro ubicado en el Laboratorio de Rayos X ubicado en la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

Tabla 6

Compuestos y productos de corrosión identificados

	Tiempo [horas]	Nombre del compuesto	Formula química	(%Wt)
Media Entalpía	40	Siderita	Fe(CO ₃)	97,6
		Camacita	Fe _{10,8} Ni	2,4
	140	Hierro-Níquel	Fe _{0,95} Ni _{0,05}	100
Alta Entalpía	40	Camacita	Fe _{10,8} Ni	53,84
		Magnetita	Fe ₃ O ₄	46,16
	140	Camacita	Fe _{10,8} Ni	64,32
		Magnetita	Fe ₃ O ₄	35,68

A partir de los datos reportados en la Tabla 7, se puede realizar un análisis detallado sobre la formación y evolución de los productos de corrosión tanto en condiciones de media como de alta entalpía, considerando tiempos de exposición de 40 y 140 horas.

Media entalpía: A las 40 horas los productos de corrosión identificados son la siderita (Fe(CO₃)) y la camasita (Fe_{10,8}Ni). La siderita constituye un 97,6% en peso, lo que indica una alta presencia de carbonato de hierro. La camasita, por otro lado, representa un 2,4% en peso, indicando una formación pobre de aleación hierro-níquel en este punto.

A las 140 horas, se observa una evolución notable de los productos de corrosión, con la formación de una aleación del 100% de hierro-níquel ($\text{Fe}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}$). Esto indica la transformación de los productos formados anteriormente, generando una mayor estabilidad de las aleaciones ferro-níquel en condiciones geotérmicas de media entalpía.

Alta entalpía: A las 40 horas, los productos de corrosión predominantes son la camasita ($\text{Fe}_{10.8}\text{Ni}$) con un 53,84% en peso y la magnetita (Fe_3O_4) con un 46,16%. La presencia en porcentajes en peso relativamente similares, indica que la aleación hierro-níquel y el óxido ferroso coexisten durante las primeras 40 horas de exposición en condiciones de producción de energía geotérmica de alta entalpía.

A las 140 horas, la composición cambia drásticamente. La camasita representa un 64,32% en peso, mientras que la magnetita disminuye a un 35,68%. Este comportamiento confirma el comportamiento de disminución de la velocidad de corrosión presentada en la Figura 8 y la tendencia de los resultados de DRX: la formación de aleaciones hierro-níquel se incrementa con el tiempo, lo contrario sucede con la cantidad de magnetita. Este cambio sugiere que la camasita se estabiliza como uno de los principales productos de corrosión a condiciones de alta entalpía desplazando parcialmente a la magnetita.

5. Conclusiones

La revisión bibliográfica ha permitido identificar aspectos los cuatro yacimientos geotérmicos más prometedores de Colombia, destacando su potencial energético. Se recopilaron datos técnicos relevantes sobre sus características relacionadas con su geología y demás, lo que establece una base para evaluar la corrosión en los ambientes geotérmicos.

Las pruebas de corrosión por inmersión bajo condiciones simuladas y controladas en el laboratorio, han demostrado que el acero al carbono API N80-Q sufre una degradación significativa en ambientes geotérmicos. Las condiciones de presión, temperatura y fluidos geotermiales favorecen los procesos de corrosión, comprometiendo la integridad del material.

La velocidad de corrosión tanto en condiciones de media y alta entalpía alcanza su punto máximo a las 40 horas de exposición del acero con fluido geotérmico entre los cuatro tiempos evaluados. Además, bajo las condiciones de media entalpía de (150 °C y 360 psig), la velocidad de corrosión es mayor en comparación con la velocidad para alta entalpía (250 °C y 300 psig).

Mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), se observa la formación de productos con morfologías prismáticas y geometrías irregulares, característicos de carbonatos de hierro, óxidos ferrosos y aleaciones de hierro-níquel. Estos productos forman una película sobre la superficie del acero al carbono API N80-Q, lo que provoca que la velocidad de corrosión disminuya hasta alcanzar un estado pasivante del material.

El análisis de Difracción de Rayos X reveló la presencia de compuestos de corrosión, como el carbonato de hierro (II) ($\text{Fe}(\text{CO}_3)$), aleaciones de hierro y níquel ($\text{Fe}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}$) y óxidos ferrosos (Fe_3O_4).

6. Recomendaciones

Con el fin de profundizarlas en las investigaciones sobre corrosión generada por la producción de energía geotérmica, se recomienda tener en cuenta las siguientes pautas:

Realizar un análisis elemental como lo es la Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X (XRF), para corroborar la existencia de las fases cristalinas identificadas mediante Difracción de Rayos X.

Llevar a cabo un estudio sistemático que abarque un amplio rango de temperaturas y presiones, así como la utilización de diferentes fluidos geotérmicos con diversas composiciones químicas.

Incluir la evaluación del comportamiento del acero API N80-Q en presencia de fluidos geotérmicos que contengan concentraciones variables de CO₂, dado que este gas puede aumentar significativamente la corrosión sobre el material.

Incorporar la condición geotérmica de baja entalpía, para realizar un análisis comparativo entre los tres tipos de energía geotérmica y la severidad de corrosión asociada a cada una de ellos.

Referencias Bibliográficas

- Alfaro, C. (2005). Alteración hidrotermal en el sistema geotérmico de Paipa. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.
- Alfaro, C. (2005). Geoquímica preliminar de gases del sistema geotérmico de Paipa.
- Alfaro, C. M., Rueda Gutiérrez, J. B., Casallas Y. P., Rodríguez G. Z., y Malo J.E (2020). Estimación Preliminar del Potencial Geotérmico de Colombia. Bogotá: Servicio Geológico Colombino.
- Alfaro, C., Alvarado, I., Quintero, W., Vargas, C., Briceño, L. (2009). Mapa Preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia. Bogotá: Servicio Geológico Colombino.
- Alfaro, C., Bernal, N., Ramírez, G., & Escovar, R. (2000). Colombia, country update. In Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan (pp. 45-54).
- Alfaro, C., Ponce, P., Monsalve, M. L., Ortiz, I., Franco, J. V., Ortega, A., ... & Gómez, D. (2015). A preliminary conceptual model of Azufral geothermal system, Colombia. In Proceedings World Geothermal Congress (pp. 10p-10p).
- Alfaro, C., Rueda, J., Matiz, J., Beltrán, M., Rodríguez, G., Rodríguez, G., ... & Pinilla, A. (2020). Paipa Geothermal System, Boyacá: Review of exploration studies and conceptual model. *The Geology of Colombia*, 4, 36.
- Alfaro, C., Rueda-Gutiérrez, J. B., Casallas, Y., Rodríguez, G., & Malo, J. (2021). Approach to the geothermal potential of Colombia. *Geothermics*, 96, 102169.
- Anais, O., Garcia, A., Carolina, Z., & Robles, M. (2013). ESTUDIO DE LOS ACEROS
- Barbier, Enrico. (2002). "Geothermal energy technology and current status: an overview." *Renewable and sustainable energy reviews* 6.1-2: 3-65.

- Charng, T., & Lansing, F. (1982). Review of corrosion causes and corrosion control in a technical facility (No. N--8230252). Jet Propulsion Lab..
- Coviello, M. (2000). Estudio para la evaluación del entorno del Proyecto Geotérmico Binacional" Tufiño-Chiles-Cerro Negro".
- Diaz, E. G. (2021). Geothermal energy in Colombia: Beyond electricity supply; A vision for sustainable development. Proceedings World Geothermal Congress 2020+1 Reykjavik, Iceland, 30 March-27 October 2021, 14023, 1-8. Reykjavik, Iceland: World Geothermal Congress.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). ¿Qué es la energía geotérmica. Pisa: Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR.
- Gallegos, K. B., & Guillén, E. A. (2023). Evaluación de sistemas de protección anticorrosiva utilizando recubrimientos de alto desempeño en equipos e instalaciones de la industria geotérmica, mediante la aplicación de las normas ASTM D610–08, ISO 12944: 2017, ASTM D3359–17 y SSPC-PA2–2008 (Doctoral dissertation, Universidad de El Salvador).
- González, J. A. O. (2023). Aplicación del enfoque de desarrollo en cascada en el proyecto geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz. *Revista UIS Ingenierías*, 22(2), 109-128.
- Grieseler, R. (29 de agosto de 2020). Difracción de rayos x. [Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=e0ojoyUCtPc>.
- GUTIERREZ, E. R. S., & ALVARADO, I. S. T. (2010). Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable.
- Kabir, C.S., Del Signore, A.G., Hasan, A.R., and Q. Al-Dashti. (1997). "Establishing Geothermal Gradient Using a New Static Temperature Analysis Method." Paper presented at the SPE

Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/38667-MS>

León, M. A. V. (2006). Estudio catódico de cinética de corrosión del acero al carbón en fluido geotérmico mediante un electrodo de disco rotatorio. *Ingeniería*, 16(2), 17-22.

Marbun, B.T.H., et al. "Casing setting depth and design of production well in water-dominated geothermal system with 330 °C reservoir temperature." *Energy Reports*, vol. 6, 2020, pp. 582-593. : Ura-Bińczyk, E., et al. "On-site monitoring and laboratory characterization of corrosion processes in the geothermal water of Polish Lowland." *Geothermics*, vol. 77, 2019, pp. 267-277.

Marulanda, J. L., Posada, B. A., & Gamboa B., D. (2007). Protección contra la corrosión por sales fundidas de un acero al carbono por rociado termico. *Scientia Et Technica*, 1(36). Recuperado a partir de <https://ojs2.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5007>

MARULANDA, J., GARCÍA, A., & VITOLA, J. (2009). Protección contra la corrosión por sales fundidas de un acero al carbono por rociado térmico. *Dyna*, 76(157), 251-256.

Marzolf, N. C. (2014). Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia.

Marzolf, N. C. (2014). Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia.

Medina, P. P. T. (1996). Pasividad de los metales y aleaciones. *Respuestas*, 1(1), 13-19.

Mejía, E.L., Rayo, L., Méndez, J., & Echeverri, J. (2014). GEOTHERMAL DEVELOPMENT IN COLOMBIA.

Microscopio MEB – Microbiología y metalurgia. (28 de abril de 2021). Microscopía electrónica de barrido (SEM) – Universidade de Vigo. [Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=4fBAfnKNisA>.

- Monsalve, M. L.; Rodriguez, G. I.; Mendez, R. A.; Bernal, N. F. (1998). Geology of the Well Nereidas 1, Nevado Del Ruiz Volcano, Colombia. Geothermal Library. 263-267.
<https://www.geothermal-library.org/index.php?mode=pubs&action=view&record=1015916>
- Mundhenk, N., Huttenloch, P., Sanjuan, B., Kohl, T., Steger, H., & Zorn, R. (2013). Corrosion and scaling as interrelated phenomena in an operating geothermal power plant. *Corrosion Science*, 70, 17-28.
- Okeifufe, Nnamdi Francis, Izuwa, N. C., and Ngozi Nwogu. (2020). Estimating the Quantity of Recoverable Heat in a Geothermal Reservoir in Nigeria. Paper presented at the SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Virtual, doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/203643-MS>
- Peña, A., & Quintero, K. (2024). Evaluación de la corrosión en el acero al carbono API N80-Q bajo un ambiente de dióxido de carbono-vapor de agua en condiciones reales de operación a escala de laboratorio (Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander). Universidad Industrial de Santander.
- Porras Domínguez, C. U. (2013). Mecanismo de desarrollo limpio aplicado a la generación de energía eléctrica, con la utilización de energía geotérmica de baja entalpía en campos de producción petrolera de Apiay, Suria y campo castilla (departamento del Meta, Colombia) (Master's thesis, Universidad de la Sabana).
- Rendón, D. A. M., Sánchez, I. J. L., & Blessent, D. (2020). Geothermal energy in Colombia as of 2018. *Ingeniería y universidad*, 24, 6.

- Rodríguez, M., & Hernández, P. (2019, July). Procesos en el yacimiento durante 2015 con base en variables químicas y termodinámicas del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, BC, México. In Mexican Geothermal Congress.
- Taussi, M., Tardani, D., Tassi, F., Gorini, A., Aguilera, E., Capaccioni, B., & Renzulli, A. (2023). A conceptual model for the Tufiño-Chiles-Cerro Negro (TCCN) geothermal system (Ecuador-Colombia): New insights into geothermal exploration from chemical and isotopic composition of hydrothermal fluids. *Journal of Geochemical Exploration*, 249, 107214.
- Wei, Cao , Cheng, Shiqing , Jiang, Bin , Gao, Ruilian , Wang, Yang , Song, Jiayi , and Haiyang Yu. (2021). "Numerical Study on the Temperature Behavior in Naturally Fractured Geothermal Reservoirs and Analysis Methodology for Geothermal Reservoir Characterization and Development." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dubai, UAE. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/205862-MS>
- Zapata Lesmes, H. J. (2015). Propuesta de una hoja de ruta para el fomento del desarrollo de proyectos geotérmicos (Doctoral dissertation, Universidad de El Salvador).
- Zhao, X. G., Wang, J., Chen, L., and Z. Zhao. (2018). "Experimental Investigations on the Thermal Conductivity Characteristics of Beishan Granite After Thermal Treatment." Paper presented at the ISRM International Symposium - 10th Asian Rock Mechanics Symposium, Singapore.

Apéndices

Apéndice A. Técnicas de caracterización

A continuación, se realiza una descripción del principio de cada una de las técnicas de caracterización empleadas en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

✓ **Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS)**

Es una técnica de caracterización que emplea electrones para formar imágenes detalladas. Este proceso inicia con un filamento interno del microscopio, el cual ilumina la muestra con un haz de electrones. Posteriormente los electrones generados a raíz de la interacción con la muestra son recogidos con detectores especiales. El SEM-EDS funciona de manera similar que un microscopio óptico convencional, pero permite un aumento en la resolución debido a la interacción entre los electrones y el filamento mencionado anteriormente (Microscopio MEB - Microbiología y Metalurgia, 2024). Mediante esta técnica se puede observar la topografía de una superficie, así como la composición química de los materiales de forma cualitativa y cuantitativa. Mediante el sistema EDS, es posible obtener un espectro de rayos x, en el cual se tiene la intensidad de una señal de rayos x en función de la energía de los rayos x. Con el análisis de del espectro se pueden identificar a que elementos corresponde cada señal obtenida (Microscopio MEB - Microbiología y Metalurgia, 2024).

✓ **Difracción de Rayos X**

Se realiza un ensayo de difracción de rayos x para identificar la estructura cristalina de algún material. Inicialmente se debe tener la muestra que se requiere analizar, así como la fuente de rayos x y el detector que revela el resultado del ensayo. Se hace interactuar la muestra con el haz de rayos x, dependiendo de la estructura cristalina, se observa el fenómeno de difracción mediante ángulos bien definidos para dicha estructura. Para medir el fenómeno de difracción, se

debe filtrar el haz de rayos x y se usa solo la longitud de onda característica con la mayor intensidad. Adicionalmente, se enfoca el haz mediante rendijas ópticas. Para encontrar los ángulos correctos pertenecientes a una estructura cristalina, puede moverse de forma circular la fuente y detector (Grieseler, 2020).

La ley de Bragg describe la interacción entre los rayos x y los planos cristalinos. Cuando los átomos se encuentran ordenados en planos cristalinos y estos planos cuentan con una distancia definida entre sí, un haz de rayos x con una única longitud de onda interactúa con los electrones de dichos átomos, puede producir difracción (Grieseler, 2020).

Apéndice B. Descripción equipos de laboratorio

- Reactor tipo Batch

El reactor Batch es un recipiente compuesto con un envase cilíndrico con una capacidad de aproximadamente 35 cm^3 , en el cual se ingresa la portacuponera. La tapa y el cuerpo del recipiente se unen mediante una rosca en la tapa, lubricada con una grasa especial para garantizar un sellado adecuado frente a las altas presiones y temperaturas a las que será sometido.

Figura 12

Reactor tipo Batch



Descripción de la figura. La figura 13 muestra las partes del reactor tipo Batch empleado para la realización de las pruebas: (1) portacuponera de teflón, (2) cupones gravimétricos, (3) envase cilíndrico, (4) tapa con rosca y (5) manómetro.

- Ultrasonido LC 30 H

El Ultrasonido LC 30 H es un equipo el cual emite ondas de ultrasónicas a alta frecuencia. En esta investigación se implementó este equipo para realizar la limpieza de los cupones de acero API N80-Q y así eliminar residuos generados durante el desbaste de los cupones. La Figura 14 muestra el dispositivo de ultrasonido LC 30 H.

Figura 13

Ultrasonido LC 30 H



- Balanza OHAUS

La Balanza OHAUS está construida con una base de acero y cristal, lo que la hace resistente a la corrosión y a las perturbaciones estáticas. Este equipo se utiliza para medir el peso de los cupones con una precisión de cinco (5) decimales con el fin de aplicar la norma ASTM-G1-03. El modelo del equipo es OHAUS Discovery. La Figura 15 muestra el equipo.

Figura 14

Balanza OHAUS



Apéndice C. Determinación de las condiciones de estudio

Con base a revisión bibliográfica, se establecen las condiciones operacionales a recrear en el laboratorio con el objetivo de obtener resultados confiables y representativos de la realidad. Dichas condiciones se detallan en la Tabla 8.

Tabla 7

Condiciones operacionales para el presente trabajo de investigación

Prueba	Temperatura (°C)	Presión (Psi)	Tiempo (h)	Concentración NaCl (ppm)
Etapa 1	150	360	15-40-80-140	5000
Etapa 2	250	300	15-40-80-140	5000

Con el objetivo de evaluar la velocidad de corrosión en el acero API N80-Q al ser sometidos a condiciones de producción de energía geotérmica, se establecieron 4 tiempos (15, 40,

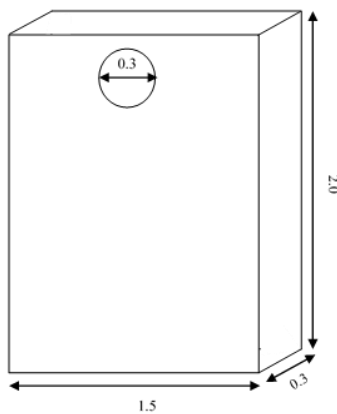
80, 140) y se utilizó una salmuera de agua destilada con una concentración de 5000 ppm de Na Cl en base al estudio de Rodríguez, M & Hernández, A (2019). Las presiones establecidas se establecieron termodinámicamente, asegurando un estado de vapor dentro del envase cilíndrico del reactor tipo Batch.

- Preparación de las muestras de acero API N80-Q

Para la realización de las pruebas, se utilizaron cupones de acero API N80-Q, con un área superficial de 7.85 cm^2 . Sus dimensiones son: 2 cm de largo, 1.5 cm de ancho 0.3 cm de espesor, además, cada cupón cuenta con una perforación de aproximadamente 0.3 cm de diámetro. Cabe resaltar que estas medidas son aproximadas, ya que cada cupón presenta variaciones en sus dimensiones. Diríjase a la Figura 16.

Figura 15

Diseño muestra acero al carbono API N80-Q



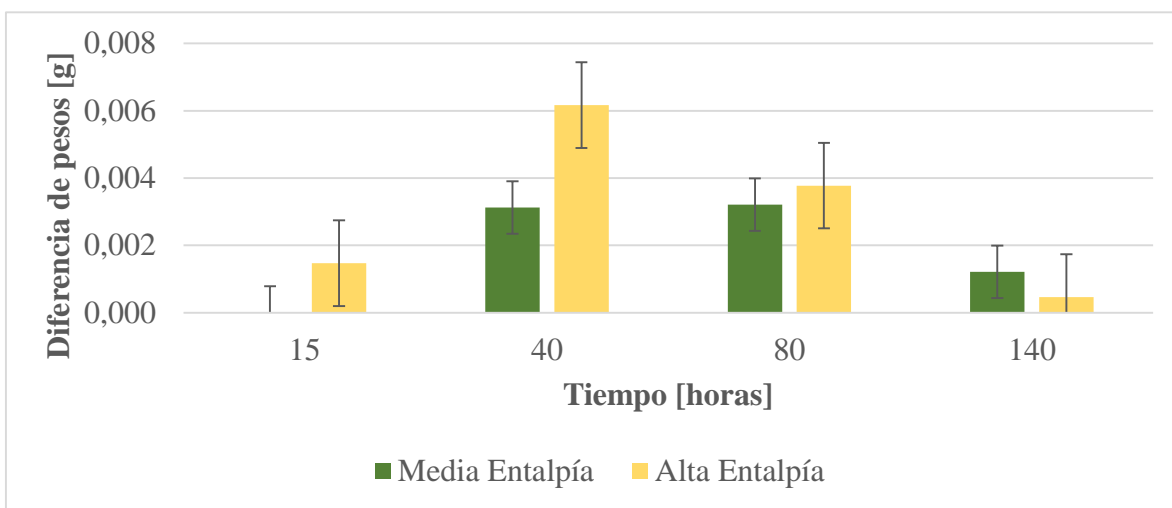
Estas muestras o cupones se prepararon bajo la Norma ASTM G1-03, con el objetivo de garantizar una superficie adecuada antes de someterlos a las condiciones establecidas para este trabajo de grado. Las pruebas realizadas en estas muestras permitieron observar y cuantificar los cambios en el acero al ser sometido a dichas condiciones.

Apéndice D. Diferencia de pesos de las muestras

Para determinar la velocidad de corrosión, se calculó la diferencia de pesos de las muestras o cupones antes y después de las pruebas de laboratorio. La Figura 17 ilustra esta variación de pesos mediante un gráfico de barras.

Figura 16

Diferencia de pesos de las muestras



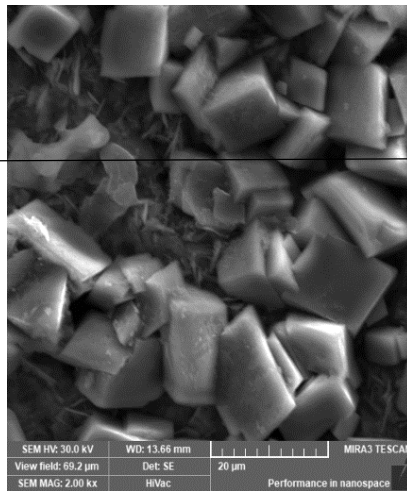
Nota. Las barras azules representan la diferencia de peso en gramos que presentaron los cupones en cuatro tiempos (15, 40, 80, 140 horas) bajo condiciones de media entalpía (150 °C). Las barras naranjas representan la misma diferencia de peso, pero para condiciones de alta entalpía (250 °C).

Apéndice E. Caracterización metalográfica

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para media y alta entalpía con tiempos de 15 y 80 horas, mediante la aplicación de espectroscopía de energía dispersa sobre la superficie del acero API N80-Q, que fue sometido a las condiciones establecidas para este trabajo de grado.

Figura 17

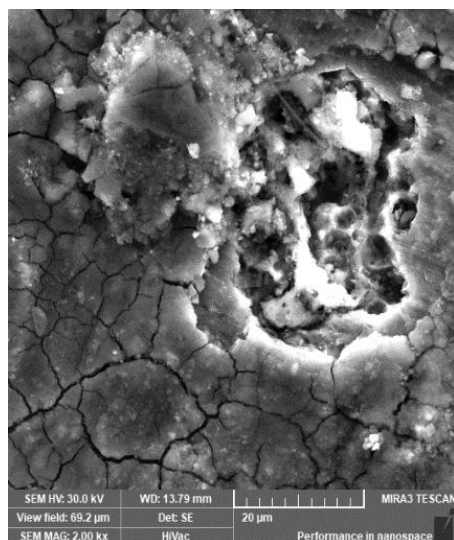
Composición química de un acero API N80-Qen contacto de con un fluido geotérmico de media entalpía durante 15 horas



Elemento	Wt%	At%
Carbono	9,52	11,61
Nitrógeno	5,20	6,65
Oxígeno	19,97	15,58
Sodio	5,21	5,16
Cromo	2,76	2,35
Níquel	54,98	56,67
Hierro	2,37	1,99

Figura 18

Composición química de un acero API N80-Qen contacto de con un fluido geotérmico de media entalpía durante 80 horas

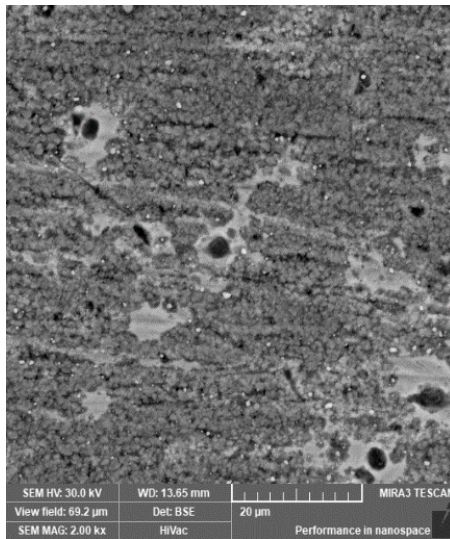


Elemento	Wt%	At%
Carbono	19,79	23,36
Nitrógeno	7,95	8,86
Oxígeno	21,49	27,72
Sodio	6,70	7,03

Cromo	2,50	2,45
Níquel	40,25	29,39
Hierro	1,31	1,18

Figura 19

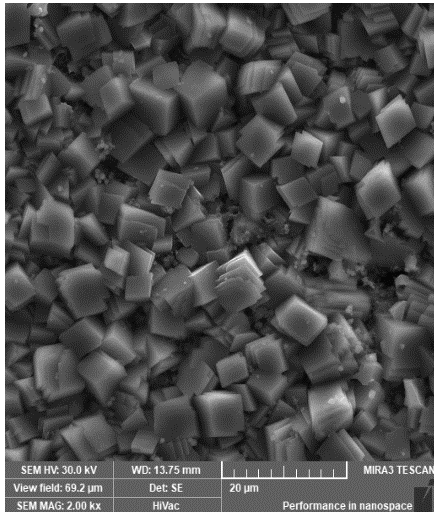
Composición química de un acero API N80-Q en contacto de con un fluido geotérmico de alta entalpía durante 15 horas



Elemento	Wt%	At%
Carbono	11,08	13,3
Nitrógeno	10,51	10,3
Oxígeno	14,64	17,56
Sodio	4,94	5,74
Cromo	2,58	2,01
Níquel	54,75	49,39
Hierro	1,49	1,7

Figura 20

Composición química de un acero API N80-Q en contacto de con un fluido geotérmico de alta entalpía durante 80 horas



Las Figuras 21 y 22, muestran los difractogramas de la superficie del acero al carbono API N80-Q en contacto con un fluido geotérmico bajo condiciones de media y alta entalpía, para tiempos de 15 y 80 horas.

Figura 21

Difractogramas de la capa pasivante formada sobre la superficie del acero API N80-Q bajo condiciones de media entalpía durante (A)15 horas y (B) 80 horas

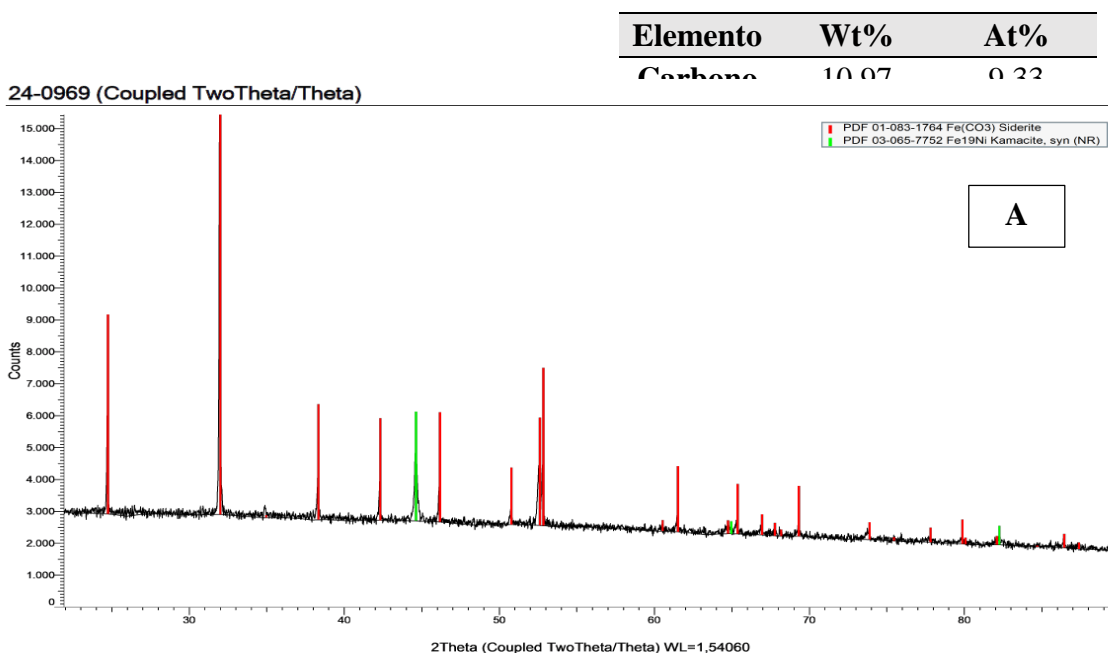
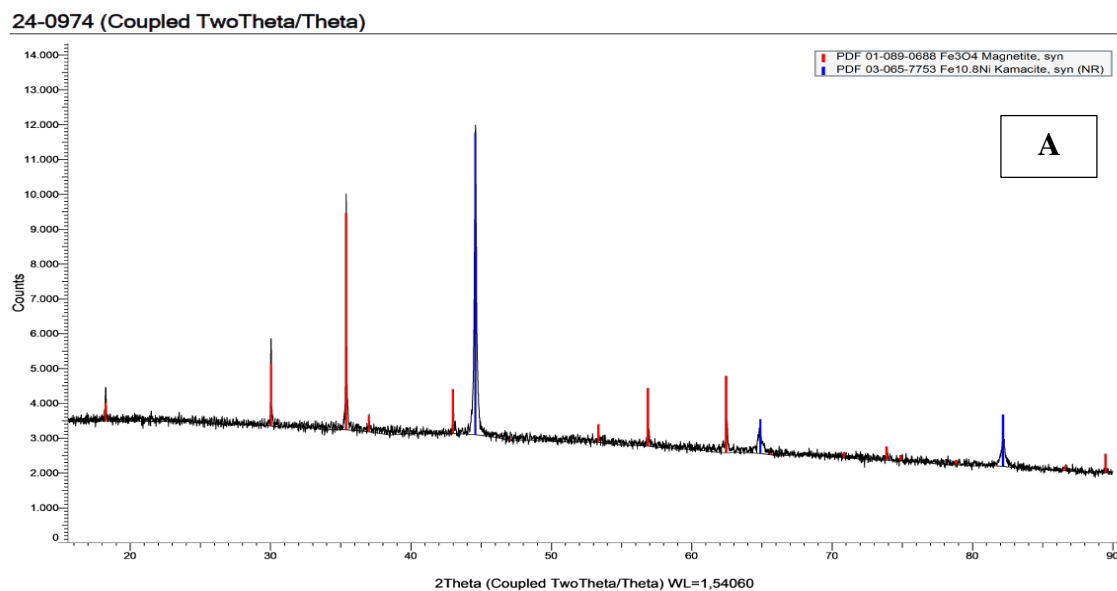


Figura 22

Difractogramas de la capa pasivante formada sobre la superficie del acero API N80-Q bajo condiciones de alta entalpía durante (A) 15 horas y (B) 80 horas



Apéndice F. Estudios científicos selección del acero al carbono**Tabla 8***Recopilación de estudios científicos para la selección del acero al carbono*

Autor(es)	Artículo Científico
(Peña, & Quintero, 2024)	Evaluación de la corrosión en el acero al carbono API N-80 bajo un ambiente de dióxido de carbono-vapor de agua en condiciones reales de operación a escala de laboratorio
(AlGaiar et al., 2024)	Enhancing Geothermal Wells Integrity: Key Considerations and Challenges from Drilling to Production
(Ura-Bińczyk et al., 2019)	On-site monitoring and laboratory characterization of corrosion processes in the geothermal water of Polish Lowland
(Nogara, & Zarrouk, 2018)	Corrosion in geothermal environment: Part 1: Fluids and their impact
(Boersheim et al., 2019)	Experimental Investigation of Integrity Issues of UGS Containing Hydrogen
(Robert, 1979)	Geothermal Well Completions: A Critical Review Of Downhole Problems And Specialized Technology Needs
(Sebestyén, 2021)	Renewable and Sustainable Energy Reviews: Environmental impact networks of renewable energy power plants
(Marbun et al., 2020)	Casing setting depth and design of production well in water-dominated geothermal system with 330 °C reservoir temperature

Nota. Estudios científicos para la selección del acero al carbono y desarrollo del presente trabajo