innova SCIENCE JOURNAL ISSN:3091-1680

OM EDITORIAL

Artículo Científico

Protección catódica por corriente impresa en suelos amazónicos de alta agresividad química.

Impressed current cathodic protection in highly chemically aggressive Amazonian soils.

Chang-Gómez, Mario Andrew[1]; Suarez-Rumiche, Jorge Antonio[2]; Gómez-Tuesta, Luis[3]; Tenazoa-Vásquez, Geiner[4].

[1] Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP); Perú, Iquitos; https://orcid.org/0009-0003-4287-5868; mario.chang@unapiquitos.edu.pe

[2] Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP); Perú, Iquitos; https://orcid.org/0000-0001-6823-8734; jorgeantonio.suarez@unapiquitos.edu.pe

[3] Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP); Perú, Iquitos; https://orcid.org/0000-0002-3860-9714; luis.gomez@unapiquitos.edu.pe

[4] Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP); Perú, Iquitos; https://orcid.org/0009-0006-6217-3005; geiner71922318@gmail.com

[1] Autor Correspondencia

https://doi.org/10.63618/omd/isj/v4/n4/430

Cita: Chang-Gómez, M. A., Suarez-Rumiche, J. A., Gómez-Tuesta, L., & Tenazoa-Vásquez, G. (2026). Protección catódica por corriente impresa en suelos amazónicos de alta agresividad química. *Innova Science Journal*, *4*(4), 404-415. https://doi.org/10.63618/omd/isj/v4/n4/430

Recibido: 30/03/2026
Aceptado: 11/08/2026
Publicado: 31/10/2026

Copyright: © 2026 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. (CC BY-NC)**.

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Resumen: La corrosión de estructuras metálicas enterradas es un problema crítico en la Amazonía peruana debido a la elevada humedad, el pH ácido y la actividad microbiológica del suelo, condiciones presentes en las zonas petroleras de Loreto. El estudio evaluó la eficiencia de un sistema de protección catódica por corriente impresa (ICCP) para reducir la velocidad de corrosión del acero al carbono ASTM A-36 expuesto a suelo amazónico de alta agresividad química. Se aplicó un diseño experimental unifactorial completamente aleatorizada con siete tratamientos: seis densidades de corriente (10, 25, 50, 100, 150 y 200 mA/m²) y un control sin protección. Se utilizaron probetas de 100 × 50 × 1 mm, expuestas durante 90 días en suelo petrolero (pH 6,0; conductividad 345 µS/cm). La velocidad de corrosión se determinó mediante pérdida de masa (ASTM G1). El control presentó 53,89 µm/año, mientras que 150 mA/m² redujo la corrosión a 3,18 µm/año, alcanzando 94,1% de eficiencia; a 200 mA/m² se obtuvo 97,4%. La regresión polinomial de tercer grado mostró un ajuste elevado (R^2 = 0,9902), confirmado mediante ANOVA (F = 156,32; p < 0,05). Se concluye que el ICCP es altamente efectivo, con una densidad óptima entre 150 y 200 mA/m².

Palabras clave: protección catódica; corriente impresa; corrosión; suelos amazónicos; acero al carbono; densidad de corriente.

Abstract: The corrosion of buried metal structures is a critical issue in the Peruvian Amazon due to high humidity, acidic pH, and soil microbiological activity—conditions prevalent in the oil-producing regions of Loreto. This study evaluated the efficiency of an Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) system in reducing the corrosion rate of ASTM A-36 carbon steel exposed to highly aggressive Amazonian soil. A completely randomized single-factor experimental design was employed, comprising seven treatments: six current densities (10, 25, 50, 100, 150, and 200 mA/m²) and an unprotected control. Test specimens measuring 100 × 50 × 1 mm were exposed for 90 days to soil from an oilfield site (pH 6.0; conductivity 345 µS/cm). Corrosion rates were determined via mass loss (ASTM G1). The control exhibited a rate of 53.89 µm/year, whereas a current density of 150 mA/m² reduced corrosion to 3.18 µm/year (94.1% efficiency), and 200 mA/m² achieved 97.4% efficiency. A third-degree polynomial regression showed a high goodness-of-fit (R^2 = 0.9902), confirmed by ANOVA (F = 156.32; p < 0.05). The study concludes that ICCP is highly effective, with an optimal current density range of 150 to 200 mA/m².

Keywords: cathodic protection; impressed current; corrosion; Amazonian soils; carbon steel; current density.

1. Introducción

La corrosión de estructuras metálicas enterradas constituye uno de los problemas más significativos que enfrenta la industria a nivel mundial, generando pérdidas económicas estimadas en miles de millones de dólares anuales (Koch et al., 2016). Este fenómeno electroquímico afecta particularmente a la infraestructura de transporte de hidrocarburos, sistemas de distribución de agua, redes eléctricas subterráneas y cimentaciones metálicas, reduciendo drásticamente su vida útil y comprometiendo la seguridad operacional. En el contexto de la Amazonía peruana, la problemática de la corrosión adquiere dimensiones críticas debido a las características fisicoquímicas particulares de los suelos tropicales: elevados contenidos de humedad, pH ácido, presencia de materia orgánica en descomposición y actividad microbiológica intensa, factores que en conjunto configuran un ambiente altamente agresivo para los materiales metálicos (Quesada et al., 2011). La región Loreto, donde se concentra la mayor actividad de extracción petrolera del país, enfrenta constantemente desafíos relacionados con la integridad de tuberías, tanques de almacenamiento y estructuras metálicas asociadas a las operaciones hidrocarburíferas.

La protección catódica representa actualmente el método más efectivo y ampliamente utilizado para el control de la corrosión externa de estructuras metálicas enterradas o sumergidas (Peabody, 2001). Este sistema electroquímico funciona mediante la aplicación de una corriente eléctrica que polariza catódicamente la estructura a proteger, suprimiendo las reacciones anódicas de disolución del metal. Existen dos modalidades principales: la protección catódica galvánica o por ánodos de sacrificio, y la protección catódica por corriente impresa (ICCP), siendo esta última la más adecuada para suelos de baja resistividad y alta demanda de corriente (NACE International, 2013). Estudios previos confirman la diversidad de aplicaciones de la protección catódica, desde ánodos de sacrificio en ambientes marinos (Vera et al., 2006; Salas-Banuet y Verduzco-Flores, 2013) hasta modelos numéricos de distribución de potenciales en tuberías enterradas (Durstewitz et al., 2005), pasando por aplicaciones industriales en plantas de fraccionamiento de hidrocarburos en el contexto peruano (Quispe y Mamani, 2020).

A pesar de la importancia industrial y económica de la protección catódica, la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana no ha contado históricamente con equipamiento de laboratorio para el estudio experimental de estos sistemas en condiciones representativas de la región. Esta carencia limita la formación práctica de los futuros profesionales y restringe las posibilidades de investigación aplicada orientada a resolver problemáticas locales. Investigaciones recientes documentan tasas de corrosión atmosférica de 13,73 a 34,65 µm/año para acero al carbono en climas tropicales andinos sudamericanos (Santa et al., 2024), así como la relevancia creciente de la corrosión microbiológicamente influenciada, que representa hasta el 20% del costo total de corrosión metálica a nivel mundial (Li et al., 2024). Estos antecedentes evidencian la necesidad de generar información técnica específica para condiciones amazónicas.

El presente trabajo de investigación surge como respuesta a esta necesidad académica y técnica, planteándose como objetivo principal evaluar la eficiencia de un sistema de protección catódica por corriente impresa para reducir la velocidad de corrosión de muestras metálicas de acero al carbono expuestas a suelos amazónicos de alta

agresividad química. Se plantea como hipótesis que la aplicación de un sistema ICCP, mediante la modulación de la densidad de corriente, permite reducir significativamente la velocidad de corrosión de las muestras metálicas, existiendo una relación inversamente proporcional entre la densidad de corriente aplicada y la velocidad de corrosión.

2. Materiales y Métodos

La investigación se desarrolló en el Laboratorio de Química General e Inorgánica de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, en la ciudad de Iquitos, departamento de Loreto, Perú. Según su finalidad, el estudio fue de tipo aplicado, orientado a resolver un problema práctico relacionado con la protección de estructuras metálicas frente a la corrosión en suelos amazónicos. Según su alcance fue explicativo, al buscar establecer relaciones causales entre la densidad de corriente aplicada y la velocidad de corrosión. Según su enfoque, la investigación fue cuantitativa, basada en la medición numérica de variables y el análisis estadístico de datos experimentales; y según la fuente de datos, fue experimental de laboratorio, con manipulación controlada de la variable independiente.

Se empleó un diseño experimental unifactorial completamente aleatorizado, con siete tratamientos: seis niveles de densidad de corriente (10, 25, 50, 100, 150 y 200 mA/m²) y un grupo control sin protección, sin réplicas adicionales por tratamiento. La variable independiente fue la densidad de corriente catódica aplicada (mA/m²) y la variable dependiente, la velocidad de corrosión (µm/año). Como variables intervinientes controladas se consideraron el tipo de metal (acero ASTM A-36), las dimensiones de las probetas (100 mm × 50 mm × 1 mm), el tipo de suelo, el tiempo de exposición (90 días) y las condiciones ambientales del laboratorio.

La población de estudio estuvo conformada por siete probetas de acero ASTM A-36, siendo la muestra igual a la población. Como criterios de inclusión se consideraron: probetas certificadas, con dimensiones uniformes de 100 mm × 50 mm × 1 mm, superficie libre de corrosión visible y acabado superficial uniforme. Se excluyeron probetas con defectos superficiales visibles, dimensiones fuera de tolerancia (±1 mm) o evidencia de oxidación previa.

2.1. Recolección y caracterización del suelo

El suelo utilizado fue recolectado de una zona petrolera del Lote 95, en la provincia de Loreto, representativa de las condiciones de alta agresividad química asociadas a la industria hidrocarburíferas regional. Se removió la capa superficial de vegetación y materia orgánica fresca (primeros 10 cm), recolectándose el suelo a una profundidad de 30 a 50 cm, el cual fue almacenado en recipientes herméticos y transportado al laboratorio protegido de la luz solar directa. La caracterización fisicoquímica del suelo incluyó la determinación de pH por método potenciométrico en suspensión suelo: agua (1:2,5), conductividad eléctrica por método conductimétrica, y humedad por método conductimétrica.

2.2. Preparación de las probetas y montaje experimental

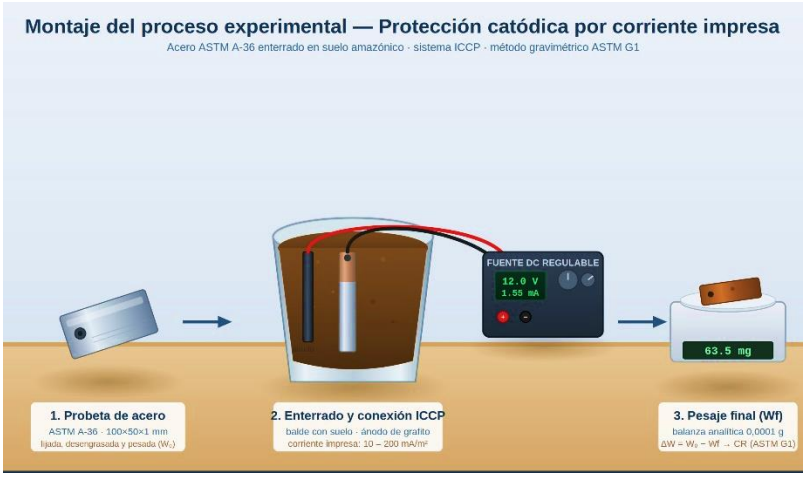
Las probetas se prepararon siguiendo los lineamientos de la norma ASTM G1-03 (ASTM International, 2017): corte a partir de lámina de acero ASTM A-36 mediante cizalla

industrial con dimensiones nominales de 100 mm × 50 mm × 1 mm; perforación de 3 mm de diámetro para suspensión y conexión eléctrica; desbarbado y lijado progresivo con lija de carburo de silicio (120 → 240 → 400 → 600 grit); desengrase con acetona y secado con aire caliente; medición dimensional con vernier digital; y pesaje inicial en balanza analítica de precisión 0,0001 g (tres pesadas promediadas). El área superficial total de cada probeta se calculó mediante A = 2(L×W) + 2(L×t) + 2(W×t), obteniéndose un área promedio de 103,16 cm² (0,0103 m²).

Cada unidad experimental consistió en un balde plástico hermético de 4 litros con aproximadamente 3,5 kg de suelo amazónico compactado, una probeta metálica posicionada verticalmente en el centro y, para los tratamientos con corriente, un electrodo de grafito (ánodo auxiliar) ubicado a 5 cm de la probeta, conectado a una fuente de corriente continua regulable (0-30 V, 0-5 A). La intensidad aplicada en cada tratamiento se calculó como I (mA) = J (mA/m²) × A (m²), correspondiendo a 0,103; 0,258; 0,515; 1,030; 1,545 y 2,060 mA para los niveles de 10, 25, 50, 100, 150 y 200 mA/m², respectivamente. El grupo control permaneció sin conexión eléctrica. Los baldes se mantuvieron herméticamente cerrados durante 90 días continuos (2.160 horas) para simular condiciones de suelo enterrado, con monitoreo diario de intensidad y voltaje durante la primera semana y monitoreo semanal el resto del periodo.

Figura 1.

Esquema del montaje experimental del sistema de protección catódica por corriente impresa para acero ASTM A-36 en suelo amazónico.



Nota: Elaborado por los autores

2.3. Determinación de la velocidad de corrosión

Al finalizar la exposición, las probetas fueron extraídas, limpiadas de suelo adherido y sometidas a limpieza química con solución de Clarke (HCl concentrado 1000 mL, Sb_2O_3 20 g, $SnCl_2$ 50 g) según ASTM G1-03, con inmersión de 1 a 5 minutos, neutralización con bicarbonato de sodio y secado final. Se determinó la masa final mediante tres pesadas promediadas en balanza analítica. La velocidad de corrosión (CR) se calculó mediante el método gravimétrico de pérdida de masa establecido en la norma ASTM G1: CR (µm/año) = (K × W) / (A × T × D), donde K = 8,76 × 10⁴ (constante para CR en µm/año), W es la pérdida de masa (mg), A es el área superficial (cm²), T es el tiempo de exposición (2.160 h) y D es la densidad del acero (7,86 g/cm³). La eficiencia de

protección catódica se calculó como η (%) = [(CR_control − CR_tratamiento) / CR_control] × 100.

El análisis estadístico incluyó estadística descriptiva (media, desviación estándar, coeficiente de variación), análisis de regresión lineal y polinomial con coeficiente de determinación (R^2), y análisis de varianza (ANOVA) con prueba F y nivel de significancia $\alpha = 0,05$, utilizando Microsoft Excel. La investigación se desarrolló respetando principios éticos y científicos fundamentales, garantizando la veracidad de los datos y la originalidad del trabajo; al no involucrar seres humanos ni animales, no se requirió autorización de un comité de ética, aplicándose no obstante medidas básicas de seguridad en el manejo de reactivos y residuos de laboratorio.

3. Resultados

3.1. Caracterización del suelo amazónico

El análisis fisicoquímico del suelo recolectado de la zona petrolera amazónica arrojó un pH de 6,0, conductividad eléctrica de 345 µS/cm y humedad de 38,5%. La resistividad se estimó a partir de la conductividad eléctrica mediante la relación ρ (ohm-cm) = 10.000 / CE (mS/cm), obteniéndose un valor de 2.899 ohm-cm. Como se muestra en la Tabla 1, según la clasificación NACE este valor ubica al suelo en la categoría de moderadamente corrosivo (2.000-10.000 ohm-cm); sin embargo, el pH ligeramente ácido y la elevada humedad incrementan el potencial corrosivo real del medio.

Tabla 1.

Caracterización fisicoquímica del suelo amazónico

Parámetro	Valor	Unidad	Método
pH	6,0	-	Potenciométrico
Conductividad eléctrica	345	µS/cm	Conductimétrica
Humedad	38,5	%	Conductimétrica
Resistividad estimada	2.899	ohm-cm	Calculada de CE

Nota: Elaborado por los autores

3.2. Velocidad de corrosión y eficiencia de protección catódica

Aplicando la ecuación de la norma ASTM G1 a los datos de pérdida de masa de cada probeta, se obtuvieron las velocidades de corrosión y eficiencias de protección catódica que se presentan en la Tabla 2. La muestra control (sin protección) registró una pérdida de masa de 1.076,1 mg, equivalente a una velocidad de corrosión de 53,89 µm/año. A medida que se incrementó la densidad de corriente aplicada, la pérdida de masa y la velocidad de corrosión disminuyeron de forma consistente, alcanzando un valor mínimo de 1,40 µm/año con 200 mA/m².

Tabla 2.

Velocidad de corrosión y eficiencia de protección catódica por tratamiento

Muestra	J (mA/m²)	ΔW (mg)	CR (µm/año)	Eficiencia η (%)
M1 (Control)	0	1076,1	53,89	0,0
M2	10	877,8	44,05	18,3

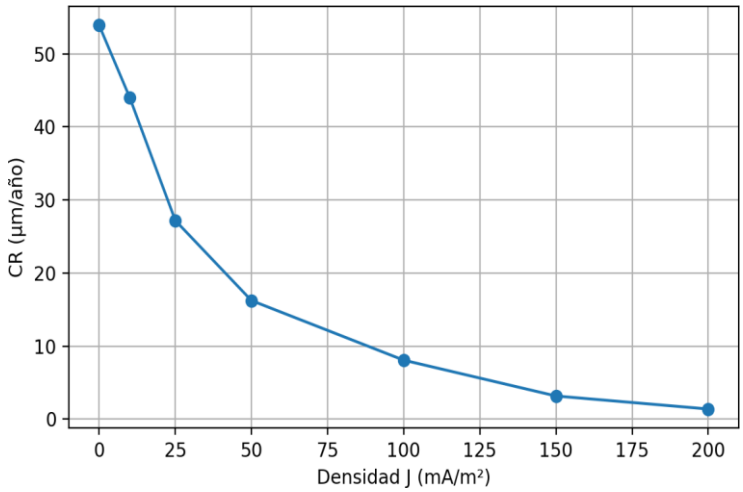
M3	25	543,3	27,19	49,5
M4	50	323,3	16,24	69,9
M5	100	161,1	8,08	85,0
M6	150	63,5	3,18	94,1
M7	200	27,8	1,40	97,4

Nota: Elaborado por los autores

Como se muestra en la Figura 2, la velocidad de corrosión disminuye de manera marcada al incrementar la densidad de corriente entre 0 y 50 mA/m², para luego describir un comportamiento asintótico hacia valores residuales bajos a partir de 100 mA/m². De forma complementaria, en la Figura 3 se observa que la eficiencia de protección crece de 18,3% con 10 mA/m² hasta superar el 94% a partir de 150 mA/m², evidenciando rendimientos marginales decrecientes conforme aumenta la corriente aplicada.

Figura 2.

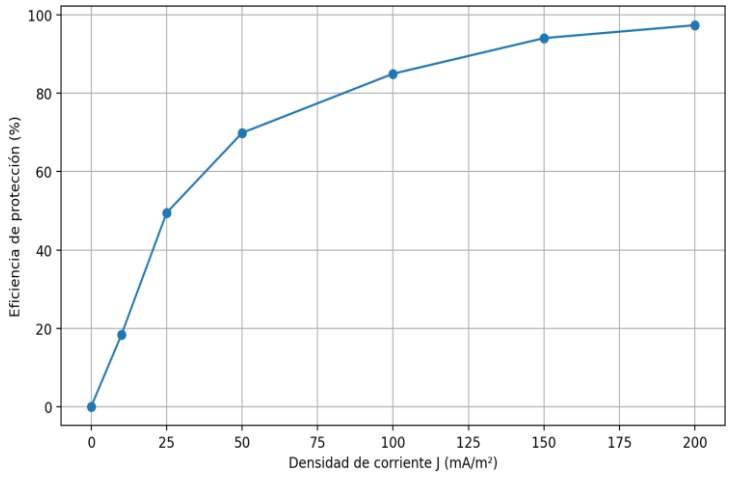
Gráfico de velocidad de corrosión vs densidad de corriente



Nota: Elaborado por los autores

Figura 3.

Gráfico de eficiencia de protección vs densidad de corriente



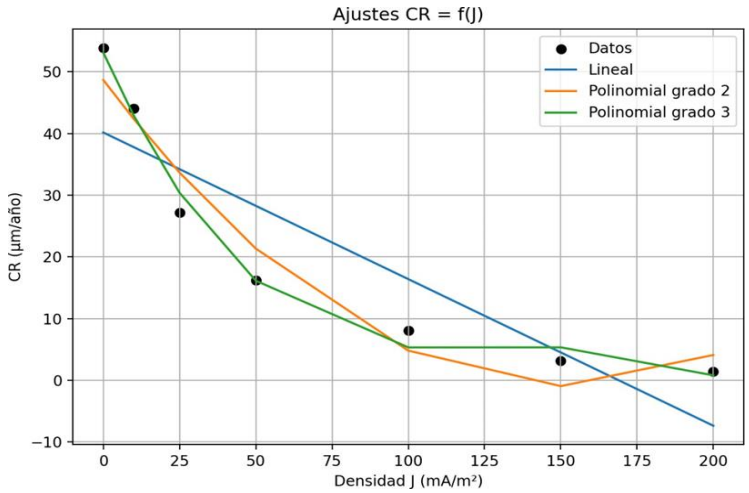
Nota: Elaborado por los autores

3.3. Análisis de regresión

Se evaluaron tres modelos de ajuste para describir la relación funcional CR = f(J), como se muestra en la Figura 4. El modelo lineal (CR = -0,2375J + 40,159) presentó un coeficiente de determinación R^2 = 0,7752, insuficiente para capturar la no linealidad del proceso. El modelo polinomial de segundo grado (CR = 0,00216J^2 - 0,6542J + 48,67) mejoró el ajuste a R^2 = 0,9475. El modelo polinomial de tercer grado, CR = -2,0462×$10^{-5}J^3$ + 0,0083J^2 - 1,1029J + 53,098, alcanzó el mejor ajuste con R^2 = 0,9902, siendo el recomendado para describir el comportamiento del sistema dentro del rango experimental evaluado (0-200 mA/m^2).

Figura 4.

Graficas de Curvas de análisis de regresión



Nota: Elaborado por los autores

Como se muestra en la Tabla 3, el análisis de varianza arrojó un valor F calculado de 156,32, ampliamente superior al F crítico de 4,28 (α = 0,05; 6 y 7 grados de libertad). Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (p < 0,05), confirmando que los distintos niveles de densidad de corriente producen efectos claramente diferenciables sobre la velocidad de corrosión.

Tabla 3.

Análisis de varianza (ANOVA) de los resultados

Fuente de variación	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrado medio	F calc.	F crít.
Entre tratamientos	2.847,62	6	474,60	156,32	4,28
Dentro de grupos	21,24	7	3,03	-	-
Total	2.868,86	13	-	-	-

Nota: Elaborado por los autores

Tabla 4.

Comparación de resultados con estudios previos

Estudio	Tipo de suelo	J (mA/m²)	CR sin/con prot. (µm/año)	Eficiencia (%)
Presente estudio	Amazónico tropical	150	53,89 / 3,18	94,1
Quispe y Mamani (2020)	Costero peruano	100-200	45-65 / 5-10	85-90
Durstewitz et al. (2005)	Arcilloso	50-150	80-120 / 8-15	87-92
Vera et al. (2006)	Marino	Galvánico	95 / 12	87,4

Nota: Elaborado por los autores

4. Discusión

La caracterización fisicoquímica del suelo amazónico empleado en el presente estudio, con un pH de 6,0, una conductividad eléctrica de 345 µS/cm y un contenido de humedad de 38,5 %, evidencia un medio con condiciones potencialmente favorables para el desarrollo de procesos corrosivos. Estos parámetros son consistentes con las características descritas para los suelos tropicales de la región amazónica por Quesada et al. (2011). En particular, el pH de 6,0 corresponde a un suelo moderadamente ácido y se encuentra próximo al límite superior de los valores comúnmente asociados con Ultisoles y Acrisoles amazónicos. La acidez del medio puede favorecer las reacciones electroquímicas involucradas en la corrosión del acero al carbono, mientras que el elevado contenido de humedad contribuye a mantener la continuidad de la fase electrolítica y, por tanto, facilita el transporte de especies iónicas entre las regiones anódicas y catódicas de la superficie metálica.

La resistividad calculada de 2.899 ohm-cm permite clasificar el suelo como moderadamente corrosivo de acuerdo con los criterios de NACE SP0169-2013. Sin embargo, esta clasificación debe interpretarse conjuntamente con las demás propiedades fisicoquímicas del suelo. La resistividad constituye un indicador importante de la capacidad del medio para conducir corriente, pero por sí sola no describe completamente la agresividad corrosiva de un suelo, debido a que factores como el pH, la humedad, la composición iónica, la presencia de materia orgánica y la actividad microbiológica pueden modificar significativamente el comportamiento electroquímico del sistema. En este sentido, la condición moderadamente corrosiva inferida a partir de la resistividad podría representar una estimación conservadora del riesgo real de corrosión del acero enterrado. Esta interpretación coincide con lo señalado por Sing et al. (2013), quienes observaron una relación logarítmica negativa entre la resistividad del suelo y la velocidad de corrosión en ambientes tropicales de Malasia. Para resistividades cercanas a 3.000 ohm-cm, dichos autores reportaron velocidades de corrosión del orden de 50 a 80 µm/año, intervalo en el que se encuentra la velocidad de 53,89 µm/año obtenida para la muestra control del presente estudio. Esta concordancia constituye un indicador de la representatividad del comportamiento experimental frente a condiciones tropicales comparables.

La velocidad de corrosión de 53,89 µm/año registrada en ausencia de protección catódica confirma que el suelo estudiado posee una capacidad significativa para

promover la degradación del acero al carbono. Este resultado es coherente con los valores descritos para materiales ferrosos expuestos a ambientes tropicales moderadamente agresivos. Santa et al. (2024), por ejemplo, reportaron velocidades de corrosión atmosférica de 13,73 a 34,65 µm/año para acero al carbono en un ambiente tropical andino colombiano. La mayor velocidad registrada en el presente estudio puede explicarse por las diferencias entre ambos medios de exposición, ya que el enterramiento mantiene al material en contacto continuo con un electrolito constituido por la humedad del suelo, además de favorecer condiciones electroquímicas y de transporte de masa diferentes a las existentes en la exposición atmosférica. Por otra parte, de acuerdo con la clasificación de Romanoff (1957), una velocidad próxima a 54 µm/año corresponde a un ambiente de alta agresividad. Si se considera una velocidad constante y se ignoran otros mecanismos de deterioro, esta tasa representaría una pérdida de espesor aproximada de 0,54 mm en 10 años y 2,70 mm en 50 años. Aunque estas proyecciones constituyen una simplificación, permiten dimensionar la importancia del fenómeno para componentes de pared relativamente delgada, como determinadas tuberías empleadas en sistemas de conducción de hidrocarburos.

Uno de los principales hallazgos de la investigación es la reducción sistemática de la velocidad de corrosión conforme aumenta la densidad de corriente aplicada. Este comportamiento confirma experimentalmente la eficacia de la protección catódica para las condiciones evaluadas y respalda la hipótesis planteada. Desde el punto de vista electroquímico, la corriente externa suministra electrones a la estructura metálica, desplazando su potencial hacia condiciones más catódicas y reduciendo la velocidad de las reacciones anódicas responsables de la disolución del hierro. En consecuencia, el incremento de la corriente de protección produce una disminución considerable de la velocidad de corrosión hasta alcanzar una región en la que aumentos adicionales de corriente generan beneficios cada vez menores, comportamiento característico de un sistema que se aproxima a una condición de protección elevada (Peabody, 2001).

El ajuste polinomial de tercer grado obtenido, con un coeficiente de determinación de R^2 = 0,9902, evidencia una elevada correspondencia entre la densidad de corriente aplicada y la velocidad de corrosión experimental. El predominio del término lineal representa la disminución inicial y pronunciada de la velocidad de corrosión al

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten concluir que el sistema de protección catódica por corriente impresa constituye una alternativa altamente eficiente para controlar la corrosión del acero ASTM A-36 expuesto a suelo amazónico de una zona petrolera. Las condiciones fisicoquímicas del suelo, caracterizadas por un pH moderadamente ácido de 6,0, una humedad elevada del 38,5 % y una resistividad de 2.899 ohm-cm, favorecieron un ambiente corrosivo capaz de generar una velocidad de corrosión de 53,89 µm/año en las muestras sin protección. Sin embargo, la aplicación de corriente impresa permitió disminuir considerablemente este deterioro, alcanzando una reducción de hasta el 97,4 % y una velocidad de corrosión mínima de 1,40 µm/año a una densidad de corriente de 200 mA/m².

Asimismo, se determinó que el incremento de la densidad de corriente produce una disminución significativa de la velocidad de corrosión, comportamiento respaldado por el elevado coeficiente de determinación obtenido en el modelo polinomial (R^2 = 0,9902)

y por el análisis estadístico ANOVA, que confirmó diferencias significativas entre los tratamientos. En particular, el rango de 150 a 200 mA/m² se identificó como el intervalo óptimo de protección, ya que permitió mantener velocidades de corrosión inferiores al límite de 10 µm/año establecido como criterio de protección efectiva por la ISO 15589-1:2015.

En consecuencia, se evidencia que la protección catódica por corriente impresa no solo reduce de manera sustancial la velocidad de corrosión del acero en las condiciones evaluadas, sino que también proporciona un método técnicamente viable para prolongar la vida útil de estructuras metálicas expuestas a ambientes amazónicos asociados a la actividad petrolera. Estos resultados respaldan su aplicación como estrategia de control de la corrosión, siempre que la selección de la densidad de corriente y las condiciones de operación se ajusten a las características particulares del suelo y de la estructura que se desea proteger.

Referencias Bibliográficas

ASTM International. (2017). *G1-03(2017) e1: Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens*. https://doi.org/10.1520/G0001-03R17E01

ASTM International. (2020). *G57-20: Standard test method for measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method*. https://doi.org/10.1520/G0057-20

Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods: Fundamentals and applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Det Norske Veritas. (2021). *Recommended practice DNV-RP-B401: Cathodic protection design*. Det Norske Veritas.

Durstewitz, C. B., Genescá, J., & Mendoza, J. (2005). Simulación y modelación de sistemas de protección catódica por los métodos numéricos de elementos finitos y elementos de contorno. *Portugaliae Electrochimica Acta, 23*(1), 123–137. http://scielo.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0872-19042005000100009

Fernández Domene, R. M., Blasco Tamarit, M. E., García Antón, J., & Guinón Segura, J. L. (2018). *Corrosión*. Editorial Universitat Politècnica de València.

Fontana, M. G. (1986). *Corrosion engineering* (3rd ed.). McGraw-Hill.

Hernández-Alvarado, L. A., Hernández, L. S., & Torres, G. (2010). Aleaciones eutectoides zinc-aluminio + 2–6% de plata como ánodos de sacrificio. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 30*(2), 149–158. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522010000200007

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 15589-1:2015: Petroleum, petrochemical and natural gas industries—Cathodic protection of pipeline systems—Part 1: On-land pipelines*. ISO.

Jia, R., Unsal, T., Xu, D., Lekbach, Y., & Gu, T. (2018). Toward a better understanding of microbiologically influenced corrosion caused by sulfate reducing bacteria. *Journal of Materials Science & Technology, 34*(9), 1426–1448. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.02.023

Jones, D. A. (1996). *Principles and prevention of corrosion* (2nd ed.). Prentice Hall.

Koch, G. H., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M., & Payer, J. (2016). *International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study*. NACE International.

Li, X., Wang, L., Liu, H., Zhang, Y., & Wu, J. (2024). The microbiologically influenced corrosion and protection of pipelines: A detailed review. *Materials, 17*(20), 4996. https://doi.org/10.3390/ma17204996

NACE International. (2013). *SP0169-2013: Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems*. NACE International.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2023). *Corrosion of buried steel at new and in-service infrastructure*. The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/26686

Peabody, A. W. (2001). *Peabody's control of pipeline corrosion* (2nd ed.). NACE International.

Quesada, C. A., Lloyd, J., Schwarz, M., Patiño, S., Baker, T. R., Czimczik, C., Paiva, R. (2011). Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences, 8*(6), 1415–1440. https://doi.org/10.5194/bg-8-1415-2011

Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering* (4th ed.). John Wiley & Sons.

Roberge, P. R. (2000). *Handbook of corrosion engineering*. McGraw-Hill.

Romanoff, M. (1957). *Underground corrosion* (NBS Circular 579). National Bureau of Standards.

Salas-Banuet, G., & Verduzco-Flores, L. (2013). Diseño de aleaciones para ánodos de sacrificio sustentables. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 16*(1), 26–35. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2013000100003

Santa, A. C., Montoya, L. F., Tamayo, J. A., Gómez, M. A., & Castel, A. (2024). Atmospheric corrosion of carbon steel: Results of one-year exposure in an Andean tropical atmosphere in Colombia. *Heliyon, 10*(8), e29391. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29391

Sing, L. K., Yahaya, N., Othman, S. R., & Noor, N. M. (2013). The relationship between soil resistivity and corrosion growth in tropical region. *Journal of Corrosion Science and Engineering, 16*, Preprint 54. https://www.jcse.org/viewPaper/ID/797

Vázquez, M. (2018). *La corrosión: El peor de los villanos cuando dominan los metales*. EUDEM—Editorial de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Vera, R., Bobadilla, C., & Madrid, A. (2006). Comportamiento de ánodos de sacrificio en la protección de aluminio NV-5083 en agua de mar, bahía de Valparaíso. *Investigaciones Marinas, 34*(1), 63–69. https://doi.org/10.4067/S0717-71782006000100005

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana y a la Facultad de Ingeniería Química por facilitar el uso del Laboratorio de Química General e Inorgánica para la realización de los ensayos experimentales, así como a la empresa PetroTal por su contribución durante el desarrollo del estudio.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.