

Impacto de estrategias de diseño y seguimiento por durabilidad en el comportamiento electroquímico y microambiental de la subestructura de un palafito de concreto reforzado expuesto a microclimas tropicales marinos por siete años.

J. A. Briceño-Mena^{1, 2} , A. A. Torres-Acosta³ ,
M. T. Castillo-Burguete⁴ , P. Castro-Borges^{1*} 

*Autor de Contacto: pcastro@cinvestav.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i2.1040>

Recibido: 04/03/2026 | Correcciones recibidas: 15/04/2026 | Aceptado: 17/04/2026 | Publicado: 01/05/2026

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue analizar el impacto de estrategias de diseño y seguimiento por durabilidad en los resultados electroquímicos y microambientales internos al nivel del refuerzo de algunas columnas, obtenidos durante siete años en la quinta generación de la subestructura de un palafito prefabricado, según criterios que dieron lugar, en su momento, a las normas NMX-530-ONNCCE-2018 y NMX-569-ONNCCE-2020 sobre durabilidad. Los resultados mostraron que, aunque los elementos están completamente pasivos, las estrategias de diseño, construcción y seguimiento permitieron observar con claridad la influencia de cada microambiente en las tendencias electroquímicas. Ello permitirá diseñar estrategias ad hoc y económicas para el mantenimiento preventivo, así como facilitar la recalibración de las proyecciones de vida de servicio según cada microambiente.

Palabras clave: corrosión; durabilidad; infraestructura; diseño; palafito.

Citar como: Briceño-Mena, J. A., Torres-Acosta, A. A., Castillo-Burguete, M. T., Castro Borges, P. (2026), "Impacto de estrategias de diseño y seguimiento por durabilidad en el comportamiento electroquímico y microambiental de la subestructura de un palafito de concreto reforzado expuesto a microclimas tropicales marinos por siete años", Revista ALCONPAT, 16 (2), pp. 239 – 259, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i2.1040>

¹ Departamento de Física Aplicada, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, Mérida, México.

² Investigador por México, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, Ciudad de México, México.

³ Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores, Tecnológico de Monterrey, Campus Querétaro, Querétaro, México.

⁴ Departamento de Ecología Humana, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, Mérida, México.

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor JABM contribuyó con la experimentación (60 %), análisis de datos (50 %), escritura del primer borrador (100 %) y discusión de resultados (40 %). El autor AATA contribuyó con la idea original (30%), el desarrollo de especificaciones y diseño estructural del palafito (70 %), análisis de datos (10%), discusión de resultados (20%) y revisión del manuscrito (20%). La autora MTCB contribuyó con la idea original (20 %), y la revisión del manuscrito (30 %). El autor PCB contribuyó con la idea original (50 %), desarrollo de especificaciones y diseño estructural (30%), experimentación (40%), análisis de datos (40%) discusión de resultados (40 %) y revisión del escrito (50 %).

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2026) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Impact of design and durability monitoring strategies on the electrochemical and microenvironmental behavior of the substructure of a reinforced concrete stilt house exposed to marine tropical microclimates for seven years.

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the impact of design and durability monitoring strategies on the internal electrochemical and microenvironmental results, at the level of the reinforcement of some columns, obtained during seven years in the fifth generation of the substructure of a prefabricated stilt house, according to criteria that gave rise, at the time, to the NMX-530-ONNCCE-2018 and NMX-569-ONNCCE-2020 standards on durability. The results showed that, although the elements are completely passive, the design, construction, and monitoring strategies allowed to clearly see the influence of each microenvironment on electrochemical trends. This will allow the design of ad hoc and economical strategies for preventive maintenance, as well as facilitate the recalibration of service life projections according to each microenvironment.

Keywords: corrosion; durability; infrastructure; design; stilt house.

Impacto das estratégias de projeto e monitoramento da durabilidade no comportamento eletroquímico e microambiental da subestrutura de uma casa de estacas de concreto armado exposta a microclimas tropicais marinhos por sete anos.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi analisar o impacto das estratégias de projeto e monitoramento de durabilidade nos resultados eletroquímicos e microambientais internos, no nível do reforço de algumas colunas, obtidos durante sete anos na quinta geração da subestrutura de uma casa pré-fabricada sobre estacas, segundo critérios que deram origem à época, até os padrões NMX-530-ONNCCE-2018 e NMX-569-ONNCCE-2020 sobre durabilidade. Os resultados mostraram que, embora os elementos sejam completamente passivos, as estratégias de design, construção e monitoramento permitiram ver claramente a influência de cada microambiente nas tendências eletroquímicas. Isso permitirá o desenho de estratégias ad hoc e econômicas para manutenção preventiva, além de facilitar a recalibração das projeções de vida útil de acordo com cada microambiente.

Palavras-chave: corrosão; durabilidade; infraestrutura; projeto; casa sobre palafitas.

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2017 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2016.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

Impacto de estrategias de diseño y seguimiento por durabilidad en el comportamiento electroquímico y microambiental de la subestructura de un palafito de concreto reforzado expuesto a microclimas tropicales marinos por siete años.

1. INTRODUCCIÓN

Las regiones costeras del Golfo de México se han convertido en escenarios críticos ante la intensificación de fenómenos meteorológicos extremos (*Huracanes - Corescam*, n.d.). Huracanes, tormentas tropicales e inundaciones provocadas por el ascenso de las mareas (“Aumento de Las Temperaturas,” 2019) representan amenazas constantes para la seguridad y el bienestar económico de las comunidades que habitan estas zonas. En este contexto, las zonas costeras del Golfo de México presentan un laboratorio natural para el estudio de la patología de la construcción y el control de calidad, donde la interacción permanente entre materiales estructurales y un ambiente marino altamente agresivo caracterizado por elevadas concentraciones de cloruros y niveles de humedades relativas superiores al 80% y las oscilaciones térmicas diarias, promueven procesos electroquímicos agresivos, lo que exige soluciones técnicas fundamentadas en evidencia científica (Torres-Acosta & Martínez-Madrid, 2003).

Frente al desafío de las construcciones actuales, en las que los fenómenos naturales ponen en riesgo su integridad, desde hace más de 20 años, la comunidad de San Crisanto en Yucatán ha sido pionera en la implementación de soluciones innovadoras en materia de construcción (Briceño-Mena et al., 2024; Castro-Borges et. al., 2011). En respuesta a las condiciones agresivas del entorno, se desarrolló un proyecto en el que se diseñaron y construyeron palafitos de concreto reforzado, cuyos diseños se fueron perfeccionando a lo largo de cinco generaciones. Este proyecto, impulsado por Cinvestav-Universidad Mérida, en colaboración con instituciones como Cemex, Galvex y las Facultades de Arquitectura e Ingeniería Civil de la UADY, buscó no solo resistir la corrosión inducida por el ambiente, sino también optimizar la durabilidad de estas estructuras mediante estrategias de ingeniería.

Si bien se sabe que los elementos de una estructura están sujetos a microclimas tropicales marinos de esta zona, hasta la fecha no se han realizado trabajos que desenmascaren las contribuciones de cada microclima a dichos elementos. Esa información, si estuviese disponible, permitiría implementar estrategias de prevención de daño ad-hoc a la influencia de cada microclima y a cada tipo de elemento estructural, permitiendo ahorros económicos claros en el mantenimiento preventivo en cuanto a los materiales y sistemas para controlar los efectos de cada microclima.

El diseño de estos palafitos se fundamenta en el uso de zapatas encajonadas, pilas, columnas, losas y trabes de concreto reforzado, elementos sometidos a constantes agresiones de los microambientes tropicales marinos. Por ello, es fundamental comprender y evaluar el comportamiento electroquímico y ambiental de sus componentes, en especial en lo que respecta a la velocidad y potencial de corrosión, la resistividad eléctrica (Broomfield, 2023; Cao et al., 2019), así como la temperatura y humedades internas al nivel del refuerzo.

Los palafitos fueron diseñados y construidos bajo el paraguas de lo que hoy son las normas NMX-C-ONNCCE 530 y 569. Con el fin de obtener una visión integral del desempeño de estas estructuras, se implementó un sistema de monitoreo durante siete años que incluyó mediciones periódicas de la humedad relativa y de la temperatura interna del concreto al nivel del refuerzo, parámetros ambientales críticos. Este enfoque permitió analizar en detalle la interacción estructura-microambiente en relación con los procesos de degradación, así como la eficacia y la eficiencia de las estrategias constructivas aplicadas para prolongar la vida de servicio de los palafitos. Algunas de estas estrategias fueron el tipo de prefabricación, los espesores de recubrimiento, la orientación de los elementos estructurales, el seguimiento de variables climáticas y electroquímicas en secciones definidas en cuanto a geometría, alturas y posicionamiento de vigas y columnas.

En resumen, el objetivo de este trabajo fue analizar parte de los resultados electroquímicos y microambientales de algunas columnas obtenidos de la quinta generación de la subestructura de palafitos prefabricados, en función de estrategias de diseño específicas basadas en durabilidad.

2. METODOLOGÍA

2.1 Detalles constructivos.

La subestructura del proyecto se compone de elementos prefabricados como traveses, columnas y dados de cimentación, elaborados en una planta industrial ubicada en Mérida, a 30 km de la línea de costa. Este enfoque de prefabricación permite el control de calidad en cada fase de la producción, lo cual resulta esencial para garantizar un buen desempeño estructural en entornos marinos severos. La producción industrial, combinada con una planificación en sitio, permite que cada componente cumpla con las especificaciones técnicas y de durabilidad requeridas para enfrentar las adversas condiciones ambientales del Golfo de México.

2.1.1 Instalación de dispositivos integrados (fitters).

Para monitorear con precisión las condiciones internas del concreto, se han desarrollado e integrado dispositivos denominados "fitters". Estos dispositivos, de diseño propio, se incorporaron estratégicamente en las columnas y las traveses de la subestructura, sin alterar las propiedades físicas ni la integridad estructural del elemento. Estos dispositivos permiten evaluar parámetros críticos como la temperatura, la humedad relativa y la actividad de corrosión sin necesidad de realizar procedimientos destructivos, proporcionando datos fundamentales para el análisis de la durabilidad.

La instalación de los fitters se realizó en dos etapas principales: primero, se fijaron directamente a la armadura de los elementos estructurales antes de ser ubicados en las cimbras. Este procedimiento asegura un contacto óptimo con el acero de refuerzo, lo que permite medir con precisión el comportamiento electroquímico. Una vez instalados, los elementos prefabricados con los fitters incorporados se colocaron en cimbras y se procedió al colado del concreto, procurando que estos sensores quedaran perfectamente encapsulados, sin generar vacíos ni interferencias. Tras el fraguado, se verificó la correcta integración de los dispositivos (Briceño-Mena et al., 2024). El uso de fitters no solo ha permitido comprender el comportamiento de las estructuras en ambientes tropicales marinos, sino que también ha sentado las bases para estrategias de monitoreo continuo en tiempo real. Este enfoque puede replicarse en otros proyectos de infraestructura costera, asegurando un diseño más resiliente y adaptado a las condiciones específicas de cada entorno. La Figura 1 muestra la disposición final de los fitters en una columna tipo.

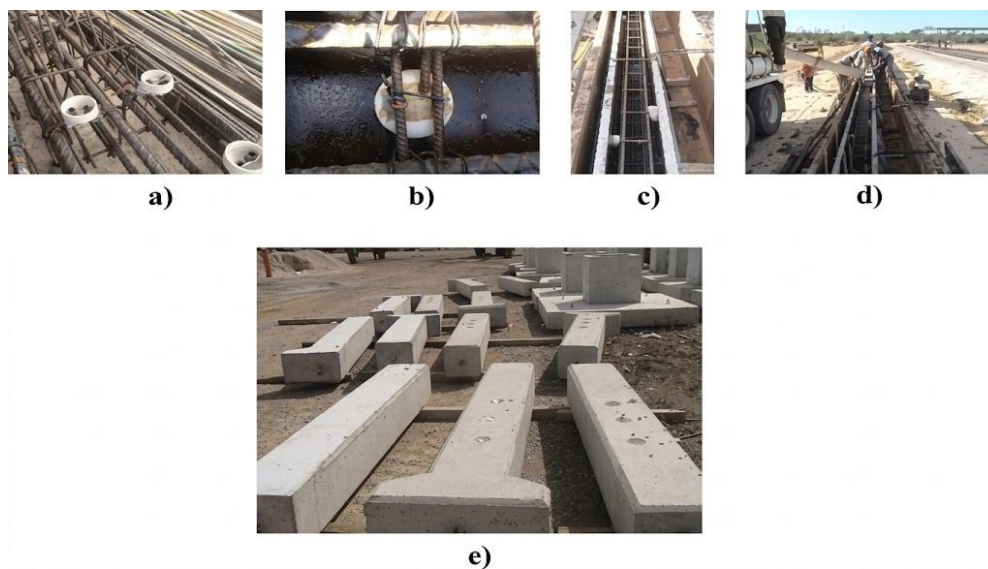


Figura 1. Instalación de Fitters.

Para garantizar que las mediciones sean representativas, los fitters se colocaron a alturas de 40 cm, 80 cm y 110 cm sobre el Nivel de Piso Terminado (NPT). Además, se ubicaron seis puntos de medición en cada columna: tres en la barra Oeste y tres en la barra Este. Estos puntos estratégicos permiten obtener un perfil de la variación de la corrosión a lo largo de la estructura, lo cual es crucial para identificar las áreas más vulnerables y aplicar medidas preventivas. En este trabajo se presenta el caso de las columnas. La Figura 2 muestra las ubicaciones de los fitters. Es importante resaltar que las caras de estudio de las columnas A, B y C se encontraban bajo resguardo por la losa de la estructura; y las caras de estudio de las columnas D, E y F se encontraban a la intemperie.

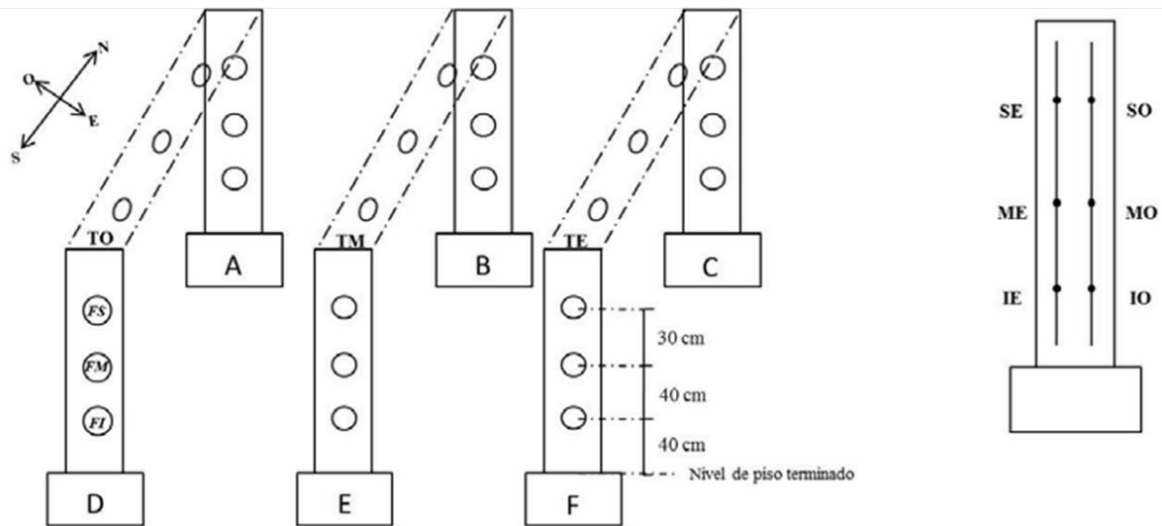


Figura 2. Croquis de la subestructura tipo palafito

2.2 Técnicas de medición

El monitoreo sistemático de los parámetros, tanto electroquímicos como ambientales, es fundamental para comprender el estado de la subestructura de concreto reforzado y detectar de forma temprana los procesos de corrosión inducidos por el entorno marino. Con este propósito, se estableció un plan de medición periódico, en general, cada tres meses, aunque en ocasiones se ampliaron los intervalos debido a condiciones externas. Antes de evaluar los indicadores electroquímicos, se registraron, en primer lugar, los parámetros ambientales, ya que la humedad y la temperatura inciden de manera directa en la velocidad de corrosión. Además, se humectaron las superficies de medición para evitar que la sequedad altere los resultados. Para realizar estas mediciones se empleó un corrosímetro comercial, el Gcorr 6, que utiliza la técnica de resistencia a la polarización (Andrade & Alonso, 2004; Feliu et al., 2007; Trocónis de Rincón et al., 1997). Este equipo se posicionó estratégicamente en cada elemento estructural, asegurando que los datos fueran representativos.

2.2.1 Parámetros electroquímicos

El conjunto de mediciones electroquímicas permite obtener información precisa sobre el comportamiento del acero de refuerzo y la integridad del concreto (Ramón et al., 2021; Xia et al., 2022).

2.2.1.1 Potencial de corrosión (E_{corr})

El potencial de corrosión (E_{corr}) es un parámetro clave para evaluar la probabilidad de corrosión en las armaduras embebidas en el concreto. Este potencial, medido con respecto a un electrodo de referencia, proporciona información sobre el estado del acero de refuerzo, aunque este valor, por sí solo, no indica la velocidad de corrosión. Es una herramienta diagnóstica fundamental que debe Impacto de estrategias de diseño y seguimiento por durabilidad en el comportamiento electroquímico y microambiental de la subestructura de un palafito de concreto reforzado expuesto a microclimas tropicales marinos por siete años.

interpretarse en función de las condiciones ambientales, como la humedad, la contaminación y la calidad del concreto. En el contexto del ambiente costero, donde la estructura está expuesta a alta salinidad y fluctuaciones de temperatura, el E_{corr} se convierte en un indicador esencial para determinar zonas críticas que requieren mantenimiento preventivo. Los criterios de evaluación de E_{corr} se pueden observar en la Tabla 1:

Tabla 1. Criterios de evaluación del potencial de corrosión (E_{corr}) (NMX-C-495-ONNCCE-2015, reprobada en 2021)

E_{corr} (mV vs Cu/CuSO ₄)	Descripción
> -200	10 % de probabilidad de corrosión
-200 - -350	Incertidumbre
-350 - -500	90% de probabilidad de corrosión
< -500	Corrosión severa

2.2.1.2 Velocidad de corrosión (i_{corr})

La velocidad de corrosión (i_{corr}) es uno de los parámetros más críticos para evaluar el deterioro del acero de refuerzo. Este valor, medido en microamperios sobre centímetro cuadrado ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (Andrade & Alonso, 1996), indica la rapidez con que el acero pierde material debido a la corrosión, lo que permite estimar la vida útil restante de la estructura. En ambientes marinos, como el del Golfo de México, la presencia de cloruros y la humedad elevada pueden incrementar significativamente la velocidad de corrosión. En condiciones reales, valores superiores a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ya se consideran elevados y pueden reducir la vida útil de la estructura. A continuación, en la Tabla 2, se presentan los criterios para evaluar la velocidad de corrosión.

Tabla 2. Criterios de evaluación de la velocidad de corrosión (i_{corr}) (NMX-C-501-ONNCCE-2015, 2015).

Velocidad de corrosión		Nivel de corrosión	Estado del concreto
($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	($\mu\text{A}/\text{año}$)		
< 0.1	< 1	Despreciable	Concreto seco o no carbonatado
0.1 – 0.5	1 – 5	Bajo	Concreto saturado o ligeramente húmedo, carbonatado o con cloruros
0.5 – 1.0	5 – 10	Moderado	Concreto con alto contenido de humedad, carbonatado o con cloruros
> 1.0	> 10	Alto	Concreto muy contaminado con cloruros

2.2.1.3 Resistividad eléctrica (ρ)

La resistividad eléctrica (ρ) del concreto es otro indicador importante, mide la capacidad del concreto para resistir el flujo de corriente eléctrica, está directamente relacionado con su porosidad y capacidad de transportar agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Una baja resistividad indica un mayor riesgo de corrosión, ya que facilita el transporte de cloruros y agua hacia el refuerzo. Aunque no existe un consenso general sobre el límite exacto de resistividad por debajo del cual el riesgo de corrosión es despreciable, en la práctica se utiliza la clasificación de la Tabla 3 como referencia:

Tabla 3. Criterios de evaluación de resistividad eléctrica (ρ) (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019).

Resistividad (k Ω cm)	Probabilidad de corrosión
> 100 - 200	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy bajas, independientemente del contenido de cloruros o del nivel de carbonatación. No existe distinción entre acero en estado activo o pasivo.
50 - 100	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos al acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son bajas.
10 a 50	El concreto tiene una porosidad interconectada de consideración, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros.
< 10	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea extremadamente rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy altas en concretos carbonatados o con cloruros. La resistividad no es el parámetro que controla el proceso de corrosión. El valor de la velocidad de corrosión obtenido con la NMX-C-501-ONNCCE-2015 refleja la cota superior de la velocidad de corrosión en ese concreto para un determinado contenido de cloruros o nivel de carbonatación.

2.2.1.4 Parámetros ambientales del concreto

La evaluación de los parámetros ambientales, como la humedad relativa y la temperatura interna del concreto, son indispensables para comprender la dinámica de corrosión. En zonas costeras, estas variables se encuentran sujetas a fluctuaciones significativas que afectan directamente la estabilidad del concreto y la integridad del acero de refuerzo (Bouteiller et al., 2012; Chauhan & Sharma, 2019; Villagrán Zaccardi et al., 2013). Para dichos análisis se empleó un sensor digital de la marca Vaisala, el cual mide con precisión la humedad y la temperatura a una profundidad de 6 cm dentro del concreto. La sonda se insertó en los fitters, de manera que las mediciones reflejen las condiciones reales del interior del concreto, sin verse afectadas por las condiciones externas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Durante los siete años de seguimiento de la subestructura palafítica, los parámetros electroquímicos y ambientales revelaron datos clave sobre su desempeño, lo que permitió observar comportamientos consistentes con elevados niveles de durabilidad. Los datos obtenidos demuestran la efectividad del diseño y de los materiales empleados para resistir las condiciones agresivas del ambiente tropical marino del Golfo de México.

3.1 Potencial de corrosión (E_{corr})

Los valores de E_{corr} de la Figura 3 oscilaron entre +150 mV y -150 mV (vs Cu/CuSO₄), ubicándose consistentemente en el rango de < 10 % de probabilidad de corrosión según los criterios de la NMX-C-495-ONNCCE-2015 (reaprobada 2021). La disposición, como se muestra en la Figura 2, corresponde a las columnas A, B y C ubicadas en el norte, y a las columnas D, E y F ubicadas al

sur. La columna A presentó los valores puntuales más negativos (-150 mV) al inicio de la exposición y al final del período estudiado, mientras que la columna C registró de manera constante valores entre -50 mV y -120 mV, sin superar el umbral de incertidumbre de la norma. En caso contrario, la columna D, expuesta a la intemperie, presentó los valores puntuales más positivos, lo que sugiere una mayor pasivación del acero que podría deberse a una exposición prolongada al proceso de secado. (Bouteiller et al., 2012). Si bien lo anterior podría asociarse a condiciones ambientales que favorecen la pasivación del acero, para ello es necesario utilizar una interpretación conjunta de la velocidad de corrosión y la resistividad que permita observar con mayor precisión la termodinámica y la cinética del proceso de corrosión.

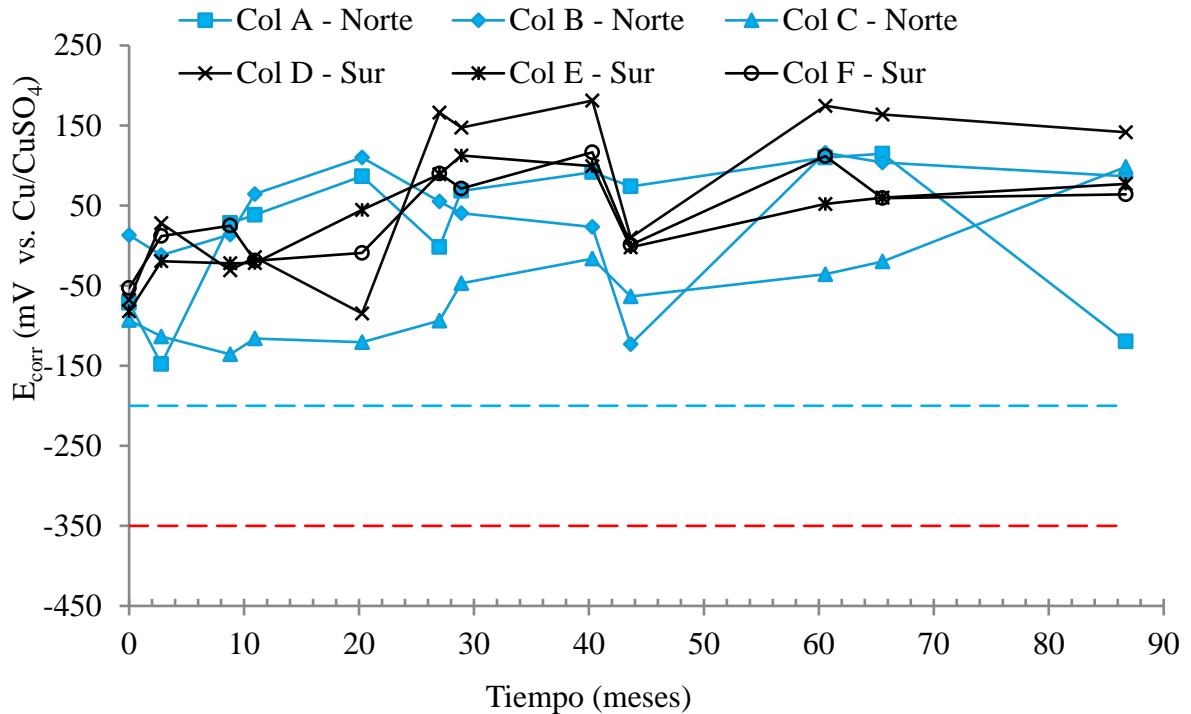


Figura 3. E_{corr} vs. tiempo

Debido a que el potencial de corrosión es un parámetro que indica la probabilidad de que ocurra corrosión, las mediciones puntuales pueden dar una idea del comportamiento electroquímico que deben ser complementada con otras técnicas o estrategias de análisis. Para ayudarnos a discernir los resultados, se recurrió a una gráfica acumulada, como se presenta en la Figura 4, la cual es una herramienta cualitativa (Briceño-Mena et al., 2025), que en presencia de una gran cantidad de datos podría utilizarse con criterios estadísticos como los utilizados en la recomendación técnica RILEM (RILEM TC-154 ECM, 2024). Esta figura nos muestra cómo es que un elemento con potenciales puntuales más negativos no está con probabilidad de corrosión comparada con aquellos que tienen un comportamiento uniforme con el paso del tiempo (Chauhan & Sharma, 2019), tal es el caso de la columna C que tiene una tendencia acumulada marcada a valores negativos, pero estables.

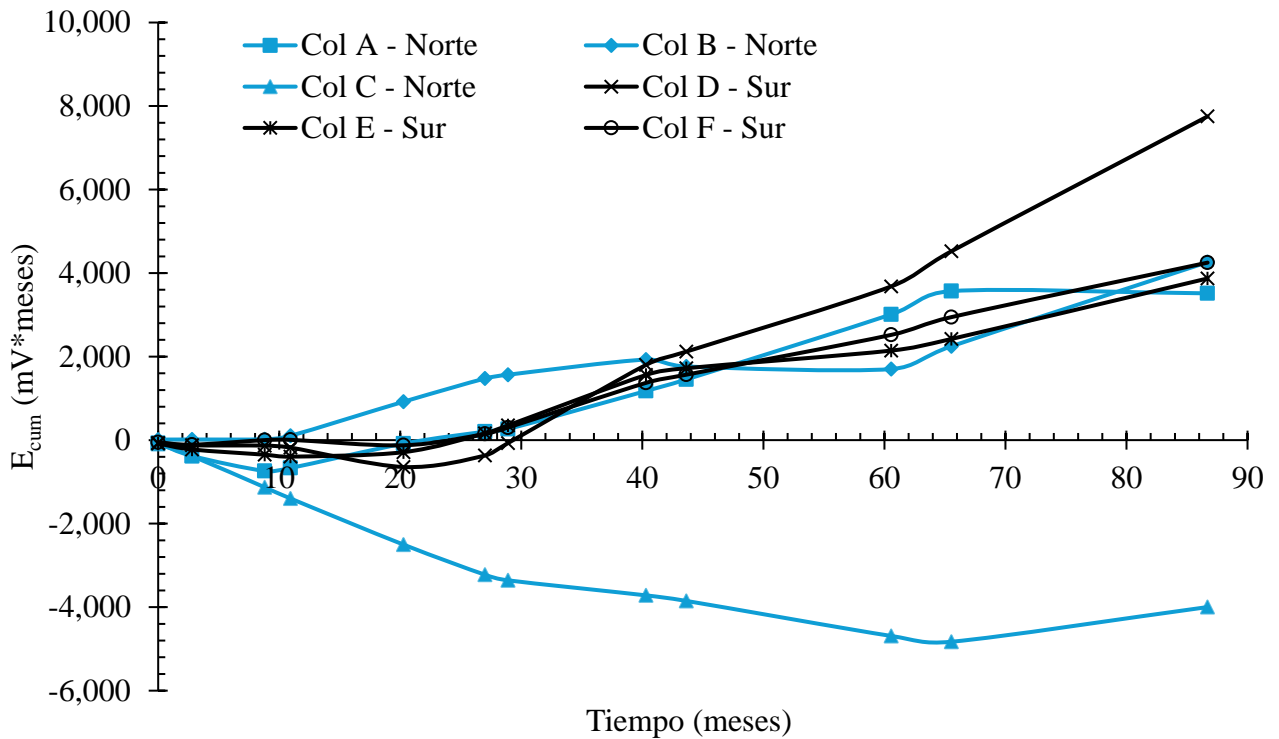
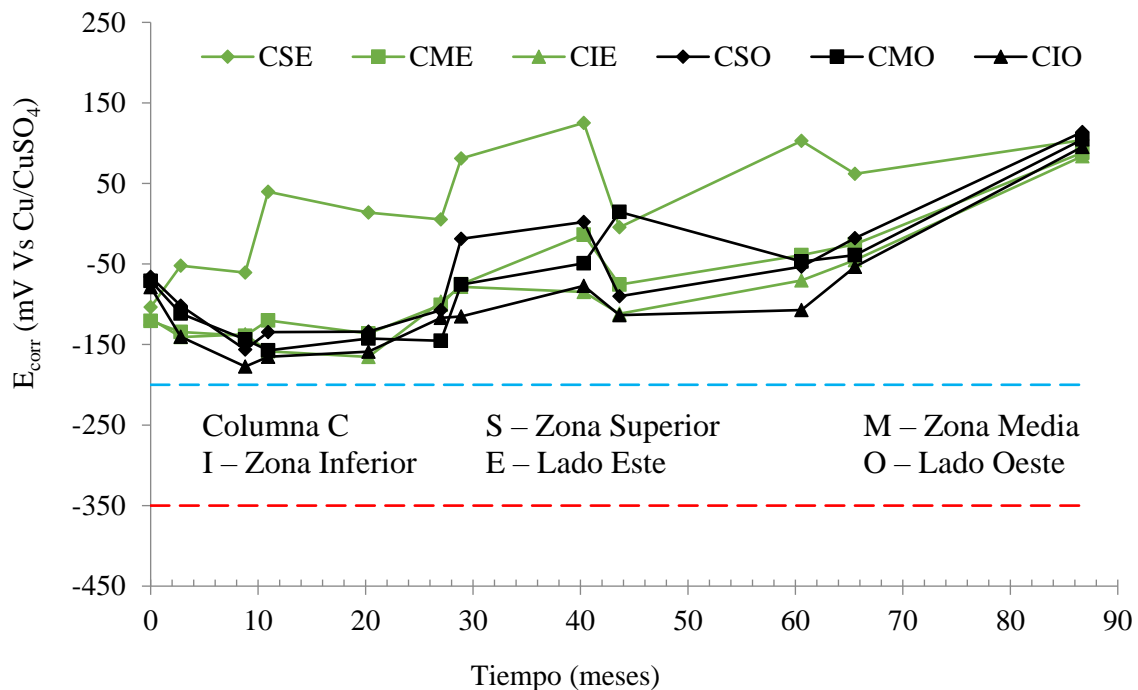


Figura 4. E_{cum} vs. tiempo

Por otro lado, en cuanto a la altura y la orientación de las columnas, la Figura 5 presenta los resultados individuales de las columnas C, ubicada en el Norte, y D, ubicada en el Sur. Se puede observar en la Columna C que, a excepción de la medición realizada en el lado Este de la parte superior, la mayoría de los datos se conservan en niveles más negativos sin llegar a los umbrales, por lo que no se estaría presentando corrosión. En la columna D, la distribución de los datos es similar en todos los puntos de medición.



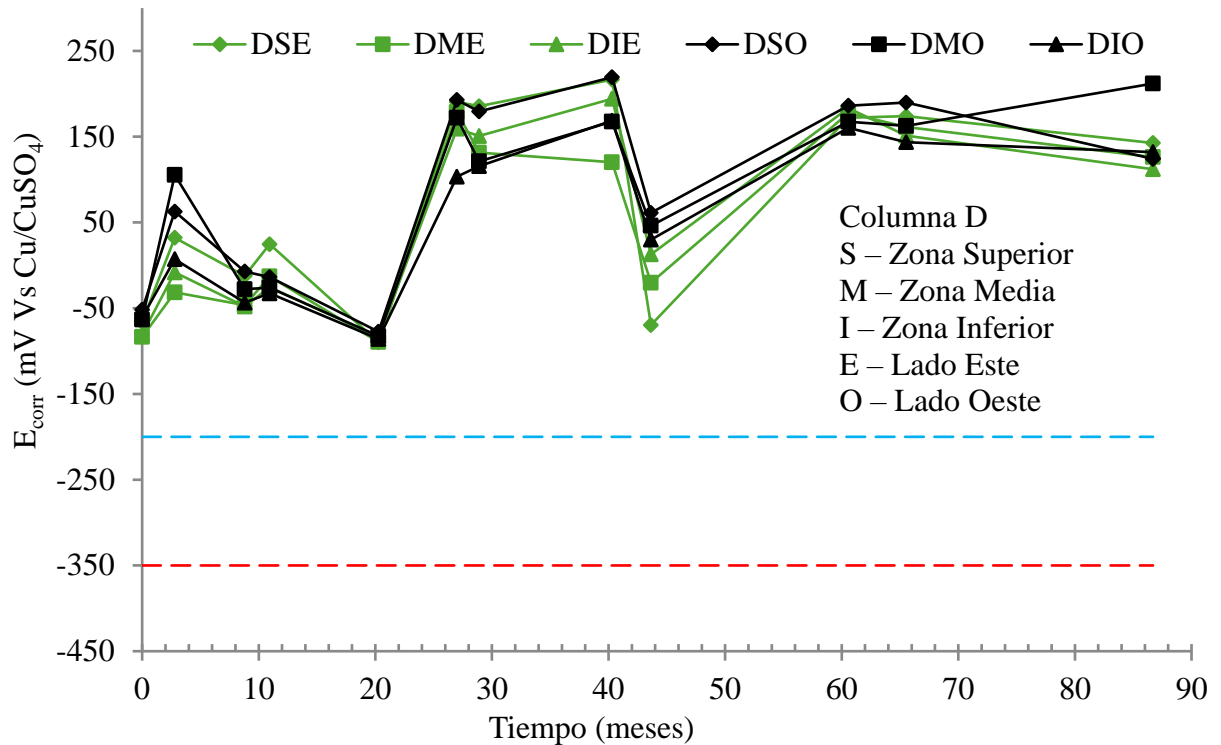


Figura 5. E_{corr} vs. tiempo de las columnas C y D.

El análisis exhaustivo del potencial de corrosión está mostrando, de acuerdo con los criterios de la NMX-530-ONNCCE-2018 y la NMX-495-ONNCCE-2015 (reaprobada en 2021) que después de 7 años frente a un ambiente tropical marino de la Península de Yucatán se tiene un mantenimiento estable para todos los casos en la zona de pasividad, a verificar con otras técnicas, debido a los posibles cambios termodinámicos en el comportamiento electroquímico que pudiesen no estar de acuerdo con los cambios cinéticos.

3.2 Velocidad de corrosión (i_{corr})

Las velocidades de corrosión general variaron entre $0.003 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, clasificadas como despreciables según la NMX-C-501-ONNCCE-2015, como se puede apreciar en la Figura 6. Las columnas F y D alcanzaron sus valores máximos ($0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) sin comprometer la integridad del refuerzo, debido a la tendencia general del estudio. Por otro lado, la columna B alcanzó el menor valor, aunque de forma aislada, a diferencia de la columna C, que presenta un comportamiento constante.

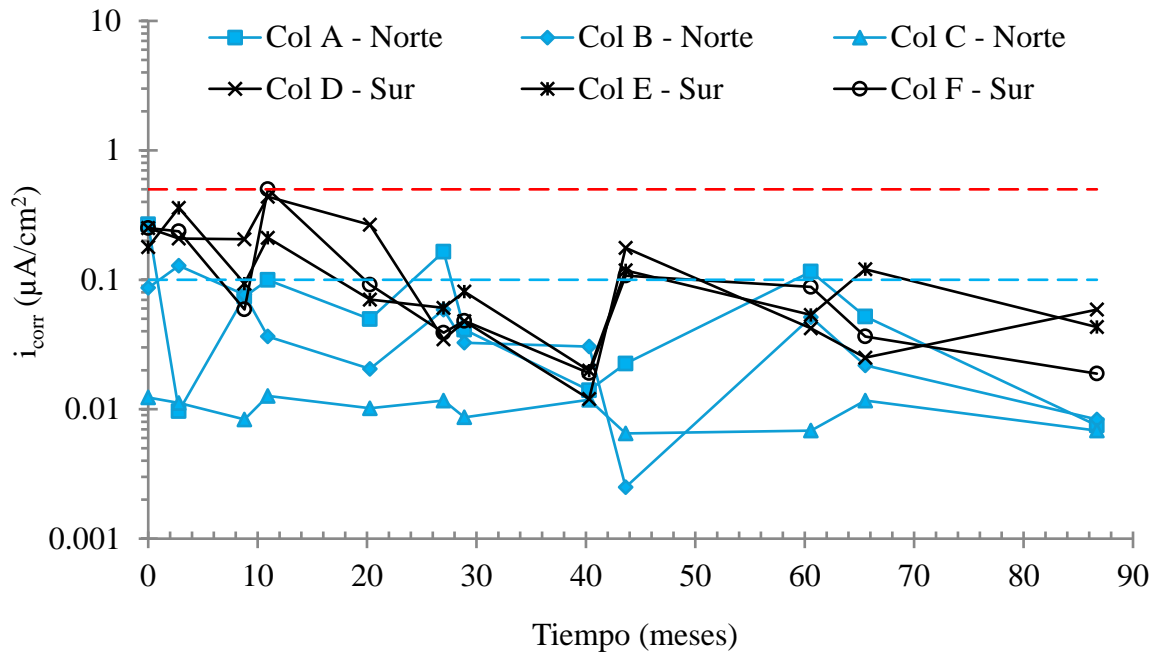


Figura 6. i_{corr} vs. Tiempo.

La figura anterior presenta una variación de los datos, por lo que para poder hacer un mejor análisis se utiliza la velocidad de corrosión acumulada (Figura 7) (Andrade et al., 2012; Castro-Borges et al., 2013, 2017). En esta figura se puede apreciar una clara diferencia entre las columnas ubicadas al Norte y al Sur, donde las expuestas a la intemperie, al Sur, presentan mayores velocidades de corrosión. La D es la más desfavorable, ya que en sus primeros 20 meses se observó un cambio en la pendiente, más positivo, que luego se estabilizó, lo que indica que aún no se presentan procesos corrosivos. En caso contrario, las columnas al Norte presentan un comportamiento estable durante el lapso de estudio.

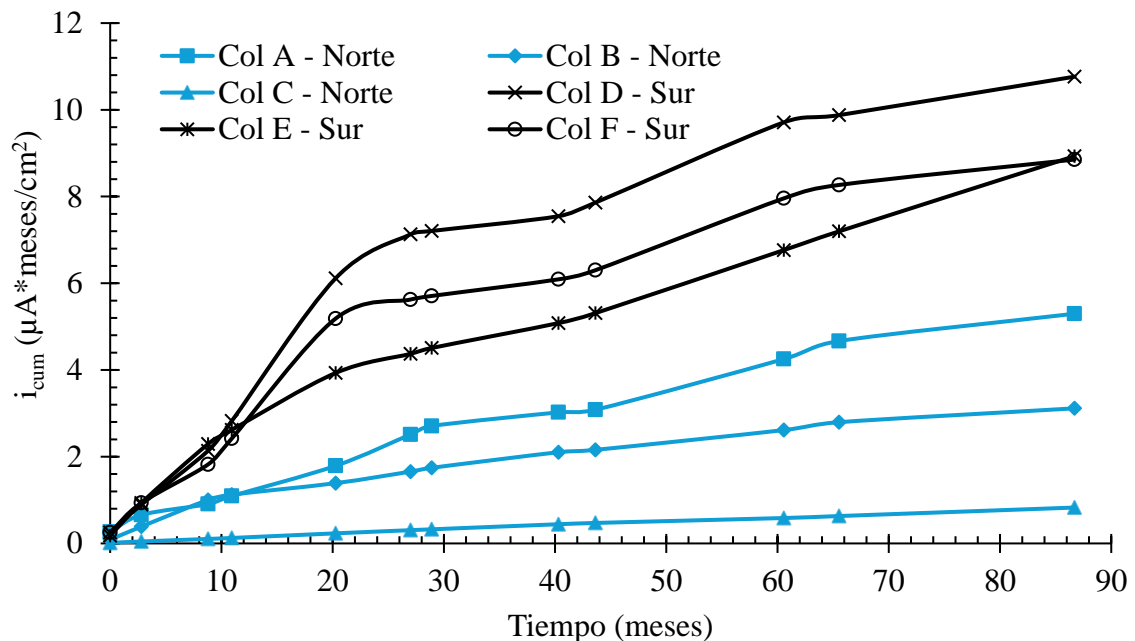


Figura 7. i_{cum} vs. tiempo.

Impacto de estrategias de diseño y seguimiento por durabilidad en el comportamiento electroquímico y microambiental de la subestructura de un palafito de concreto reforzado expuesto a microclimas tropicales marinos por siete años.

Para entender lo anterior, se analizan los comportamientos observados en las columnas C y D (Figura 8). En este caso, la columna C muestra continuidad en las mediciones, con valores en el rango de $0.01 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. En el caso de la columna D, se puede apreciar cómo, al inicio, las velocidades de corrosión se encontraban cercanas a los umbrales debido al proceso de pasivación que se da en ambientes naturales, para posteriormente alcanzar valores estables por debajo del umbral.

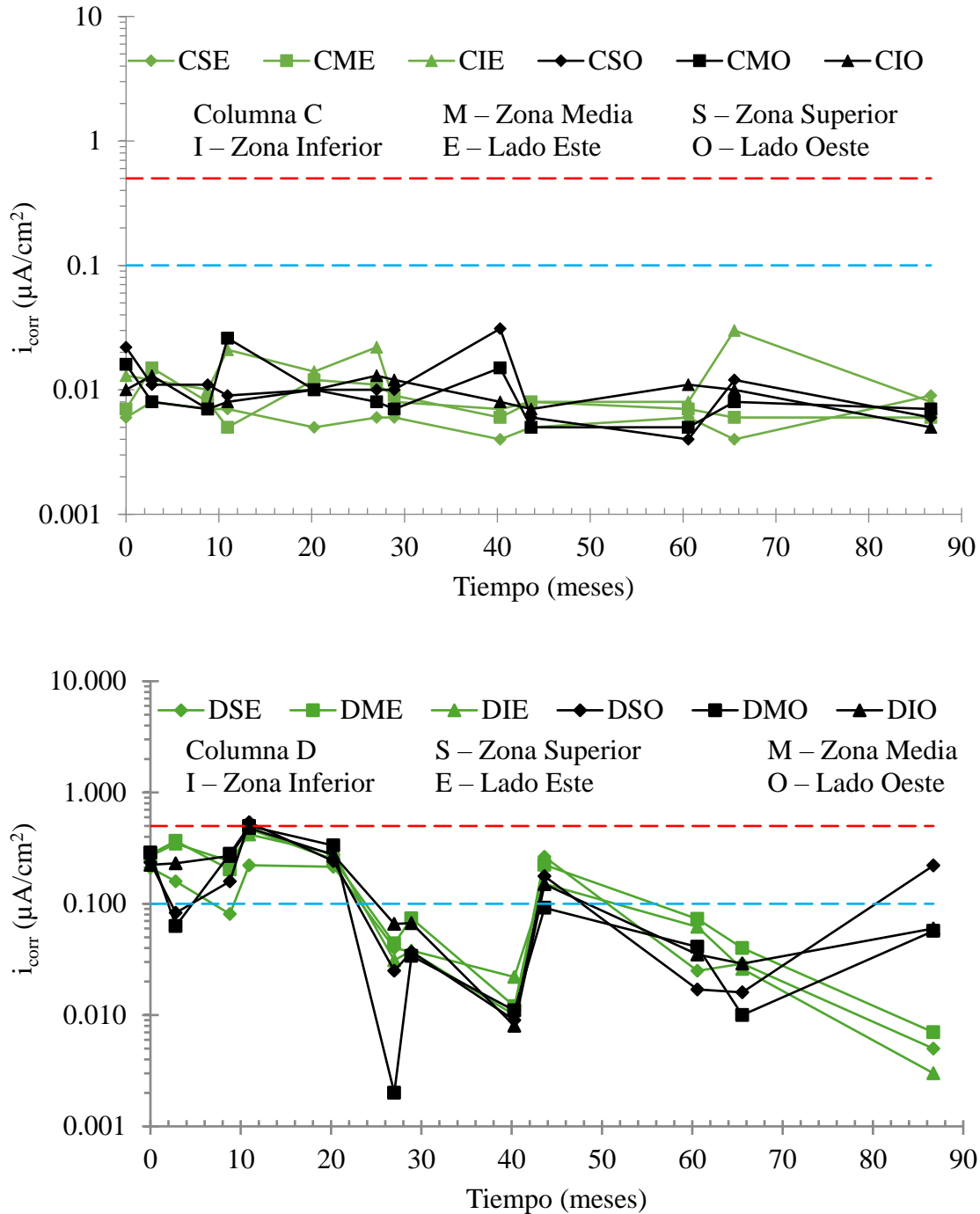


Figura 8. i_{corr} vs. tiempo de las columnas C y D.

3.3 Resistividad

Los valores de resistividad oscilaron entre 10 y 150 $k\Omega \cdot cm$ (Figura 9). La columna B destacó con 150 $k\Omega \cdot cm$, lo que indica una matriz de concreto de alta densidad. A pesar de no contar con un ciclo constante de mediciones, se puede observar la influencia de la temporada de lluvias, en la que, en algunos casos, la resistividad disminuyó hasta un 20 % de su valor promedio, recuperando los niveles originales en el periodo de sequía.

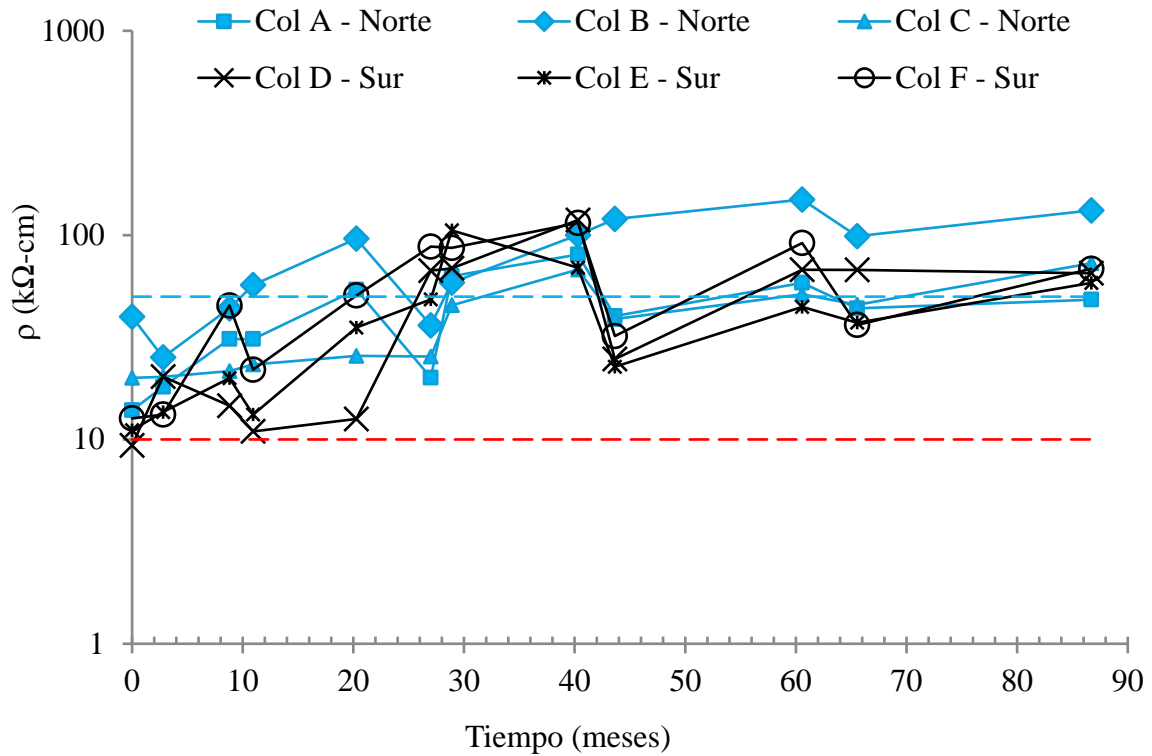


Figura 9. ρ vs. tiempo.

En la Figura 10 se presentan los datos acumulados de las resistividades de las columnas (Briceño-Mena et al., 2025). A diferencia de lo observado en la velocidad de corrosión, no se observa una clara diferencia entre las zonas Norte y Sur. Sin embargo, se puede notar cómo la columna B, ubicada al Norte, presenta una mayor resistividad. Si bien, al igual que en el caso del potencial de corrosión, la resistividad acumulada se muestra como un parámetro cualitativo durante la etapa de iniciación, se espera ver su influencia cuantitativa conforme la estructura pudiese acercarse a la despasivación.

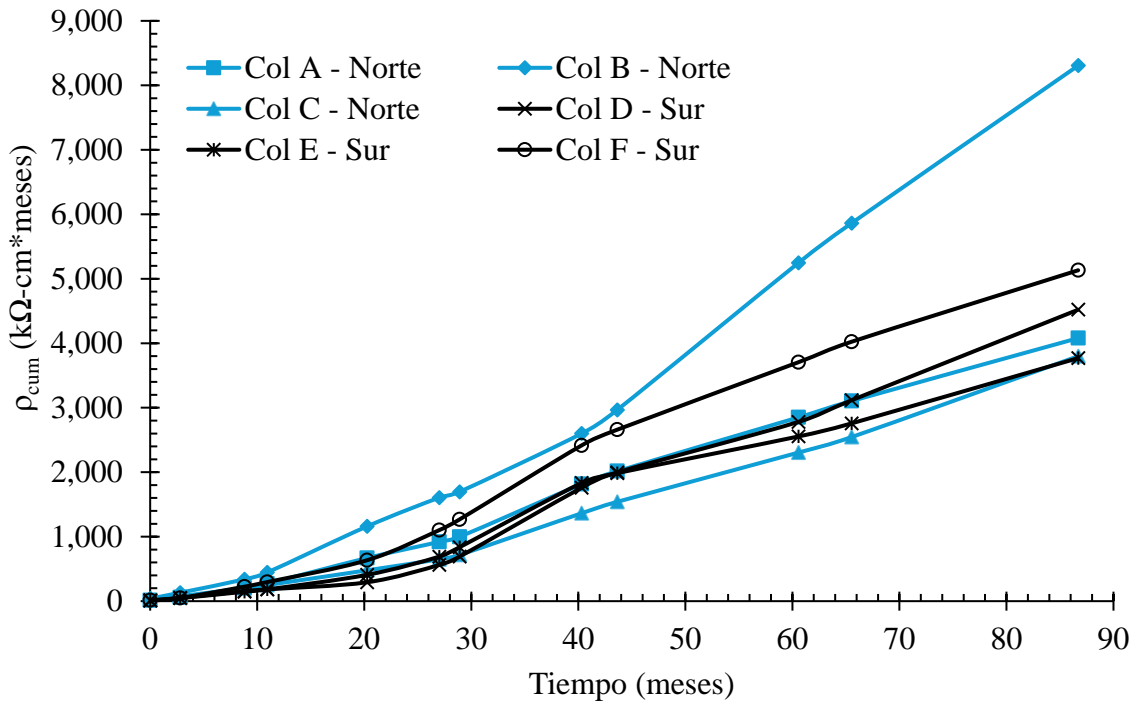
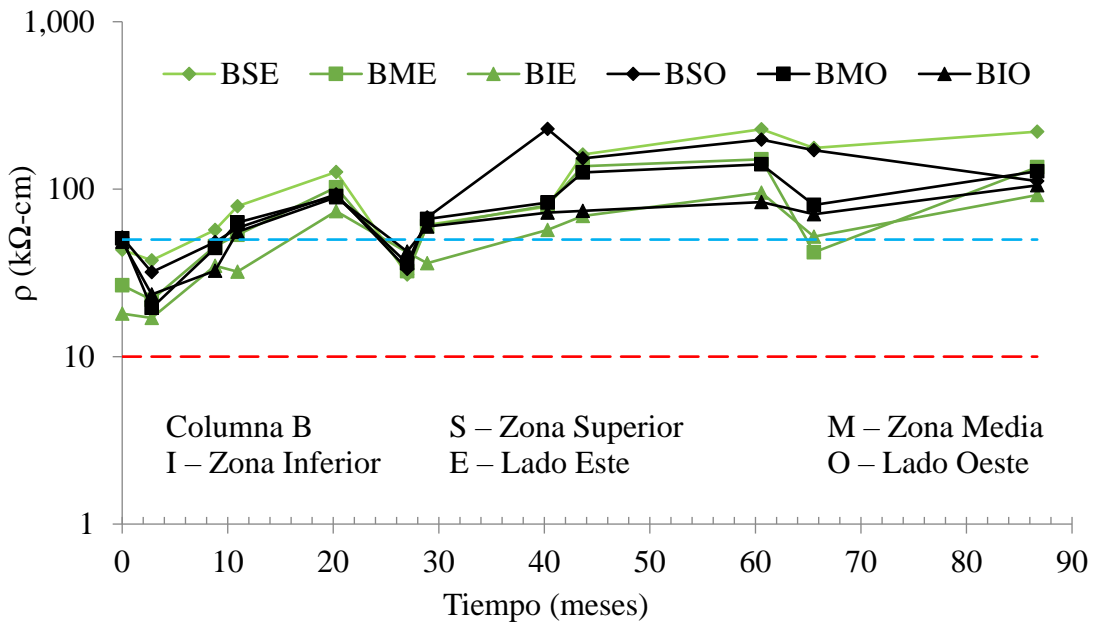


Figura 10. ρ_{cum} vs. tiempo.

En la Figura 11 se presenta la resistividad eléctrica de la columna B donde las resistividades a edad temprana superaron el umbral superior, lo que explicaría lo observado en las acumuladas. En el caso de la columna D, fue hasta los 30 meses que se obtuvieron resistividades considerables y se han mantenido en ese estado hasta el final del período reportado.



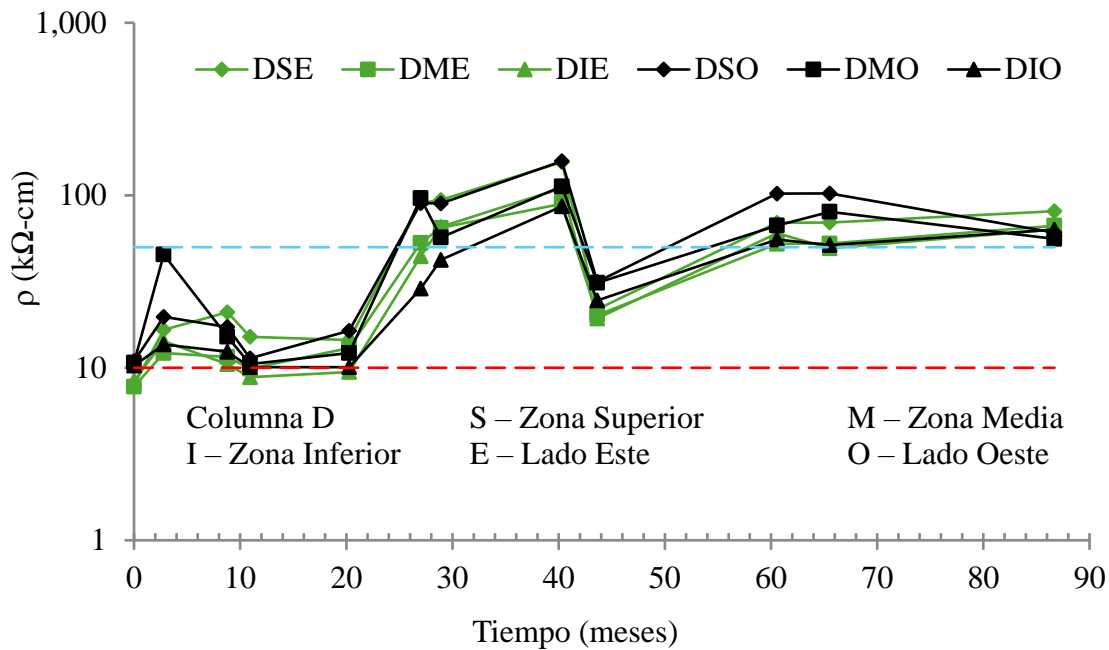


Figura 11. ρ vs. tiempo de las columnas B y D.

3.4 Humedad y temperatura

La Figura 12 muestra que la humedad interna osciló entre 60 % y 90 %, con una humedad relativa promedio del 74 % y picos en la segunda mitad del año, coincidiendo con la temporada de lluvias, como se aprecia en los 3 picos principales obtenidos en los meses de junio y julio, lo que resulta fundamental para evaluar la probabilidad de corrosión en áreas particularmente vulnerables (Pacheco-Torgal et al., 2019). La humedad relativa promedio de las columnas ubicadas en la zona Norte es de 72 %, mientras que las ubicadas en el lado Sur, expuestas a la intemperie, tienen una humedad relativa promedio del 76 %.

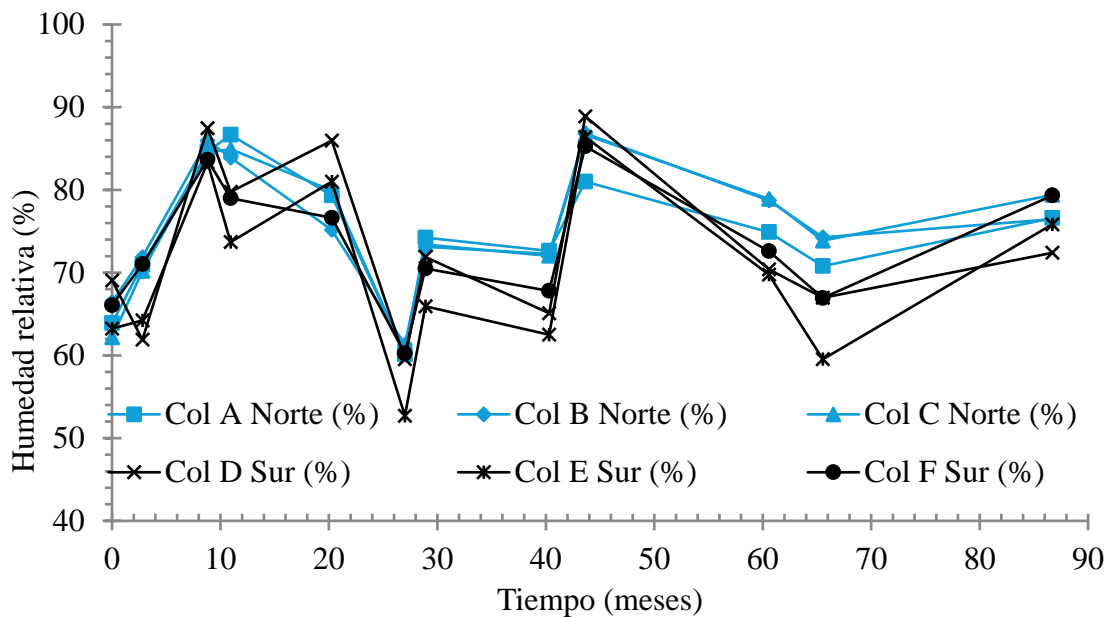


Figura 12. HR vs. tiempo.

La Figura 13 presenta los resultados acumulados de la humedad relativa, se puede observar cómo las columnas ubicadas al norte tienen una mayor humedad. Sin embargo, todas las columnas presentan la misma tendencia.

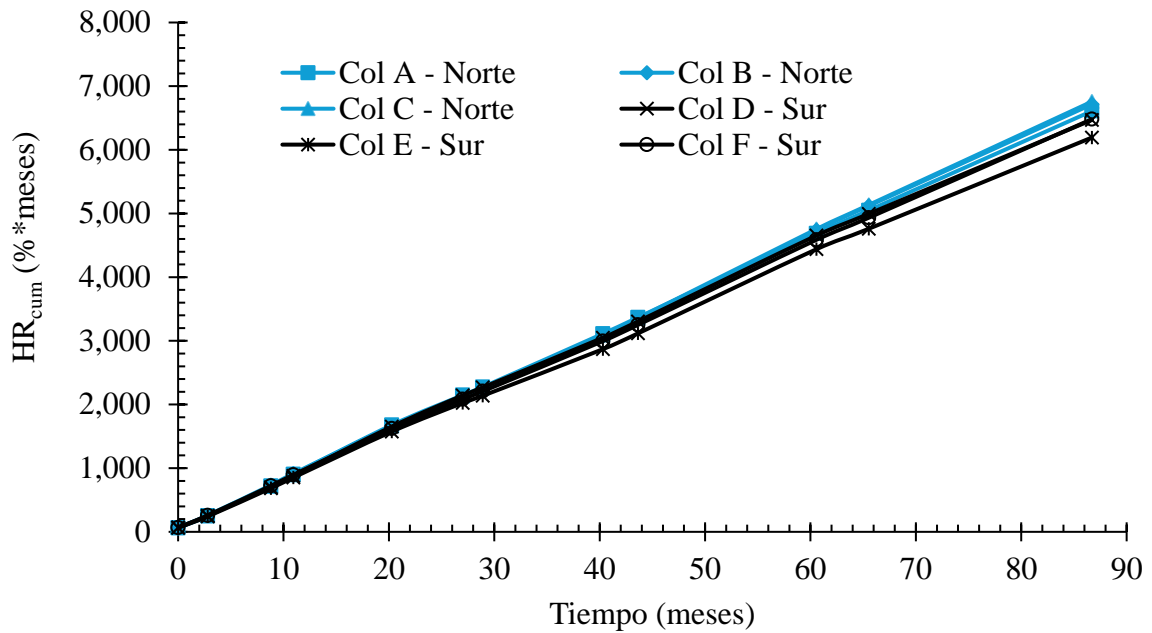
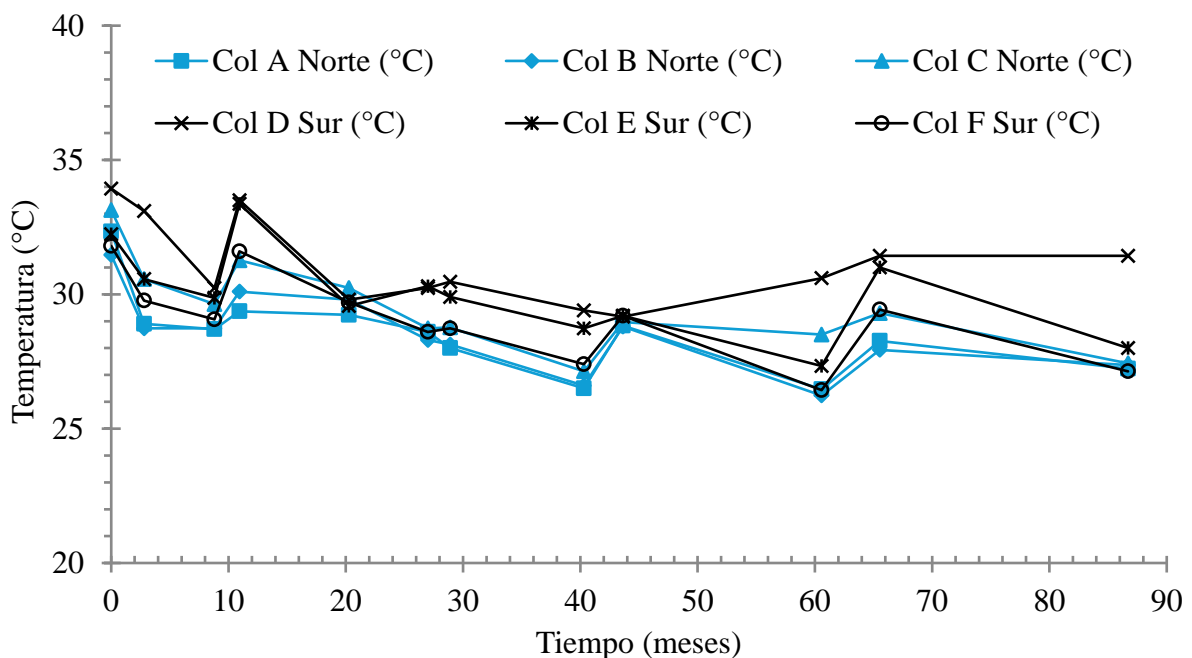


Figura 13. HR_{cum} vs. tiempo.

Por otra parte, la Figura 14 presenta las temperaturas registradas en las columnas; estas fluctuaron entre 26 °C y 34 °C, con una temperatura promedio de 29 °C para las columnas ubicadas en la zona Norte y de 30 °C para las ubicadas en la zona Sur, sin observarse cambios ni variaciones notables debido a la temporada de sequías o de lluvias. Estas observaciones respaldan la importancia de un monitoreo continuo en estructuras costeras, donde los gradientes ambientales pueden variar sustancialmente según la exposición.



Impacto de estrategias de diseño y seguimiento por durabilidad en el comportamiento electroquímico y microambiental de la subestructura de un palafito de concreto reforzado expuesto a microclimas tropicales marinos por siete años.

Figura 14. Temperatura vs. tiempo.

La Figura 15 presenta las tendencias acumuladas de la temperatura. Al igual que se pudo observar en las puntuales, las temperaturas de las columnas ubicadas al Norte son menores.

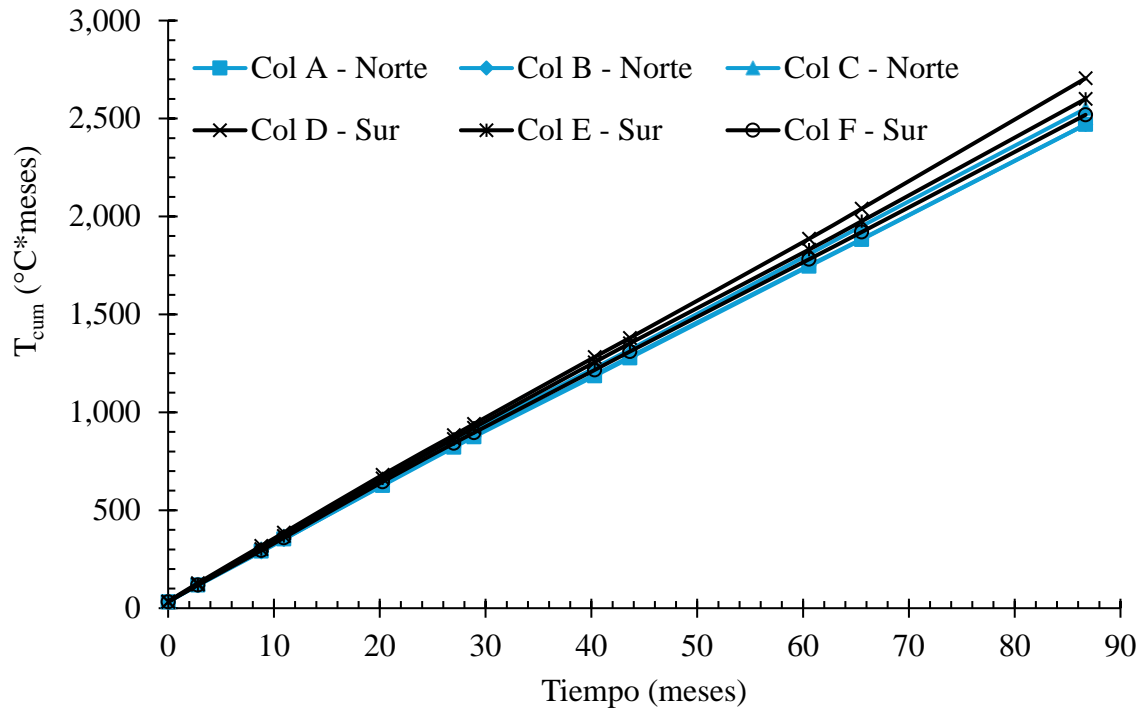


Figura 15. T_{cum} vs. tiempo.

A lo largo de los siete años de monitoreo, los datos de las mediciones electroquímicas y eléctricas puntuales en zonas específicas de los elementos presentan una variabilidad ligada a las condiciones ambientales. Por ejemplo, los cambios observados cuando la resistividad eléctrica disminuye (Figura 9) y la velocidad de corrosión aumenta (Figura 6), se corresponden con los períodos de mayor humedad relativa (Figura 12) y temperatura (Figura 14). Esto representa una respuesta del concreto y del acero a su comportamiento físico y electroquímico, respectivamente, ante los cambios externos del clima que se reflejan en el microclima interno del concreto armado (Cabrera-Madrid et al., 2014).

Este análisis, a lo largo del período de estudio, también permitió observar diferencias en las ubicaciones de los puntos de medición: en las columnas ubicadas en el lado Norte, con cara de análisis al Sur, bajo la losa, y en las columnas ubicadas en el lado Sur, con cara de análisis al Sur, fuera de la losa, se pueden distinguir los microclimas debido a la orientación. Las columnas del lado Sur presentaron mayores velocidades de corrosión acumuladas debido a la exposición directa al ambiente, al no contar con la protección física de la losa, lo que se evidencia en las dispersiones en las mediciones de humedad relativa.

3.5 Impacto de las estrategias seguidas en los parámetros medidos.

Cuando se diseñaron y construyeron las diferentes generaciones de palafito, se buscaba una manera de poder dar un seguimiento ordenado que permitiese, con el paso de los años, lograr discriminar la influencia de las variables que se diseñaron, como lo fueron orientación geográfica, posición con respecto a la altura, blindados o no contra el influjo marino, blindados o no contra la sombra y el asoleamiento. Esto no solo se lograría con la colocación de los “fitters”, sino también con mediciones que se pudiesen realizar en diferentes estaciones del año a lo largo de los años.

Impacto de estrategias de diseño y seguimiento por durabilidad en el comportamiento electroquímico y microambiental de la subestructura de un palafito de concreto reforzado expuesto a microclimas tropicales marinos por siete años.

Asimismo, se podría analizar cómo los cambios climáticos incidirían en las variables estudiadas. Como es sabido, el ambiente externo de la estructura se refleja en el interior del concreto a distintas profundidades (Castro-Borges & Veleva, 2015). Hay un tiempo de retraso entre el clima externo y su reflejo en el clima interno, que resulta difícil de medir. Sin embargo, dado que los parámetros de durabilidad son internos, conocer las variaciones climáticas junto al acero de refuerzo resulta elemental para identificar correlaciones entre el ambiente y el comportamiento electroquímico. Además de lo anterior, resultaba necesario un análisis complementario del seguimiento puntual, es decir, el seguimiento acumulado. Aunque no hay una interpretación cinética, pero sí termodinámica, los resultados discutidos de los acumulados en las figuras previas han demostrado que gracias a ellos es posible discriminar la influencia del clima en los parámetros electroquímicos según la orientación geográfica, altura de medición en las columnas, blindaje o no de la brisa marina, o de la sombra y asoleamiento. Con los datos obtenidos después de siete años, es posible ahora, incluso, intervenir la estructura para conocer su comportamiento ante cloruros y carbonatación, y con ellos modelar su vida de servicio a partir de los siete años, o tomando de inicio el año cero. Esto formará parte de otro trabajo que se publicará próximamente.

4. CONCLUSIONES

El presente estudio, desarrollado durante siete años de seguimiento continuo, ha proporcionado información valiosa sobre el comportamiento electroquímico y ambiental de una subestructura tipo palafito expuesta a las condiciones agresivas del Golfo de México. Los resultados obtenidos no solo confirman la eficacia del diseño y de los materiales empleados, sino que también ofrecen ideas para la construcción de infraestructuras costeras resilientes. A continuación, se presentan las conclusiones sobre los principales hallazgos.

- Los valores de potencial de corrosión (E_{corr}) oscilaron entre -150 mV y $+150$ mV frente al electrodo de referencia Cu/CuSO₄, lo que indica una baja probabilidad de corrosión (<10%) en todas las columnas monitoreadas, de acuerdo con la NMX-C-495-ONNCCE-2015 (reaprobada 2021). Este comportamiento refleja la efectividad del diseño estructural en ambientes marinos agresivos, caracterizados por altas concentraciones de cloruros y humedad relativa alrededor del 80%.
- La instalación de dispositivos integrados de monitoreo (fitters) demostró ser una solución eficaz y no destructiva para evaluar parámetros del concreto, como la humedad, la temperatura y la actividad eléctrica y electroquímica (E_{corr} , i_{corr} y ρ). Su instalación no alteró las propiedades electroquímicas ni la integridad estructural del concreto, lo que valida su implementación en futuros proyectos.
- Las columnas protegidas (ubicadas al Norte, A, B y C) mostraron una estabilidad destacada en sus valores de i_{corr} (entre 0.01 y 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), atribuida a la protección física proporcionada por la losa superior.
- Las columnas expuestas (ubicadas al Sur, D, E y F) presentaron picos temporales de hasta 0.5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ atribuidos a la temporada de lluvias, generando incrementos en la humedad relativa (hasta un 90%). No obstante, estos valores se estabilizaron durante los periodos secos y en etapas posteriores del estudio.
- La humedad interna del concreto osciló entre 60% y 90%, con picos durante la temporada de huracanes, lo que tuvo efectos directos en la actividad electroquímica.
- Los incrementos en i_{corr} y los descensos de la resistividad eléctrica (ρ) durante los meses lluviosos son consistentes con estudios previos sobre la influencia de la humedad en los procesos corrosivos en ambientes marinos.
- Las temperaturas registradas fluctuaron entre 26°C y 34°C y no mostraron, de momento,

una influencia significativa sobre los parámetros electroquímicos, confirmando que, en climas tropicales, la humedad es el factor principal en la activación de procesos corrosivos, mientras que las variaciones térmicas tienen un efecto menos notable.

- La prefabricación industrial de los elementos estructurales propició una uniformidad en las propiedades del concreto, teniendo una reducción de defectos constructivos, como porosidad y grietas, que suelen ser más comunes en construcciones in situ, lo que permitió una resistividad superior a 100 k Ω ·cm.
- Aunque no hay una interpretación cinética, pero sí termodinámica, los resultados discutidos de los acumulados en las figuras previas han demostrado que gracias a ellos es posible discriminar la influencia del clima en los parámetros electroquímicos según la orientación geográfica, altura de medición en las columnas, blindaje o no de la brisa marina, o de la sombra y asoleamiento.
- Con los datos obtenidos después de siete años, ahora es posible incluso intervenir en la estructura para conocer su comportamiento ante cloruros y carbonatación, y, con ellos, modelar su vida de servicio a partir de los siete años, o tomando como inicio el año cero. Esto será parte de otro trabajo a publicar próximamente

5. AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav), a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Sechiti). A la Ing. Mercedes Balancán, a la M.C. Alexia Zozaya, a la M.C. Jasset Puc y al Ing. Ricardo Martín por su apoyo en la recolección de datos.

6. REFERENCIAS

- Andrade, C., & Alonso, C. (1996). *Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site*. In Construction and Building Materials. 10(5).
- Andrade, C., & Alonso, C. (2004). *Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method*. Materials and Structures. 37(9):623–643. <https://doi.org/10.1007/BF02483292>
- Andrade, C., Rebolledo, N., & Pedrosa, F. (2012). *From the instantaneous corrosion rate to a representative value*. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III - Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2012, 59–63. <https://doi.org/10.1201/B12750-10>
- Aumento de las Temperaturas. (2019). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bouteiller, V., Cherrier, J. F., L'Hostis, V., Rebolledo, N., Andrade, C., & Marie-Victoire, E. (2012). *Influence of humidity and temperature on the corrosion of reinforced concrete prisms*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 16(3–4):471–480. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.668004>
- Briceño-Mena, J. A., Balancán-Zapata, M. G., Castillo-Burguete, M. T., Torres-Acosta, A.A., & Castro-Borges, P. (2024). *Construcción y caracterización de un palafito de concreto en el Golfo de México: Un enfoque en durabilidad y sostenibilidad*. Memorias del XI Congreso Nacional de Alconpat México “20 años de Congresos Nacionales de Alconpat México, V1, Control de Calidad, paper CC-394-MX, pp. 321–333, 10-12 de septiembre de 2024, Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México.
- Briceño-Mena, J. A., Balancán-Zapata, M. G., Pérez-García, E. J., Nieves-Mendoza, D., & Castro-Borges, P. (2025). *Electrochemical Differences in the Passivity State of Reinforced Concrete for Two Mix Design Methods*. Buildings, 15(8):1293. <https://doi.org/10.3390/buildings15081293>
- Briceño-Mena, J.A., Puc-Vázquez, J. A., Castro-Borges, P., Castillo-Burguete, M.T. (2024).

Concrete durability in vulnerable coastal communities: The role of the Participatory Action Research (PAR) for social appropriation. Proceedings of the 10th International Conference on CONcrete under SEvere Conditions – Environment and Loading, September 25-27, Chennai, India pp. 69-72.

Broomfield, J. P. (2023). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003223016>

Cabrera-Madrid, J. A., Balancán-Zapata, M., Torres-Acosta, A. A., Castro-Borges, P. (2014). *Effect of tropical marine microclimates on depassivation and corrosion-induced cracking of reinforced concrete.* Int. J. Electrochem. Sci., 9, 8211 – 8225.

Cao, Y., Gehlen, C., Angst, U., Wang, L., Wang, Z., & Yao, Y. (2019). *Critical chloride content in reinforced concrete — An updated review considering Chinese experience.* In Cement and Concrete Research 117:58–68. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.020>

Castro-Borges, P., Balancán-Zapata, M., & López-González, A. (2013). Analysis of tools to evaluate chloride threshold for corrosion onset of reinforced concrete in tropical marine environment of Yucatán, México. Journal of Chemistry. <https://doi.org/10.1155/2013/208619>

Castro-Borges, P., Balancán-Zapata, M., & Zozaya-Ortiz, A. (2017). *Electrochemical meaning of cumulative corrosion rate for reinforced concrete in a tropical natural marine environment.* Advances in Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1155/2017/6973605>

Castro-Borges, P., Dickinson, F., Castillo, T., Torres Acosta A. A. & García, C. (2011). *Investigación participativa para crear viviendas durables,* en Memorias del XI Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XII Congreso de Control de Calidad en la Construcción, La Antigua Guatemala, Guatemala, 4 a 6 de Octubre, ISBN 978-9929-40-175-4, Trabajo 307 MX, Vol 2, Patología

Castro-Borges, P. & Veleza, L. (2015). *Time of wetness and temperature as tools to evaluate corrosion risk in concrete blocks exposed to a humid tropical environment,* en Journal of Construction. 4(2), August.

Chauhan, A., & Sharma, U. K. (2019). *Influence of temperature and relative humidity variations on non-uniform corrosion of reinforced concrete.* Structures, 19:296–308. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.01.016>

Feliu, V., González, J. A., & Feliu, S. (2007). *Corrosion estimates from the transient response to a potential step.* Corrosion Science, 49(8):3241–3255. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.03.004>

Huracanes - Corescam. (n.d.). Retrieved April 7, 2025, from <https://corescam.org/ecosistemas/huracanes/>

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2021). *NMX-C-495-ONNCCE-2015 Industria de La Construcción – Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado – Medición de Potenciales de Corrosión Del Acero de Refuerzo Sin Revestir, Embebido En Concreto - Especificaciones y Método de Ensayo.* México.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2015). *NMX-C-501-ONNCCE-2015. Industria de La Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Medición de Velocidad de Corrosión En Campo - Especificaciones y Método de Ensayo.* México.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2019). *NMX-C-514-ONNCCE-2019 Industria de la construcción-Resistividad eléctrica del concreto hidráulico-Especificaciones y método de ensayo.* México

- Trocónis de Rincón, O., Romero de Carruyo, A., Andrade, C., Helene, P., & Díaz, I. (1997). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. *Durabilidad de la Armadura*. CYTED.
- Ramón, J. E., Castillo, & Martínez, I. (2021). *On-site corrosion monitoring experience in concrete structures: Potential improvements on the current-controlled polarization resistance method*. *Materiales de Construcción*, 71(344). <https://doi.org/10.3989/mc.2021.11221>
- RILEM TC-154 ECM. (2024). *RILEM TC-154 ECM: ON-SITE CORROSION CONDITION ASSESSMENT, MONITORING AND PREDICTION - Half-Cell Potential Measurements - Recommendation on practical execution*.
- Torres-Acosta, A. A., & Martínez-Madrid, M. (2003). *Residual Life of Corroding Reinforced Concrete Structures in Marine Environment*. *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*, 15(4):344–353. <https://doi.org/10.1061/ASCE0899-1561200315:4344>
- Villagrán Zaccardi, Y. A., Bértora, A., & Di Maio, A. A. (2013). *Temperature and humidity influences on the on-site active marine corrosion of reinforced concrete elements*. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 46(9):1527–1535. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9994-z>
- Xia, D. H., Deng, C. M., Macdonald, D., Jamali, S., Mills, D., Luo, J. L., Strebl, M. G., Amiri, M., Jin, W., Song, S., & Hu, W. (2022). *Electrochemical measurements used for assessment of corrosion and protection of metallic materials in the field: A critical review*. In *Journal of Materials Science and Technology*. 112:151–183. Chinese Society of Metals. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.004>