



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN ATMOSFÉRICA DE MATERIALES  
(METÁLICOS Y POLIMÉRICOS) EN UN AMBIENTE RURAL-URBANO DE TABASCO**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**I.Q. OSIRIS ANGÉLICA LÓPEZ ZAPATA**

**BAJO LA DIRECCIÓN DE:  
DRA. EBELIA DEL ÁNGEL MERAZ**

**EN CODIRECCIÓN DE:  
DR. FRANCISCO EDUARDO CORVO PÉREZ**



**DIRECCIÓN**

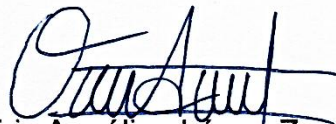
**SEPTIEMBRE DE 2025, CUNDUACÁN, TABASCO.**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

En la Ciudad de Cunduacán, Tabasco, el día 1 del mes de septiembre del año 2025, el que suscribe **Osiris Angélica López Zapata**, alumna del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería con número de matrícula **232D19008**, adscrito a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autora de la Tesis presentada para la obtención del (título, diploma o grado según sea el caso) y titulada **Evaluación de la degradación atmosférica de materiales (metálicos y poliméricos) en un ambiente rural-urbano de Tabasco** y dirigida por la **Dra. Ebelia del Ángel Meraz** y el **Dr. Francisco Eduardo Corvo Pérez**

DECLARO QUE: La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita. Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente

Villahermosa, Tabasco a 1 de septiembre de 2025.



Ing. Osiris Angélica López Zapata

Firma



## AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



### DIRECCIÓN

**OFICIO:** DAIA/DIR//2025  
**FECHA:** 22 de agosto de 2025  
**ASUNTO:** Autorización de  
impresión definitiva

**IQ. OSIRIS ANGÉLICA LÓPEZ ZAPATA**  
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
**P R E S E N T E**

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis denominado:

**“Evaluación de la degradación atmosférica de materiales (metálicos y  
poliméricos) en un ambiente rural-urbano de Tabasco”**

Para obtener el grado de **Maestro en Ciencias en Ingeniería** y en la cual ha tenido como Directora de Tesis a la Dra. Ebelia del Ángel Meraz y su Co- director el Dr. Francisco Eduardo Corvo Pérez.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

**ATENTAMENTE**

**DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**  
**DIRECTORA**

c.c.p. Archivo  
DRA'DMFM / MCA'RACT



**DIRECCIÓN**

## CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

Villahermosa, Tabasco a 14 de agosto de 2025.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTORA y AUTORES en la producción, creación y realización de la obra denominada **Evaluación de la degradación atmosférica de materiales (metálicos y poliméricos) en un ambiente rural-urbano de Tabasco.**

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

### COLABORADORES



Ing. Osiris Angélica López Zapata

Tesista



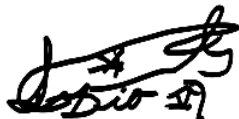
Dra. Ebelia del Ángel Meraz

Directora



Dr. Francisco Eduardo Corvo Pérez

Codirector



Dr. Pío Sifuentes Gallardo

Testigo



Dra. Ma. Guadalupe Rivera Ruedas

Testigo

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por nunca soltarme a lo largo de este arduo camino estudiantil, por bendecir mis proyectos y metas, y darme la sabiduría y el entendimiento requerido para superar cada prueba.

A mis padres, por haberme formado para ser la persona que soy, por darme todo cuanto estuvo en sus manos y acompañarme a lo largo de toda mi vida.

A mi hermana, que estuvo dándome ánimos y aliento en los momentos aciagos en que no quería nada.

A mi directora de Tesis, la Dra. Ebelia del Ángel Meraz y a mi Codirector el Dr. Francisco Eduardo Corvo Pérez, por aportarme sus conocimientos, formarme y acompañarme durante un buen trecho de mi carrera universitaria, brindándome todo el tiempo y la paciencia necesaria.

A cada uno de mis profesores, y en especial a mi Comisión Revisora: Dr. Pío Sifuentes Gallardo, Dra. Ma. Guadalupe Rivera Ruedas, Dra. Mayra Agustina Pantoja Castro y Juan Gabriel Álvarez Ramírez, que supieron enseñarme lo necesario para concluir de manera satisfactoria mis estudios de maestría.

A la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por ser mi casa de estudios, y por su capacitado cuerpo académico.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo otorgado con la Beca de Estudios de Posgrado.

## Contenido

<b>Declaración de Autoría y Originalidad</b>	<b>2</b>
<b>Autorización de impresión</b>	<b>3</b>
<b>Carta de Cesión de Derechos</b>	<b>4</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>5</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>9</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>10</b>
<b>Abstract</b>	<b>14</b>
<b>Capítulo I. Introducción</b>	<b>15</b>
1.1. Antecedentes	17
1.2. Justificación	18
1.3. Pregunta de investigación	20
1.4. Hipótesis	20
1.5. Objetivo General	20
1.5.1. Objetivos Específicos:	20
<b>Capítulo II. Marco teórico</b>	<b>21</b>
2.1. Corrosión	21
2.1.2. Factores climáticos en corrosión atmosférica	24
2.2. Normatividad para la estimación de la corrosión	25
2.2.1. Norma ISO 9223 para categorización de agresividad atmosférica	27
2.2.2. Ecuaciones dosis-respuesta	28
2.3. Corrosión en metales	29
2.3.1 Corrosión en Cobre	30
2.3.2. Corrosión en acero galvanizado	30
2.3.3. Corrosión en aluminio	31
2.3.4 Corrosión en acero al carbono	31
2.4. Polímeros	32
2.4.1. Envejecimiento de polímeros	33

<b>Capítulo III. Metodología</b>	<b>35</b>
<b>3.1. Localización de la estación de ensayo</b>	<b>35</b>
<b>3.2. Caracterización de los materiales</b>	<b>35</b>
3.2.1 Composición química de las muestras	35
<b>3.3. Diseño de la estación de ensayo atmosférico</b>	<b>36</b>
3.3.1. Diseño de probetas (metálicas y poliméricas)	36
3.3.2. Limpieza de probetas previo a la exposición	37
<b>3.4. Bastidor de exposición</b>	<b>38</b>
3.4.1. Secuencias de exposición	38
<b>3.5. Caracterización medioambiental de la atmósfera</b>	<b>39</b>
3.5.1. Tiempo de humectación	40
3.5.2. Platos de sulfatación	41
3.5.3. Velas húmedas	42
<b>3.6. Estimación de velocidad de corrosión</b>	<b>43</b>
<b>3.7. Análisis de productos de corrosión</b>	<b>44</b>
3.7.1. Difracción de Rayos X (DRX)	44
3.7.2. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	44
3.7.3. Espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	45
3.7.4. Ruido electroquímico	45
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS</b>	<b>47</b>
<b>4.1. Precipitación pluvial y pH</b>	<b>47</b>
<b>4.2. Tiempo de humectación</b>	<b>49</b>
<b>4.3. Velocidad de deposición de contaminantes</b>	<b>50</b>
<b>4.4. Velocidad de corrosión</b>	<b>53</b>
4.4.1. Ecuaciones Dosis-Respuesta (EDR)	56
4.4.1. Análisis por ruido electroquímico	58
<b>4.5. Caracterización de los metales</b>	<b>61</b>
<b>4.6. Degradación de polímeros</b>	<b>76</b>
<b>CAPÍTULO V. DISCUSIÓN</b>	<b>79</b>
<b>5.1. Clasificación de la atmósfera</b>	<b>79</b>

5.2. Velocidad de corrosión _____	81
5.3. Envejecimiento de polímeros _____	83
<b>Conclusiones</b> _____	<b>84</b>
<b>Recomendaciones</b> _____	<b>87</b>
<b>Referencias citadas</b> _____	<b>88</b>
<b>Anexos</b> _____	<b>101</b>
<b>Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional</b> _____	<b>101</b>
1. Glosario de términos _____	103
2. Método de análisis de platos de sulfatación _____	106
3. Método de análisis vela húmeda _____	106
4. Escorrentía de los metales _____	108
5. Graficas de comportamiento mensual de temperatura y humedad relativa durante los primeros meses del ensayo _____	109
6. Estadística de ráfagas de viento _____	110
7. Parámetros meteorológicos _____	111
8. Categorías de agresividad atmosférica por mes en función de la deposición de iones cloruro ( $S_d$ ) _____	112
9. Categorías de agresividad atmosférica por mes en función de la deposición de iones sulfato ( $P_d$ ) _____	112
10. Espectros de potencial y corriente obtenidos por Ruido Electroquímico para las probetas metálicas _____	113
11. Mapeo Superficial de la distribución química de los elementos presentes en las probetas metálicas antes de ser expuestas _____	118

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. categoría de agresividad atmosférica de ISO 9223	27
Tabla 2. Categorías de agresividad basa en deposición de Cl <sup>-</sup> , SO <sub>2</sub> y TdH con base en ISO 9223	27
Tabla 3. Ecuaciones dosis-respuesta de ISO9223:2012	28
Tabla 4 Composición química de las probetas metálicas	36
Tabla 5 Composición química de los materiales poliméricos	36
Tabla 6. Secuencia de exposición de probetas metálicas	39
Tabla 7. Secuencia de exposición de probetas de polímero	39
Tabla 8. Factores medio ambientales monitoreados durante el tiempo de exposición	39
Tabla 9. Soluciones químicas preparadas para la limpieza de productos de corrosión después de los periodos de exposición	43
Tabla 10. Correlación entre el IL y el tipo de corrosión	46
Tabla 11. Promedio mensual del pH de las precipitaciones registradas y datos de pH la escorrentía por metal (agosto 2024 – febrero 2025)	48
Tabla 12. Correlación de TdH, precipitación y pH de escorrentía	50
Tabla 13. Categorías de agresividad con base en la velocidad de corrosión anual	56
Tabla 14. Parámetros utilizados para formulación de las ecuaciones	56
Tabla 15. Velocidad de corrosión en función del tiempo de exposición	57
Tabla 16. Cálculos de índice de localización y resistencia al ruido	60
Tabla 17. Cuadro comparativo de cálculo de Tiempo de Humectación	80
Tabla 18. Promedio mensual, máximo y mínimo de Humedad Relativa y Temperatura	111

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de corrosión	21
Figura 2. Clasificación de los tipos de atmósferas más a comunes	22
Figura 3. Tipos de ataque corrosivo sobre metales	24
Figura 4 Principales factores ambientales que afectan la corrosión atmosférica	25
Figura 5. Procedimientos de pruebas para corrosión atmosférica	26
Figura 6 Mecanismo de corrosión del acero al carbono	32
Figura 7. Proceso de Fotooxidación de polímeros	33
Figura 8. Principales formas del retardo en el envejecimiento	34
Figura 9 Localización de la zona de exposición en Cunduacán, Tabasco	35
Figura 10. Probetas para exposición al ambiente.	37
Figura 11 Proceso de preparación de probetas metálicas	37
Figura 12. Bastidor de exposición de las probetas	38
Figura 13. Proceso para realizar el cálculo del tiempo de humectación	41
Figura 14. Diagrama de flujo del código de octave	41
Figura 15 Preparación de platos de sulfatación, como se describe en la Norma ISO 9225.	42
Figura 16 Procedimiento para preparar velas húmedas	42
Figura 17. Metodología para formular ecuaciones dosis-respuesta	44
Figura 18. Proceso para realizar ruido electroquímico sobre probetas metálicas	46
Figura 19. Total, de precipitaciones sucedidas durante un año (enero 2024-febrero 2025)	48
Figura 20. Tiempo de humectación calculado durante el periodo del ensayo	49
Figura 21. Variación mensual de la velocidad de deposición de cloruros $\text{mg}/(\text{m}^2\text{-día})$	51
Figura 22. Velocidades de deposición de sulfatos en el periodo marzo-septiembre	52
Figura 23. Mapa de distribución de plantas de proceso de hidrocarburos en los alrededores del sitio	53
Figura 24. Velocidad de corrosión con respecto al tiempo de exposición	54
Figura 25. Velocidad de corrosión contra TdH de los metales expuestos	55
Figura 26. Desviación estándar de corriente vs velocidad de corrosión	59
Figura 27. Espectro DRX de probeta de acero al carbón	61
Figura 28. Micrografía de acero al carbón previo a exposición	62
Figura 29. Morfologías de los productos de corrosión de acero al carbono expuesto durante 3 meses	63
Figura 30. Morfologías de los productos de corrosión de acero al carbono expuesto durante 6 meses	63
Figura 31. Morfologías de los productos de corrosión de acero al carbono expuesto durante 9 meses	64
Figura 32. Morfologías de los productos de corrosión de acero al carbono expuesto durante 12 meses	64
Figura 33. Espectro DRX de probetas de cobre expuestas y testigo	65
Figura 34. Micrografía de cobre previo a exposición	66
Figura 35 Proceso macroscópico de la corrosión del cobre	66
Figura 36. Morfologías de los productos de corrosión de cobre expuesto durante 3 meses	67

Figura 37. Morfologías de los productos de corrosión de acero al carbono expuesto durante 6 meses _	68
Figura 38. Morfologías de los productos de corrosión del cobre expuesto durante 9 meses _____	68
Figura 39. Morfologías de los productos de corrosión del cobre expuesto durante 12 meses _____	69
Figura 40. Difractograma de la probeta de acero galvanizado expuestas al ambiente _____	70
Figura 41. Micrografía y EDS de acero galvanizado sin exponer _____	70
Figura 42. Micrografía y EDS de acero galvanizado después de tres meses de exposición _____	71
Figura 43. Micrografía y EDS de probeta de acero galvanizado expuesta 6 meses _____	72
Figura 44. Microscopía y EDS del acero galvanizado expuesto 9 meses _____	72
Figura 45. Micrografía y EDS de aluminio previo a exposición _____	73
Figura 46 Morfologías de aluminio expuesto durante 3 meses _____	74
Figura 47. Micrografía y EDS de aluminio expuesto 6 meses _____	74
Figura 48. Micrografía y EDS de aluminio expuesto 9 meses _____	75
Figura 49. Espectro IR-ATR de probetas de polipropileno expuestos en Cunduacán _____	76
Figura 50. Espectro IR-ATR de probetas de polipropileno expuestos en Cunduacán _____	78
Figura 51. Proceso de análisis realizado para determinar las concentraciones dióxido de azufre ____	106
Figura 52. Titulación volumétrica con nitrato de plata de las velas húmedas _____	107
Figura 53. La escorrentía de los metales de exposición se recolectó en recipientes plásticos de los cuales se analizó el pH _____	108
Figura 54. Comportamiento de Temperatura y Humedad relativa periodo 1 _____	109
Figura 55. Espectros de potencial y corriente para aluminio _____	114
Figura 56. Espectros de potencial y corriente para el acero al carbono _____	115
Figura 57. Espectros de potencial y corriente para el cobre _____	116
Figura 58. Espectros de potencial y corriente para el acero galvanizado _____	117
Figura 59. Mapeo Superficial del acero galvanizado antes de ser expuesto a la atmósfera _____	118
Figura 60. Mapeo Superficial del acero al carbón antes de ser expuesto a la atmósfera _____	118
Figura 61. Mapeo Superficial del cobre antes de ser expuesto a la atmósfera _____	119
Figura 62. Mapeo Superficial del aluminio antes de ser expuesto a la atmósfera _____	119

**EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN ATMOSFÉRICA DE MATERIALES  
(METÁLICOS Y POLIMÉRICOS) EN UN AMBIENTE RURAL-URBANO DE TABASCO**

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## RESUMEN

La corrosión atmosférica representa una amenaza significativa para la integridad de materiales metálicos expuestos a ambientes naturales. Esta investigación tuvo como objetivo caracterizar la corrosión de acero al carbón, acero galvanizado, aluminio y cobre en un entorno rural-urbano de Tabasco, integrando parámetros climatológicos, deposición de contaminantes y análisis electroquímico, además se realizó exposición de polietileno y polipropileno para evaluar su envejecimiento mediante espectroscopía infrarroja (FTIR), comparando probetas testigo (sin exponer), expuestas por 4 meses y por 12 meses en un sitio urbano de Tabasco. Se realizaron exposiciones durante 12 meses, registrando temperatura, humedad relativa, tiempo de humectación (TdH), pH de lluvia, y deposición de cloruros y sulfatos (ISO 9223). Se aplicaron ecuaciones dosis-respuesta con el fin de predecir el comportamiento de las variables climáticas en la velocidad de corrosión en el ambiente de estudio y se utilizó ruido electroquímico (RE) como técnica de monitoreo del tipo de corrosión que se desarrolló con respecto al tiempo en las probetas metálicas. Los resultados revelaron un TdH acumulado de 1085 h y lluvias con pH ácido (4.3–5.2), factores que aceleran la corrosión. El acero al carbón mostró la mayor velocidad de corrosión (2.02  $\mu\text{m/a}$ ) y alta actividad electroquímica. El cobre y el aluminio presentaron pasividad, con señales RE estables y bajas corrientes. El análisis espectral y el índice de localización confirmaron mecanismos de corrosión localizada en materiales activos como el acero al carbono. Los espectros de los polímeros mostraron incremento de bandas asociadas a grupos carbonilo (C=O) y otras funciones oxigenadas, indicando procesos de fotooxidación inducidos por la radiación UV y la humedad atmosférica. Se concluye que la combinación de parámetros ambientales y RE permite una evaluación integral de la corrosividad atmosférica, evidenciando la influencia del entorno en la durabilidad de metales. En el caso de las ecuaciones dosis-respuesta se observó que el pH de la lluvia es el que más influye en la corrosión de los metales.

**Palabras claves:** acero al carbón, acero galvanizado, aluminio, cobre, corrosión

## ABSTRACT

Atmospheric corrosion poses a significant threat to the integrity of metallic materials exposed to natural environments. This research aimed to characterize the corrosion of carbon steel, galvanized steel, aluminum and copper in a rural-urban environment of Tabasco, integrating climatological parameters, deposition of pollutants and electrochemical analysis, in addition to exposing polyethylene and polypropylene to evaluate their aging by infrared spectroscopy (FTIR), comparing control specimens (unexposed), exposed for 4 months and for 12 months in an urban site of Tabasco. Exposures were made for 12 months, recording temperature, relative humidity, wetting time (TdH), rainfall pH, and deposition of chlorides and sulfates (ISO 9223). Dose-response equations were applied in order to predict the behavior of climatic variables in the corrosion rate in the study environment and electrochemical noise (ER) was used as a technique to monitor the type of corrosion that was developed with respect to time in the metal specimens. The results revealed a cumulative ToH of 1085 h and rainfall with acidic pH (4.3–5.2), factors that accelerate corrosion. Carbon steel showed the highest corrosion rate (2.02  $\mu\text{m/a}$ ) and high electrochemical activity. Copper and aluminum showed passivity, with stable RE signals and low currents. Spectral analysis and localization index confirmed localized corrosion mechanisms in active materials such as carbon steel. The spectra of the polymers showed an increase in bands associated with carbonyl groups (C=O) and other oxygenated functions, indicating photooxidation processes induced by UV radiation and atmospheric humidity. It is concluded that the combination of environmental parameters and ER allows a comprehensive evaluation of atmospheric corrosivity, evidencing the influence of the environment on the durability of metals. In the case of the dose-response equations, it was observed that the pH of rain is the one that most influences the corrosion of metals.

**Key words:** aluminum, carbon steel, copper, corrosion, galvanized steel

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El deterioro de materiales en los ambientes naturales es un proceso que afecta la durabilidad de estructuras, equipos y otros objetos. El cambio climático ha modificado los patrones del clima afectando también a los materiales que se encuentran expuestos a la atmósfera, reflejando este efecto en la vida útil asignada a cada material incrementando las velocidades de corrosión.

En este sentido, la mayoría de las construcciones han sido planificadas y construidas asumiendo que las condiciones climáticas presentes y futuras serán similares a las que se han observado en el pasado. Sin embargo, pocos han considerado la vulnerabilidad de la planificación y el diseño de infraestructuras civiles frente a los efectos del cambio climático ( Zhang et al., 2022a). Con lo que se podría contribuir a la gestión sostenible de los recursos, principalmente cuando se trata de estructuras críticas, como puentes, edificios y plataformas industriales, cuyos estándares de seguridad y fiabilidad deben ser lo más altos posibles. Al ser la corrosión causa de daños estructurales, la comprensión de cómo el cambio climático afecta los procesos de corrosión, es esencial para garantizar la seguridad de las infraestructuras y la selección adecuada de materiales en nuevas construcciones o renovaciones, ayudando a prevenir problemas futuros y a garantizar la longevidad de las estructuras.

Dado que las velocidades de corrosión se ven afectadas por los factores climáticos, cualquier transformación en el clima global, en particular aquellos relacionados con el aumento de temperatura y humedad, provocan un aumento en el ritmo de deterioro de los materiales y a su vez en las edificaciones.

En el caso de los metales este proceso se conoce como corrosión y en el caso de los polímeros se denomina degradación y envejecimiento. La corrosión suele deteriorar las aleaciones metálicas cuando están expuestas a diferentes condiciones atmosféricas (Katona et al., 2023), este proceso ocurre cuando se forma una capa de humedad (electrolito) en la superficie del metal expuesto (Zhang et al., 2022a). Dependiendo de las condiciones de exposición a las que se someten los metales, puede darse un efecto significativo en la velocidad y magnitud de los procesos de corrosión, siendo la humedad, la lluvia, la duración y la presencia de ciertos contaminantes, como cloruros y sulfatos, factores que aceleran la velocidad de corrosión de los materiales. Estas condiciones de

exposición están ligados al tipo de ambiente en el que los materiales estén expuestos, que puede ser marino, urbano- rural o industrial (Pongsaksawad et al., 2021).

El grado de corrosión provocado por la acción agresiva de la atmósfera varía según el entorno al que se exponga el material, ya sea marino, urbano o industrial; cada uno de estos ambientes ve influenciada la determinación de las velocidades de corrosión por distintos factores (Spooner et al., 2022). El estado de Tabasco está tipificado en el Atlas nacional de riesgos como un estado altamente vulnerable al cambio climático (González Terrazas et al., 2021), la corrosividad en el estado se ve influenciada por sus cercanías con el golfo de México además de que cuenta con zonas altamente industrializadas, lo que hace a Tabasco buen candidato para realizar ensayos de corrosión.

En la presente Tesis se pretende realizar una evaluación paralela del proceso de corrosión atmosférica de cuatro metales y el envejecimiento de dos materiales poliméricos estabilizados y no estabilizados. La estructura de la Tesis consta de cinco secciones; Introducción, Marco Teórico, Metodología, Resultados, Discusiones y Conclusiones. La Introducción presenta el planteamiento del problema, los antecedentes y la justificación. El Marco Teórico presenta los conceptos, normativa utilizada para desarrollar el trabajo, teorías existentes sobre la corrosión, tipos de corrosión, los factores que afectan la corrosión, En la Metodología se explica de forma detallada los métodos adecuados de la norma, y los procedimientos realizados para el ensayo atmosférico, y las técnicas de ruido electroquímico. En la sección de Resultados, se presentan los datos obtenidos de la investigación, que van desde la caracterización de la atmósfera (precipitaciones pluviales, tiempo de humectación, pH de la lluvia, velocidad de viento, Temperatura, Humedad relativa, radiancia solar), la velocidad de corrosión, caracterizaciones de los metales analizados y el análisis del envejecimiento de los polímeros. Posteriormente está la sección de Discusión, donde se interpretan los resultados obtenidos, comparándolos con estudios previos y las expectativas iniciales además de un análisis de los factores que influyeron en los resultados, sus implicaciones y limitaciones, finalmente en las Conclusiones y recomendaciones, en las que se resumen los hallazgos más importantes y los objetivos alcanzados, así como las sugerencias prácticas para mejorar la prevención de la corrosión en materiales, basadas

en los resultados obtenidos. Al final se presentan las Referencias Bibliográficas, donde se listan todas las fuentes consultadas durante la elaboración de la tesis, siguiendo el estilo de citación APA 7ma edición. Adicionalmente, se agrega la sección de Anexos en la que se incluye información de soporte a la Investigación.

### **1.1. Antecedentes**

Los resultados más recientes que se han generado con respecto a ensayos de corrosión atmosférica implican la consideración de las temporadas del año, algunos investigadores realizaron un estudio en una atmósfera urbana de República Checa con estaciones de ensayo a la atmósfera; reportando una velocidad promedio anual de deposición de cloruros (contaminante atmosférico) de  $9.71 \text{ mg/m}^2\text{d}$  que influyó para obtener  $33.6 \text{ }\mu\text{m}$  y  $113.8 \text{ }\mu\text{m}$  de espesor de capa corrosiva para probetas expuestas de forma vertical y horizontal respectivamente (Kubzova et al., 2019). Otros investigadores en un estudio realizado en una zona costera determinaron una velocidad de corrosión de  $0.21 \text{ mm/año}$  además de destacar que la incidencia directa de la luz solar afecta significativamente la morfología de la corrosión macroscópica del acero al carbono y que el lado iluminado presenta una capa de óxido más densa en comparación con el lado sombreado (Niu et al., 2023). En lo referente a atmósferas marinas y urbanas, algunos investigadores reportan que las altas concentraciones de sulfatos y nitratos en capas de NaCl depositadas en los productos de corrosión actúan como agentes corrosivos (Katona et al., 2023). Otro estudio de corrosión atmosférica en una refinería de petróleo reveló velocidades de corrosión de  $61.28 \text{ }\mu\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$  para el acero al carbono,  $3.88 \text{ }\mu\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$  para el zinc y  $2.39 \text{ }\mu\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$  para el cobre concluyendo que factor más influyente en la corrosión atmosférica fue la deposición de cloruros en el exterior (Castañeda et al., 2021).

Las propiedades de los productos de corrosión (PdC) son cruciales para la velocidad de corrosión y afectan no solo la cinética de corrosión y el tiempo de humedad, sino también otros aspectos relacionados con la solución de problemas derivados de la corrosión de los materiales en aplicaciones industriales e ingenieriles (Tejero-Rivas et al., 2015). Un estudio de la proyección de los cambios de velocidad de corrosión realizada a 20, 50 y 80 años, calculó el impacto de estos cambios en la vida útil de las estructuras,

encontrando que las estructuras de hormigón armado podrían experimentar una disminución del 2.6-2.99 por ciento en su vida útil. En contraste, las estructuras de acero al carbón verían una disminución del 15.89 (Zhang et al., 2022b).

En Tabasco, se ha estudiado la corrosión atmosférica de diferentes materiales, Veleva et al. (2009) evaluaron la corrosión del zinc, y descubrieron una pérdida de masa del 47% debido a la formación de PdC, lo que aumentó de 10 a 14.7 g m<sup>-2</sup> en un año. La corrosión del acero galvanizado estudiada por E. Del Angel et al. (2015) presentó niveles bajos de deposición de SO<sub>2</sub> (P<sub>0</sub>) y de Cl<sup>-</sup> (S<sub>1</sub> y S<sub>2</sub>) y categoría de agresividad C3. Las morfologías de los PdC obtenidas de la exposición al ambiente de distintos materiales. Fonna (2021) identificó en los PdC del acero al carbono principalmente estructuras de lepidocrocita y goethita, que evolucionaron con el tiempo de exposición. Por otro lado, (Del Ángel et al., 2021) para el acero, observaron, a través de SEM-EDS, que, en ambientes urbanos, los PdC presentan forma laminar, grietas y escamas, a diferencia de atmósferas marinas donde tienen forma globular y grietas.

En el mismo periodo, Tejero-Rivas et al. (2015) analizaron la corrosividad del cobre y el acero en ambientes industrial y urbano-rural, y encontraron agresividad por contaminantes P0 y S0 en ambos sitios un nivel aceptable de corrosión en atmósfera marina, aunque niveles extremadamente altos en atmósfera industrial. Más recientemente, Domínguez et al. (2021) reportaron que el acero galvanizado presenta pérdidas de masa por corrosión con categoría de agresividad C4, según ISO 9223. Además, se han registrado niveles elevados de agresividad (C4, Cx), con pérdidas de masa que aumentan con el tiempo (E. Del Angel et al., 2021).

## 1.2. Justificación

A escala mundial, las repercusiones del cambio climático en la resistencia a la degradación y corrosión de varios materiales se someten a un análisis y un escrutinio rigurosos (Nogal et al., 2020). El fenómeno conocido comúnmente como corrosión atmosférica está íntimamente relacionado con los efectos generales del cambio climático, sobre los que influyen fundamentalmente factores ambientales específicos a los que está sometido el material, haciendo hincapié en los parámetros atmosféricos como la humedad y la temperatura, así como en las concentraciones de diversos

contaminantes presentes en el aire (Kumar et al., 2024). Dado que cada región geográfica tiene un microclima distinto caracterizado por sus condiciones ambientales únicas, el Fondo de la Unión Europea ha asignado recursos de manera estratégica para financiar un proyecto integral destinado a examinar la naturaleza corrosiva de la atmósfera en una serie de materiales que están expuestos en diversos lugares que comparten características comparables de regiones costeras del golfo de México: Cuducán y Campeche (México), Antillas francesas y Cuba, del que ha surgido la presente investigación. La interacción entre los materiales estudiados y los óxidos, las fluctuaciones de temperatura, los niveles de contaminación del aire y una miríada de otros factores contribuyentes tienen un profundo impacto en las tendencias corrosivas que muestran los materiales (Emetere & Olawole, 2019), a través de la cooperación triangular colaborativa establecida por la Unión Europea, México y Cuba se pretende la durabilidad de los materiales, con base en estudios que examinen la agresividad corrosiva de la atmósfera en los materiales. Esto incluye un análisis meticuloso de los procesos de envejecimiento y los fenómenos de degradación de los polímeros sometidos a condiciones de exposición variables, en particular en las regiones costeras de América Latina y el Caribe caracterizadas por un clima tropical, especialmente en zonas como las costas de Tabasco, Campeche, las Antillas Francesas y las costas de Cuba, donde los factores ambientales pueden tener importantes repercusiones en el rendimiento de los materiales. Estos extensos esfuerzos de investigación no solo mejoraran nuestra comprensión de la ciencia de los materiales en el contexto del cambio climático, sino que también aportan información valiosa sobre la gestión sostenible y la preservación de los materiales utilizados en diversas aplicaciones en las regiones afectadas.

El estado de Tabasco, que tiene clima tropical y cuyas condiciones climatológicas favorecen el incremento de la velocidad de los procesos de degradación de materiales, forma parte de las zonas de interés del proyecto por lo que resulta conveniente realizar los ensayos que permitan determinar, clasificar y estimar la corrosividad atmosférica, además de analizar la incidencia de los factores climatológicos sobre los resultados (Del Angel et al., 2021). En la presente Tesis se pretende realizar una evaluación paralela del proceso de corrosión atmosférica de cuatro metales y el envejecimiento de dos materiales poliméricos estabilizados y no estabilizados.

### **1.3. Pregunta de investigación**

¿Cómo afecta la agresividad atmosférica sobre la degradación y corrosión de los materiales en una atmósfera rural urbano en Tabasco?

### **1.4. Hipótesis**

La influencia de la agresividad atmosférica (TdH, SO<sub>2</sub>, Cl-) tiene mayor impacto que el microclima (radiación solar, precipitación pluvial, viento) de una región específica en la degradación de los materiales (metales y polímeros).

### **1.5. Objetivo General**

Categorizar la atmósfera de un ambiente rural-urbano de Tabasco, mediante ensayos de corrosión atmosférica de un año de materiales metálicos (acero galvanizado, cobre, aluminio, acero al carbono) y poliméricos (polietileno y polipropileno) para ver el efecto de las variables climáticas y los contaminantes sobre la velocidad de corrosión de los metales expuestos y el envejecimiento de los materiales poliméricos.

#### **1.5.1. Objetivos Específicos:**

1. Realizar un ensayo a la atmósfera en Cunduacán, Tabasco, mediante la exposición de probetas de acero al carbono, acero galvanizado, cobre, aluminio, polietileno y polipropileno bajo normativa ISO.
2. Evaluar la atmósfera con base en la deposición de contaminantes, el tiempo de humectación y la velocidad de corrosión de los materiales (Norma ISO 9223), para determinar la agresividad atmosférica.
3. Analizar los productos de corrosión de las probetas metálicas mediante las técnicas de caracterización: Microscopía Electrónica de Barrido y Difracción de Rayos X, y estimar la velocidad de corrosión por medio de la técnica de pérdida de masa y el tipo de corrosión por Ruido Electroquímico.
4. Analizar las probetas de polietileno y polipropileno a través de la técnica de FTIR para verificar la presencia de grupos carbonilos que promuevan la degradación de los materiales.
5. Realizar un análisis de la información, utilizando ecuaciones dosis repuestas para ver el efecto de las variables climáticas y los contaminantes sobre la velocidad de corrosión de los metales expuestos y la degradación de los materiales poliméricos.

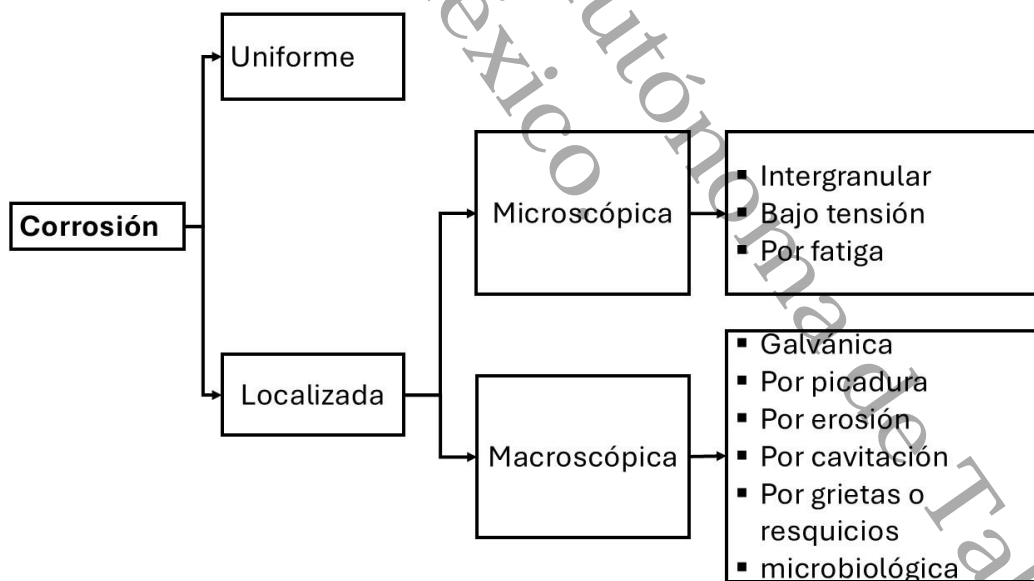
## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Corrosión

La corrosión, como fenómeno resulta inevitable y afecta a una amplia variedad de materiales utilizados en diversas industrias, especialmente la construcción. Es un proceso natural, que implica la degradación de los metales debido a reacciones químicas con su entorno, tiene implicaciones significativas en términos de costos económicos, seguridad estructural, sostenibilidad ambiental, además de repercusiones sociales debido a todo lo anterior (Fuad Khoshnaw, 2024).

La corrosión puede darse a través de procesos de naturaleza electroquímica, química o mixtas, siendo las condiciones ambientales en las que se encuentre el material en cuestión determinantes para que suceda uno u otro. Según el método de evaluación se diferencian dos formas: cualitativos y cuantitativos (Enikeev et al., 2020). De forma general puede ser como la que se presenta en la Figura 1.

Figura 1. Tipos de corrosión



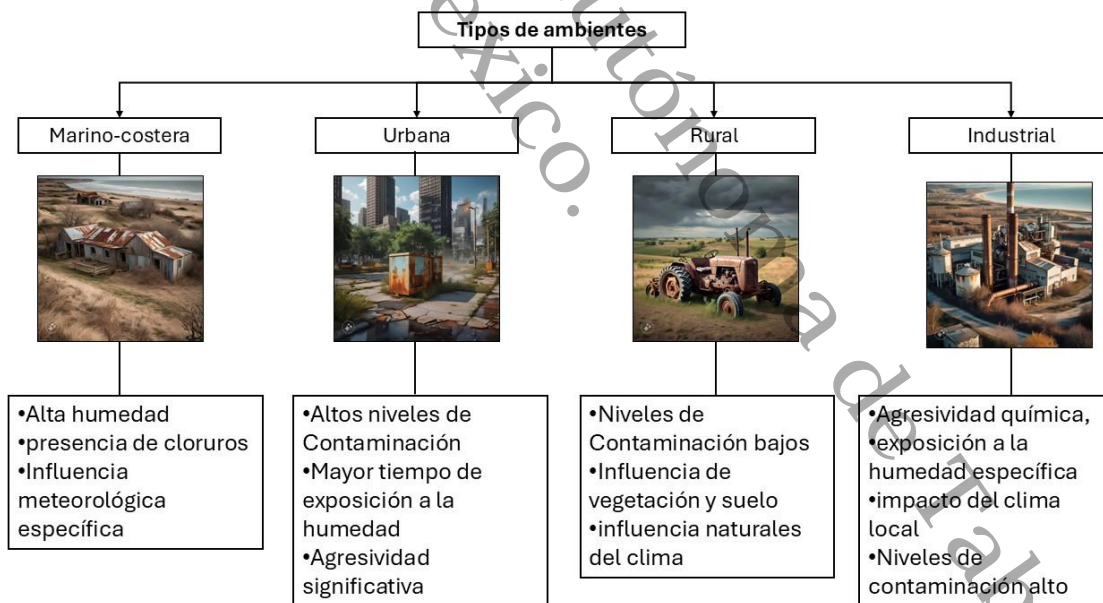
Nota: Elaboración propia con información de Raichev Raicho, & Veleva Lucien. (2009). *Corrosión de metales y degradación de materiales*.

La corrosión puede ser de origen antropogénico, como en el caso de ambientes industriales, donde a causa de los Procesos de tratamiento de hidrocarburos,

Tratamiento de aguas residuales, Refinerías de petróleo, Procesos textiles, etc.), se ve exacerbado el efecto de la corrosión en materiales y estructuras. En cambio, en materiales expuestos al ambiente la exposición al aire, la humedad y otros elementos presentes en la atmósfera a través de largos periodos de tiempo produce degradación debido a la corrosión atmosférica (Liu et al., 2024). Cuando se trata de ambientes urbanos y rurales. Lo que ha llevado a que la corrosión atmosférica esté siendo estudiada, proporcionando en cada ensayo de corrosión atmosférica información nueva y relevante con base en las normativas vigentes (Morcillo et al., 2019).

Cada ambiente atmosférico requiere considerar diferentes factores a influir en la aceleración de la corrosión, en la Figura 2, se ilustra la clasificación más común de los tipos de atmósfera y algunas de las características de cada una, debido a las cuales, es posible considerar el impacto que tendrá analizar la posición de las probetas de ensayo en atmósfera urbana, la incidencia de luz solar en ambientes marinos y la proximidad al mar y la presencia de humos industriales en atmósferas industriales.

Figura 2. Clasificación de los tipos de atmósferas más a comunes

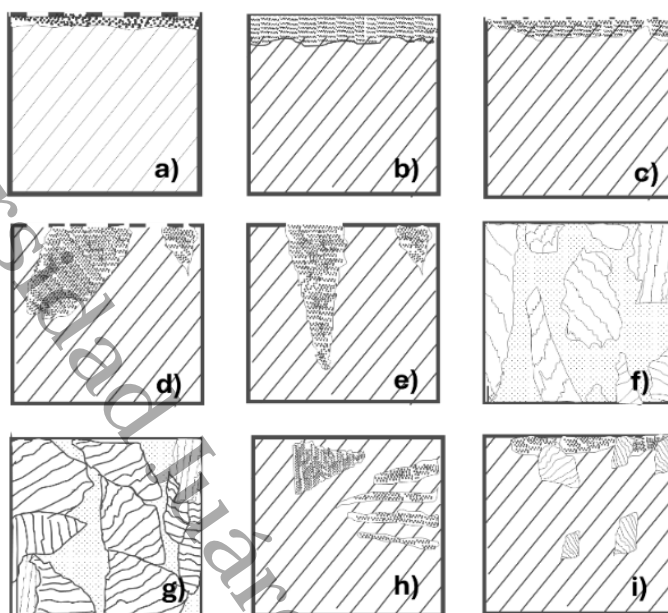


Los estudios de la corrosión atmosférica se basan en la interacción entre contaminantes atmosféricos como el  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_2^-$ , producidos por la cercanía con el mar y a las emisiones industriales respectivamente en función del tipo de ambiente (urbano, rural, industrial, marino) (Santa et al., 2022). En el caso de atmósferas urbanas, debido

a la presencia de nitratos y cloruros, en aleaciones de aluminio puede ocasionar corrosión intergranular (Maitra et al., 1982), por otro lado, en una atmósfera marina, los aceros al carbono presentan PdC en forma de óxido que promueve la pérdida del metal con el tiempo (Niu et al., 2023).

Cada tipo de material presentará daño en función del ambiente y la influencia de la presencia de contaminantes en el mismo. Entre las formas básicas de ataque corrosivo sobre metales, se podría mencionar nueve, que incluye; 1) La corrosión general se percibe sobre toda la superficie metálica expuesta a un ambiente corrosivo y puede a su vez presentar dos tipos de ataque: corrosión uniforme (Figura 3a) donde el progreso de este ataque resulta relativamente igual sobre toda la superficie y la corrosión no uniforme (Figura 3b) donde se desarrolla a una velocidad distinta y en diferentes áreas de la superficie (Shiri & Rezakhani, 2020). 2) Corrosión localizada: Otro tipo de corrosión es la que se da sobre zonas específicas, y dependiendo de la ubicación se puede presentar de distintas maneras: como manchas (Figura 3c) que resulta superficial a pesar de desarrollarse en áreas de tamaño relativamente grandes, o en forma de ampollas (Figura 3d) en donde las zonas que ocupa la corrosión son áreas pequeñas pero con mayor profundidad, puede darse como puntos con diámetros pequeños (Figura 3e) a los que se asocian picaduras conforme menor sea el área afectada. La corrosión de tipo intergranular (Figura 3f) se produce a lo largo de los límites de grano de un material metálico, afectando principalmente las zonas entre los granos en lugar de la superficie de estos (Zhang et al., 2023). Otra forma de corrosión localizada es la que se da con agrietamientos (Figura 3g) que necesita además de un ambiente corrosivo, tensiones mecánicas de estiramiento. La corrosión bajo depósito (Figura 3h) es común cuando existe la presencia de algún cúmulo de productos de corrosión u otras sustancias por debajo o en las vecindades de la superficie. Otro tipo de corrosión que ataca principalmente aleaciones es la corrosión selectiva estructural (Figura 2i) que tiende a favorecer la corrosión de una fase de la aleación por sobre la otra.

Figura 3. Tipos de ataque corrosivo sobre metales



Nota: Corrosión general: a) corrosión uniforme; b) corrosión no uniforme; Corrosión localizada: c) manchas; d) ampollas; e) puntos; f) intergranular; g) grietas; h) bajo depósito. Imagen adaptada de (Raichev Raicho & Veleva Lucien, 2009)

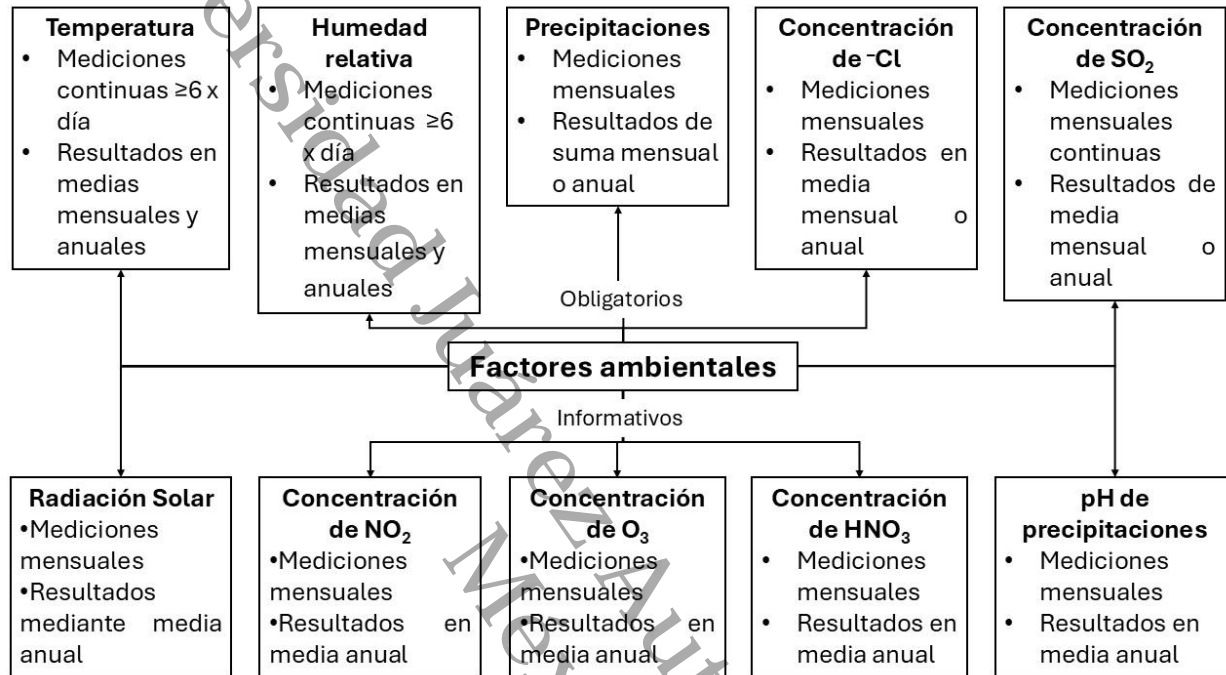
### 2.1.2. Factores climáticos en corrosión atmosférica

Los tipos de ataque corrosivo que sufren los sustratos metálicos se encuentran también en función del tipo de agentes corrosivos a los que se hallen expuestos, estos a su vez dependen de las variaciones en los patrones climáticos a las que se exponen estructuras y materiales (Guo et al., 2022; Xiong et al., 2020). En la Figura 4 se presenta un esquema de los principales factores ambientales que afectan la corrosión atmosférica, el tipo, número de mediciones y la expresión de los resultados cuando se realizan ensayos de corrosión atmosférica. El uso de estos factores para deducir ecuaciones dosis respuesta conforme al tipo de sustrato, y las concentraciones de dióxido de azufre y iones cloruro ha facilitado la predicción del comportamiento de la corrosión (Krivy et al., 2018a; Ozkan et al., 2023).

En un estudio de la corrosión atmosférica, se considera el Tiempo de Humectación (TdH) como el tiempo efectivo de corrosión de un metal, que no siempre coincide con su tiempo de exposición en un ambiente dado y surge del análisis de un complejo formado por datos de temperatura y humedad relativa durante periodos de tiempo de un año. Este TdH se da en mayor grado en ambientes marinos-costeros, así como en las regiones de

clima tropical húmedo, en donde se suele alcanzar hasta 8600 horas anuales (Shiri & Rezakhani, 2020).

Figura 4 Principales factores ambientales que afectan la corrosión atmosférica



Nota: Esquema elaborado a partir de la Norma ISO 9223:2012 (ISO, 2012)

El fenómeno de Cambio Climático que se ha venido experimentando desde hace décadas, crea condiciones que propician e intensifican los procesos corrosivos. El aumento de temperatura por ejemplo acelera químicamente la corrosión, y cambios en la composición atmosférica generan interacciones más perjudiciales entre los productos de corrosión (Ozkan et al., 2023). En este sentido, resulta crucial analizar la influencia del cambio climático en los procesos de corrosión de los materiales por varias razones, una de las principales es la variabilidad que se registra en condiciones ambientales, como la humedad, temperatura y la presencia de sustancias corrosivas.

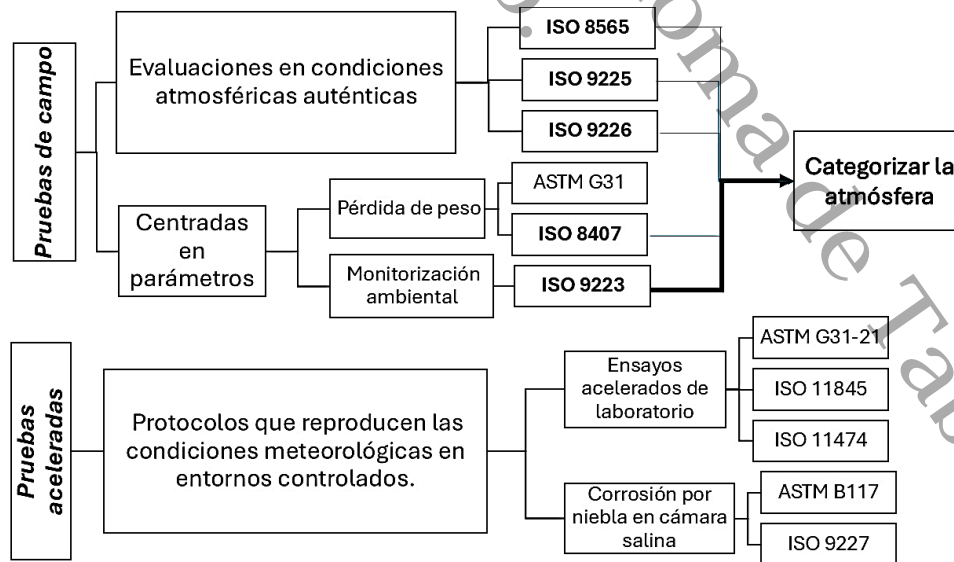
## 2.2. Normatividad para la estimación de la corrosión

El método más usado para ensayos de corrosión atmosférica en exterior es el que utiliza bastidores de exposición directa cuya construcción e implementación se basan en las normas ISO (International Organization for Standardization) y ASTM

(American Society for Testing and Materials) (Vera et al., 2023). Estos ensayos se complementan con técnicas de caracterización como análisis MEB para análisis morfológico y DRX para identificar los productos formados; incluso se han realizado evaluaciones del carácter de durabilidad de los Productos de corrosión formados durante la exposición mediante curvas de polarización anódica u otras técnicas electroquímicas además de la determinación de pérdida de masa (J. Chen et al., 2022). Esta últimas también están normadas por ISO 17475.

La norma ASTM G31-21, se utiliza en laboratorio para evaluar la pérdida de masa, las pruebas de corrosión en cámara salina utilizan las normas ISO 9227 o su contraparte en ASTM B117. El método de prueba por pérdida de peso se describe tanto en ASTM G31 e ISO 8407, determinan la velocidad de corrosión en unidades de tiempo, normalmente en  $\mu\text{g}/\text{año}$ . La normativa propuesta por la Organización Internacional de Normalización (ISO) para la corrosión de metales y aleaciones conlleva un compendio de normas entre las que se incluyen los procedimientos para llevar a cabo pruebas de campo. Las evaluaciones en condiciones atmosféricas auténticas se describen en el procedimiento ISO 8565 mientras que la categorización del ambiente se realiza con base en ISO 9223.

Figura 5. Procedimientos de pruebas para corrosión atmosférica



Nota: Las normas descritas en este esquema, se encuentran disponibles en los sitios oficiales de los organismos que las emiten. (ISO - Search, s/f)

Si bien estas normas y metodologías establecen un marco fundamental para las pruebas de corrosión, las inconsistencias observadas entre los resultados de laboratorio y los de campo subrayan la necesidad de perfeccionar constantemente los estándares de prueba para representar con mayor precisión las condiciones del mundo real (Mitali et al., 2022).

### 2.2.1. Norma ISO 9223 para categorización de agresividad atmosférica

La Norma ISO 9223 comprende las directrices para clasificar un ambiente basado en la velocidad de corrosión del metal, el TdH, y las velocidades de deposición de contaminantes. En la Tabla 1, se muestran las categorías de agresividad de ISO 9223 de acuerdo con la velocidad de corrosión de los metales.

Tabla 1. categoría de agresividad atmosférica de ISO 9223

Categoría	Corrosividad
C1	Muy baja
C2	Baja
C3	Media
C4	Alta
C5	Muy Alta
CX	Extrema

Nota: Información obtenida de ISO. (2012). ISO 9223:2012 Corrosion of metals and alloys-Corrosivity of atmospheres-Classification, determination, and estimation. En Reference number ISO (Vol. 9223).

La Tabla 2, contiene las clasificaciones de un ambiente con base en la velocidad de deposición de iones cloruro y la clasificación con base en la cantidad de deposición de SO<sub>2</sub>.

Tabla 2. Categorías de agresividad basa en deposición de Cl<sup>-</sup>, SO<sub>2</sub> y TdH con base en ISO 9223

Velocidad de deposición de cloruros mg/ (m <sup>2</sup> d)	Nivel	Velocidad de deposición de SO <sub>2</sub> mg/ (m <sup>2</sup> d)	Nivel	Tiempo de humectación h/a	Nivel
Sd ≤ 3	S <sub>0</sub>	Pd ≤ 4	S <sub>0</sub>	T ≤ 10	T <sub>1</sub>
3 < Sd ≤ 60	S <sub>1</sub>	4 < Pd ≤ 24	S <sub>1</sub>	10 < T ≤ 250	T <sub>2</sub>
60 < Sd ≤ 300	S <sub>2</sub>	24 < Pd ≤ 80	S <sub>2</sub>	250 < T ≤ 2500	T <sub>3</sub>
300 < Sd ≤ 1 500	S <sub>3</sub>	80 < Pd ≤ 200	S <sub>3</sub>	2500 < T ≤ 5500	T <sub>4</sub>
-	-	-	-	5500 < T	T <sub>5</sub>

Nota: Información obtenida de ISO. (2012). ISO 9223:2012 Corrosion of metals and alloys-Corrosivity of atmospheres-Classification, determination, and estimation.

### 2.2.2. Ecuaciones dosis-respuesta

Las ecuaciones de dosis-respuesta (EDR) se han formulado a partir de conjuntos de datos sobre la exposición de metales en ambientes exteriores. Estas funciones emplean metodologías de regresión estadística y relaciones de ley de potencia para pronosticar las pérdidas por corrosión, incorporando parámetros ambientales como la HR y la T, aunque no siempre resultan suficientes estas consideraciones (Panchenko et al., 2018). No obstante, las EDR permiten estimar las pérdidas por corrosión en el primer año de una variedad de metales, mediante el establecimiento de una correlación entre las velocidades de corrosión y las concentraciones de SO<sub>2</sub> además de integrar la duración de la exposición, lo que facilita pronósticos más precisos de las velocidades de corrosión en diferentes períodos temporales y validándolos empíricamente en diversas condiciones atmosféricas (Panchenko et al., 2019, 2020).

La norma ISO 9223:2012 proporciona EDR (Tabla 3) que predicen pérdidas por corrosión en función de las condiciones atmosféricas, utilizando parámetros como T, HR y concentraciones de contaminantes (ISO, 2012). Algunos autores indicaron que la sensibilidad de las velocidades de corrosión a los parámetros de entrada varía, con factores como la concentración de Cl<sup>-</sup> y el TdH que influyen significativamente en los resultados (Strieška & Koteš, 2019)(Krivý et al., 2018b).

Tabla 3. Ecuaciones dosis-respuesta de ISO9223:2012

Metal	Ecuación	R <sup>2</sup>	Ec.
Acero al carbón	$r_{corr} = 1.77 \cdot p_d^{0.52} \cdot \exp(0.020 \cdot RH + f_{st}) + 0.102 \cdot s_d^{0.62} \cdot \exp(0.033 \cdot RH + 0.040 \cdot T)$	0.85	(1)
Acero galvanizado	$r_{corr} = 0.0129 \cdot p_d^{0.44} \cdot \exp(0.046 \cdot RH + f_{Zn}) + 0.0175 \cdot s_d^{0.57} \cdot \exp(0.008 \cdot RH + 0.085 \cdot T)$	0.78	(2)
Cobre	$r_{corr} = 0.0053 \cdot p_d^{0.26} \cdot \exp(0.059 \cdot RH + f_{Cu}) + 0.01025 \cdot s_d^{0.27} \cdot \exp(0.036 \cdot RH + 0.049 \cdot T)$	0.88	(3)
Aluminio	$r_{corr} = 0.0042 \cdot p_d^{0.73} \cdot \exp(0.025 \cdot RH + f_{Al}) + 0.0018 \cdot s_d^{0.60} \cdot \exp(0.020 \cdot RH + 0.094 \cdot T)$	0.65	(4)

### 2.3. Corrosión en metales

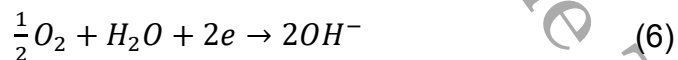
En la corrosión metálica, los principales factores que intervienen son los cambios de temperatura, velocidad del viento, lluvia, concentración de iones cloruro, SO<sub>2</sub>, que modifican la superficie del metal formando productos de corrosión (Wang et al., 2022).

En el contexto de la corrosión atmosférica, los mecanismos de corrosión de metales corresponden a la corrosión electroquímica, es decir, requiere de la interacción del metal con un medio de electrolito, generando la transferencia de carga de iones y/o electrones. El electrolito, con base en el medio ambiente del que provenga, por ejemplo, agua dulce o de mar, suelos, soluciones acuosas de sales, ácidos o bases, sales o metales fundidos, inducen a acelerar la corrosión en mayor o menor medida (Raichev Raicho & Veleva Lucien, 2009). Dada la naturaleza electroquímica del mecanismo, se puede decir que, sobre las superficies metálicas expuestas a corrosión, se encontrarán pequeñas pilas con reacciones de óxido-reducción en las que el proceso anódico se describe con la Ec. 5 para cualquier metal y el proceso catódico se describe por la Ec. 6 salvo para casos en los que los ambientes estén muy contaminados con productos ácidos que se dará de la forma de la Ec. 7.

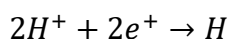
Proceso anódico



Proceso catódico de reducción de oxígeno

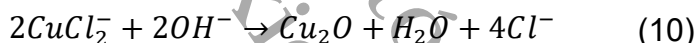
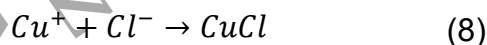


Ambientes contaminados con productos ácidos



### 2.3.1 Corrosión en Cobre

Los mecanismos referentes a la corrosión del cobre muestran un alto grado de complejidad y están sujetos a la influencia de una serie de factores ambientales que desempeñan un papel fundamental en la determinación del comportamiento ante la corrosión. La velocidad de corrosión del cobre, así como los diversos mecanismos involucrados, se ven afectados significativamente por el medio específico en el que se encuentra el cobre. En ambientes marino, por ejemplo, el subproducto de corrosión predominante es el cloruro de cobre,  $\text{CuCl}$ , con el que se inicia la reacción como se muestra en la Ec. 8. Este cloruro de cobre, que presenta una solubilidad considerable en soluciones salinas neutras, reacciona posteriormente para formar óxido de cobre (cuprita) (Ec. 9), que constituye el componente principal de las capas de productos de corrosión a mayor escala. En la Ec. 10, se presenta la reacción de la cuprita en agua de mar, se transforma en hidróxido de cobre, atacamita o malaquita (Grimm, 2021).

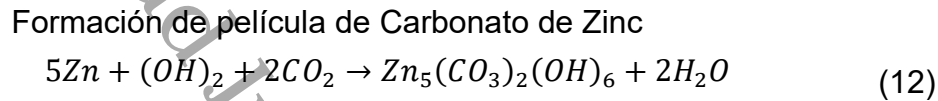
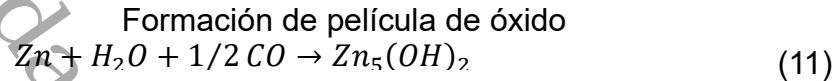


### 2.3.2. Corrosión en acero galvanizado

El mecanismo de corrosión asociado con el acero galvanizado comprende interacciones complejas que tienen lugar entre el revestimiento protector de zinc y varios factores ambientales, especialmente para este metal resulta perjudicial la presencia de iones de cloruro en el entorno circundante.

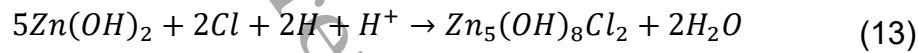
El acero galvanizado, puede sufrir corrosión galvánica al entrar en contacto directo con otros metales distintos provocando a su vez, corrosión localizada y comprometiendo la integridad del material. En este escenario, la reacción anódica (Ec. 11) se caracteriza por la oxidación del zinc, que sirve como ánodo de sacrificio, mientras que la reacción catódica (Ec.12) generalmente abarca la reducción de iones de oxígeno o hidrógeno, lo que resulta en un agotamiento acelerado del zinc de la superficie del acero galvanizado (Kou & Ma, 2022).

El acero galvanizado es generalmente resistente a la corrosión, sin embargo, es crucial reconocer que su rendimiento y sus cualidades protectoras pueden verse notablemente comprometidas en condiciones ambientales agresivas, particularmente en escenarios donde los iones de cloruro están presentes en concentraciones significativas. Las ecuaciones 11-14 describen los mecanismos de degradación de acuerdo con el tipo de contaminante.

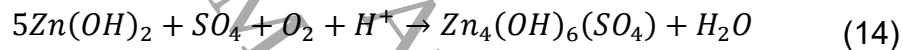


En presencia de contaminantes:

Contaminante Cl



Contaminante SO<sub>2</sub>



### 2.3.3. Corrosión en aluminio

Los mecanismos de corrosión de las aleaciones de aluminio están influenciados por una variedad de factores que dependen de los atributos microestructurales de las aleaciones, las condiciones ambientales en las que se colocan y las composiciones específicas de las propias aleaciones.

Las aleaciones de aluminio han presentado susceptibilidad a la corrosión intergranular, así como la formación de grietas (Q. Chen et al., 2024). El fenómeno de la corrosión por hendiduras en aleaciones de aluminio se agrava considerablemente por la presencia de iones cloruro, que facilitan los procesos de disolución localizados gracias a sus efectos micro galvánicos, especialmente cuando la concentración de estos iones es elevada ( Li et al., 2024). La exposición al agua de mar puede inducir un tipo específico de corrosión conocido como corrosión por exfoliación (Jin et al., 2023).

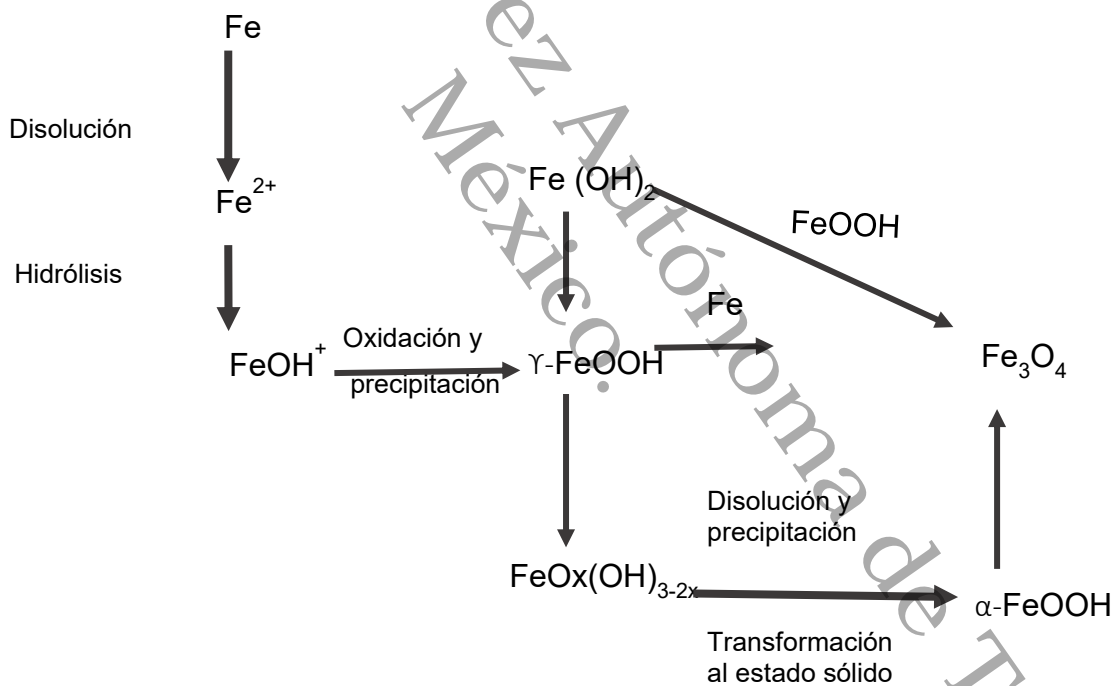
### 2.3.4 Corrosión en acero al carbono

Cuando el acero se somete a condiciones salinas, el proceso de corrosión se ve influido significativamente por el desprendimiento cíclico de los productos corrosivos,

junto con la progresiva formación de pitting o corrosión por picadura, en las superficies metálicas. Este mecanismo (Figura 6) en particular es de suma importancia para comprender el comportamiento general del acero al carbono frente a la corrosión, ya que pone de relieve la interacción dinámica entre los factores ambientales y las propiedades de los materiales que determinan la eficacia de las estrategias de protección contra la corrosión empleadas en entornos tan desafiantes (Qin et al., 2024).

Se sabe que la interacción entre el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el agua mejora significativamente las velocidades de corrosión, especialmente en escenarios caracterizados por temperaturas altas y niveles de pH bajos, lo que crea un entorno particularmente propicio para acelerar los procesos de corrosión (Fang et al., 2024; Hamad & Mohammed, 2024).

Figura 6 Mecanismo de corrosión del acero al carbono



## 2.4. Polímeros

Los materiales poliméricos orgánicos han experimentado una diversificación en sus aplicaciones en varios sectores industriales contemporáneos, que destacan especialmente por su papel fundamental en la producción de componentes, maquinaria, recubrimientos protectores para equipos e instalaciones que prevalecen en la industria química, atribuidos principalmente a su notable resiliencia cuando se exponen a

condiciones ambientales agresivas (Krauklis et al., 2022). Los materiales se fabrican como materiales innovadores que tienen propiedades fisicoquímicas superiores los cerámicos.

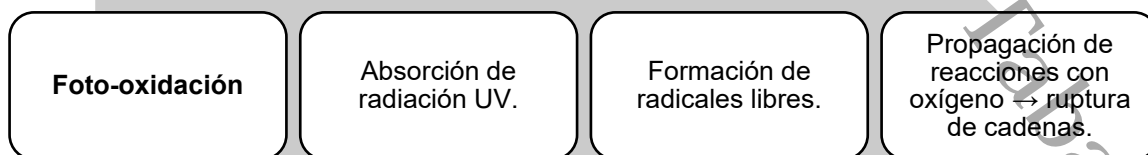
Dentro del ámbito práctico de la protección contra la corrosión, así como en la fabricación de diversos componentes y aparatos, se emplea frecuentemente una vasta gama de polímeros de ingeniería sintéticos, que incluyen, tereftalato de polietileno (PET), poliacrilonitrilo, poliuretano termoplástico (TPU), polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno de baja densidad (LDPE), entre otros. En general, el interés en el desarrollo de materiales poliméricos orgánicos demuestra la importancia de seguir avanzando en las aplicaciones industriales existentes y emergentes (Cosnita et al., 2023).

#### **2.4.1. Envejecimiento de polímeros**

El envejecimiento de polímeros se refiere al deterioro progresivo de las propiedades físicas y químicas de los materiales poliméricos con el tiempo debido a la exposición a factores ambientales como la temperatura, la humedad, la radiación solar y otros agentes externos. Este proceso puede afectar características como la resistencia, el módulo elástico, entre otros, lo que puede influir en la durabilidad y el rendimiento de los materiales compuestos poliméricos utilizados, por ejemplo, en aplicaciones aeroespaciales y marinas (Kablov & Startsev, 2020a, 2020b).

La radiación solar, especialmente su componente ultravioleta (UV), puede activar reacciones de oxidación y entrecruzamiento en las matrices poliméricas, lo que lleva a la degradación de los materiales compuestos poliméricos (Longo et al., 2011).

Figura 7. Proceso de Fotooxidación de polímeros

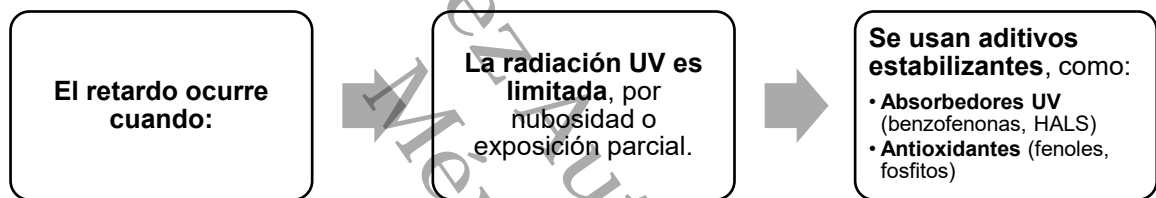


Nota: Elaborado a partir de información de Longo, C., Savaris, M., Zeni, M., Brandalise, R. N., & Grisa, A. M. C. (2011). Degradation study of polypropylene (PP) and bioriented polypropylene (BOPP) in the environment. *Materials Research*, 14(4), 442–448. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000080>

Esta degradación es visible en alteraciones en la superficie, como cambios de color, formación de grietas, descamación, entre otros. Además, la radiación solar puede acelerar la degradación de los polímeros cuando se combina con otros factores como la temperatura y la humedad, lo que resulta en una disminución de la resistencia y otras propiedades de los materiales (Kychkin et al., 2020).

Para evaluar la resistencia a la degradación de un polímero específico se pueden utilizar ensayos simulados (emulando condiciones de radiación solar con radiación UV, o temperaturas y humedad específica), y también realizar exposición de muestras de polímeros en condiciones ambientales monitoreadas correctamente (como la exposición a la radiación solar, la humedad, la temperatura y otros factores ambientales relevantes) (Abaroa-Pérez et al., 2022).

Figura 8. Principales formas del retardo en el envejecimiento



Nota: Elaborado a partir de la información en Pertin, T., Minatchy, G., Adoue, M., Flory, A., & Romana, L. (2020). Investigation of nanoindentation as a fast characterization tool for polymer degradation study. *Polymer Testing*, 81, 106194. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2019.106194>

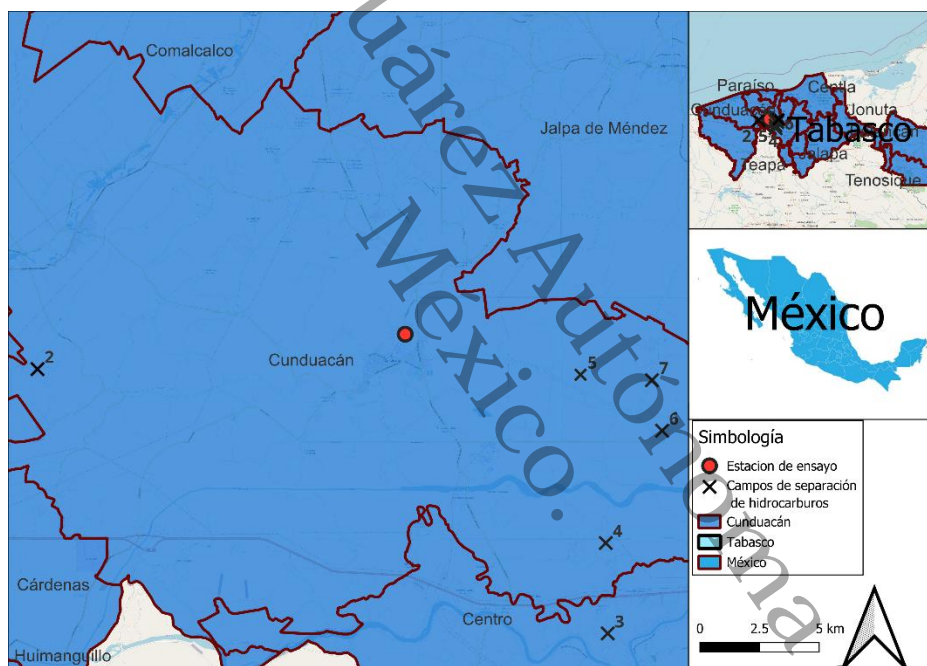
El ensayo que ha dado mejores resultados en la evaluación de la degradación de polímeros ha sido el análisis ATR-FTIR, el cual permitió clasificar los pellets de polietileno según su proceso de degradación por fotooxidación (Pertin et al., 2022). Este método de análisis ha sido útil para determinar el grado de degradación de los materiales poliméricos y su influencia en la adsorción de contaminantes químicos.

## CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

### 3.1. Localización de la estación de ensayo

El bastidor de ensayo se ubicó en la azotea del edificio del Centro de Investigación de Ciencia y Tecnología Aplicada de Tabasco (CICTAT), que se encuentra ubicado en la Unidad Chontalpa de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, con coordenadas  $18^{\circ} 4' 33.2''$  N,  $93^{\circ} 10' 8.28''$  y que se encuentra a 50 km de la costa. En la Figura 9 se presenta la ubicación del sitio, así como de las fuentes de emisión de contaminantes industriales señalizadas con las cruces negras.

Figura 9 Localización de la zona de exposición en Cunduacán, Tabasco



*Nota. Elaboración propia con datos de INEGI2025 en software QGis®*

### 3.2. Caracterización de los materiales

#### 3.2.1 Composición química de las muestras

Los materiales metálicos que se utilizaron para el ensayo de corrosión fueron cuatro de los metales más utilizados en la construcción: acero al carbono, acero galvanizado, aluminio y cobre. La composición de estos metales se enlista en la Tabla 4.

Tabla 4 Composición química de las probetas metálicas

Metal	Composición
Acero al carbono	C: 0.15-0.2%, Cu 0.03% to 0.10%, P < 0.07%.
Acero galvanizado	Espesor del revestimiento $\approx$ 21 $\mu$ m of zinc.
Aluminio	99.5 % min.
Cobre	Cobre 99.85%. Principales impurezas: S (0.01%), Bi (0.003%), Pb (0.005%), Sb (0.05%).

Los materiales poliméricos utilizados fueron de dos: polietileno y polipropileno, del primero se utilizaron dos composiciones diferentes y del segundo se utilizaron tres composiciones distintas como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5 Composición química de los materiales poliméricos

Material	Identificación	PPh resina	AO	HALS bajo PM	HALS alto PM
Polipropileno	PP1	99.00%	1.00%	-	-
	PP2	98.80%	1.00%	0.15%	0.05%
Polietileno	PE7	99.00%	1.00%	-	-
	PE8	98.80%	1.00%	0.2%	-
	PE9	98.80%	1.00%	0.10%	0.10%

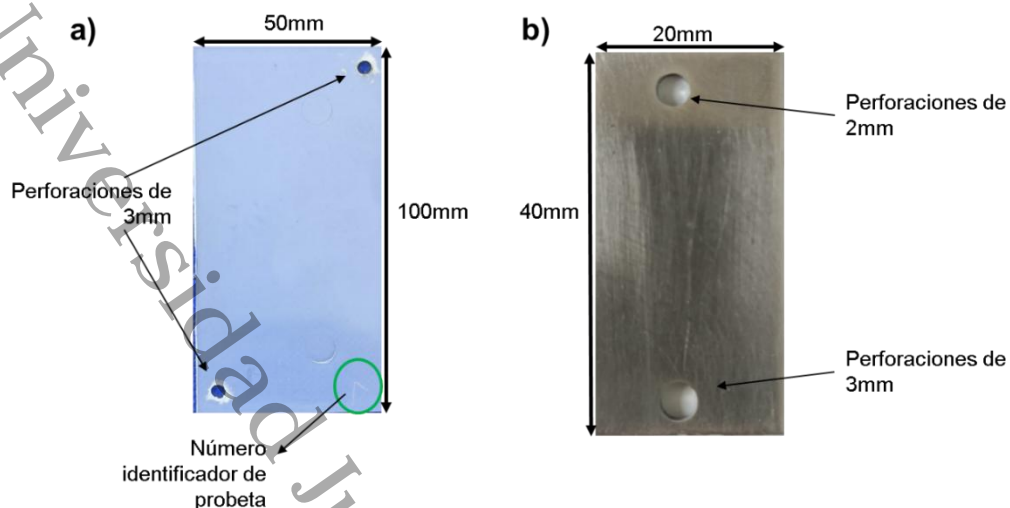
Nota: PPh: homopolimeros polipropileno, HALS: estabilizador de luz de amina, AO: antioxidante

### 3.3. Diseño de la estación de ensayo atmosférico

#### 3.3.1. Diseño de probetas (metálicas y poliméricas)

El diseño de las probetas se realizó siguiendo las directrices de la norma ISO 8656, se utilizaron probetas poliméricas de 100x50x2 mm (Figura 10a) y probetas metálicas de dimensiones 20x40x1 mm (Figura 10b). A cada probeta, como se muestra en la Figura 10 se le realizaron 2 perforaciones para colocarlos en el bastidor y que sirviera como identificador de la cara expuesta (ISO 8565, 2011).

Figura 10. Probetas para exposición al ambiente.



Nota: Probetas utilizadas para exponer a la atmósfera, a) Probeta de polipropileno con dos perforaciones, marcada para identificar el material y tipo de material, b) probeta metálica de aluminio preparada para exposición, con dos perforaciones

### 3.3.2. Limpieza de probetas previo a la exposición

Las probetas fueron sometidas al proceso descrito en el esquema de la Figura 11, a cada una de las probetas se realizó un lijado en los bordes, y a continuación se pulieron con papel de lija de grano 800, pasando por grano 1000, 1500 y 2000 esto con la finalidad de eliminar rebabas en las caras y bordes de las probetas y evitar así posibles sitios activos que inicien la corrosión. También se sometieron a limpieza con acetona en baño ultrasónico, secado con aire caliente y almacenado en papel secante dentro de bolsas de plástico en un desecador hasta el momento de la exposición. Las probetas limpias y secas se pesaron en una balanza analítica VELAB V300. Se tomaron las medidas de sus dimensiones y se realizó un registro.

El procedimiento para las probetas de polímeros consistió en limpieza con agua desionizada, secado con paño de algodón y perforación para fijar al marco de exposición.

Figura 11 Proceso de preparación de probetas metálicas

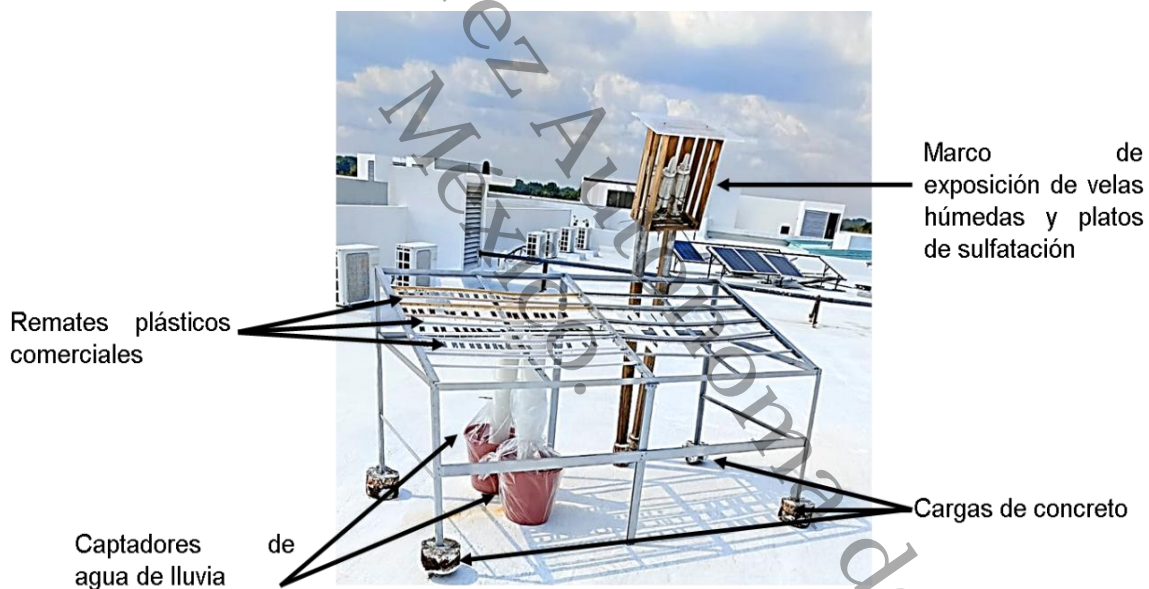


### 3.4. Bastidor de exposición

El bastidor de exposición se construyó de aluminio como se muestra en la Figura 12. Se realizó el armado con un ángulo de inclinación de  $18^\circ$  con respecto a la horizontal de la estructura, para hacer coincidir el ángulo de inclinación con las coordenadas geográficas del sitio de exposición, se le colocaron cargas fijas a base de cemento en los soportes de la estructura para añadir resistencia. Para evitar la formación de pares galvánicos, se colocaron remates plásticos comerciales entre las probetas y el bastidor, que además auxiliaron en la fijación de las probetas al marco de ensayo.

El bastidor se colocó orientado hacia el sur para obtener la mayor exposición al sol. Como se observa en la Figura 12, se colocaron captadores de la escorrentía de los metales y del agua de lluvia, y un marco de exposición de velas húmedas y platos de sulfatación.

Figura 12. Bastidor de exposición de las probetas



#### 3.4.1. Secuencias de exposición

La secuencia de exposición se realizó como se muestra en la Tabla 6, por cada periodo se expusieron 3 probetas del mismo material, adicional a una probeta para realizar ruido electroquímico DRX Y MEB. El total de probetas metálicas expuestas durante el ensayo fue de 68 probetas. La exposición de las probetas comenzó el 28 de febrero de 2024 y se retiraron de la exposición el 28 de febrero de 2025, doce meses después.

Tabla 6. Secuencia de exposición de probetas metálicas

Metal	Caract.	Tiempos de exposición (meses)								
		3	Caract.	6	Caract.	9	Caract.	12	Caract.	Total
Acero al Carbono	1	3	1	3	1	3	1	3	1	17
Aluminio	1	3	1	3	1	3	1	3	1	17
Acero Galvanizado	1	3	1	3	1	3	1	3	1	17
Cobre	1	3	1	3	1	3	1	3	1	17
									Total	68

Nota: Caract. Equivale a la probeta para caracterización por Ruido electroquímico, MEB, DRX.

Las probetas de polímero se expusieron como se indica en la Tabla 7, en este caso, se expuso una probeta por periodo (4 y 12 meses) además de una probeta que se dejó y resguardó como probeta testigo. El total de probetas de polímero expuestas fue de 15 probetas, la exposición inició el 26 de abril de 2024 y se retiraron el 26 de abril de 2025.

Tabla 7. Secuencia de exposición de probetas de polímero

Polímero	Blanco Ref.	Tiempos de exposición		
		4 meses	12 meses	Total
PP1	1	1	1	3
PP2	1	1	1	3
PE 7	1	1	1	3
PE8	1	1	1	3
PE9	1	1	1	3
				<b>15</b>

### 3.5. Caracterización medioambiental de la atmósfera

La caracterización medio ambiental de la atmósfera se realizó como indica la Norma ISO 8565, por lo que se requirió información de los factores ambientales descritos en la Tabla 6. Estos factores, se tomaron de la Comisión Nacional del Agua, a través de los reportes de sus estaciones meteorológicas (*Servicio Meteorológico Nacional, s/f*).

Tabla 8. Factores medio ambientales monitoreados durante el tiempo de exposición

Factor ambiental	Unidad	Tipo y número de mediciones	Expresión de los resultados
------------------	--------	-----------------------------	-----------------------------

Temperatura del aire	° C	Continua	Promedio por mes y por año
Humedad relativa	%	Continua	Promedio por mes y por año
Precipitaciones	mm	Mensual	Suma mensual y suma anual
Velocidad de deposición de SO <sub>2</sub>	mg/ (m <sup>2</sup> .d)	mensual	Promedio mensual y anual
Velocidad de deposición de Cloruro	mg/ (m <sup>2</sup> .d)	mensual	Promedio mensual y anual

### 3.5.1. Tiempo de humectación

Para determinar la duración de la humectación, es imprescindible obtener datos de humedad relativa (%) mediante mediciones continuas, asegurándose de que el intervalo entre las mediciones no supere las seis horas. Además, los datos de temperatura (°C) deben recopilarse de forma continua, respetando la misma restricción de intervalo de seis horas [5]. Las estaciones meteorológicas operadas por la Comisión Nacional del Agua y en México proporcionan datos a intervalos de diez minutos, lo que cumple con estas estipulaciones. En la Figura 13 se muestra una descripción de los pasos a seguir para realizar el cálculo del tiempo de humectación y analizar los patrones de comportamiento del complejo Temperatura-Humedad relativa (CT-HR). El tercer paso, el procesamiento de los datos se hizo en un código en software Octave cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 14, a partir del código se realizó tanto el cálculo de TdH como el análisis de los comportamientos de las variaciones de las Temperaturas y humedades relativas en promedios mensuales durante el tiempo de estudio.

Figura 14. Diagrama de flujo del código de octave

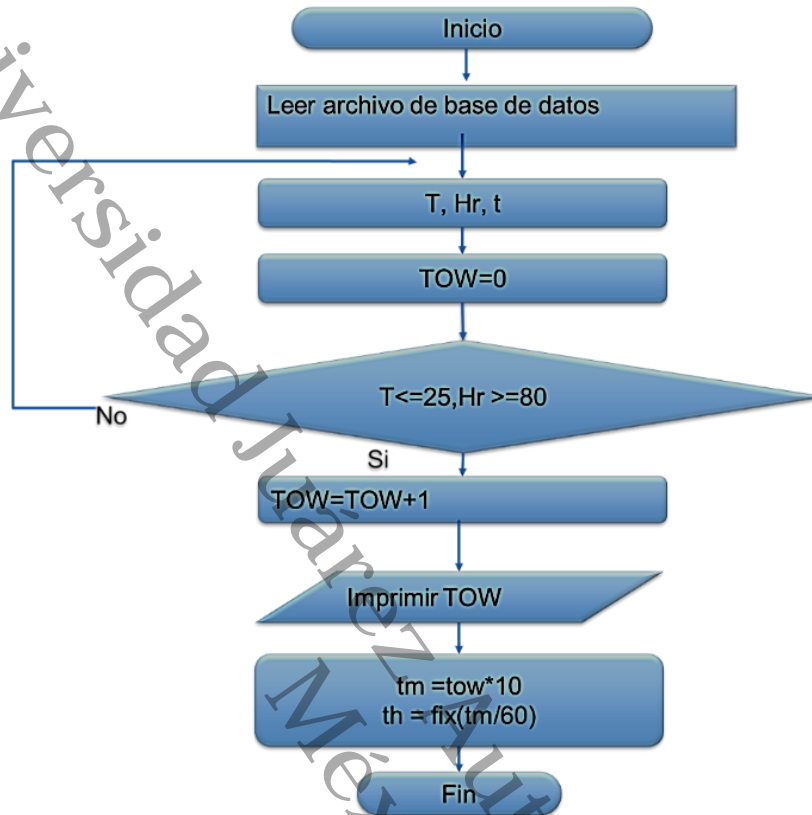
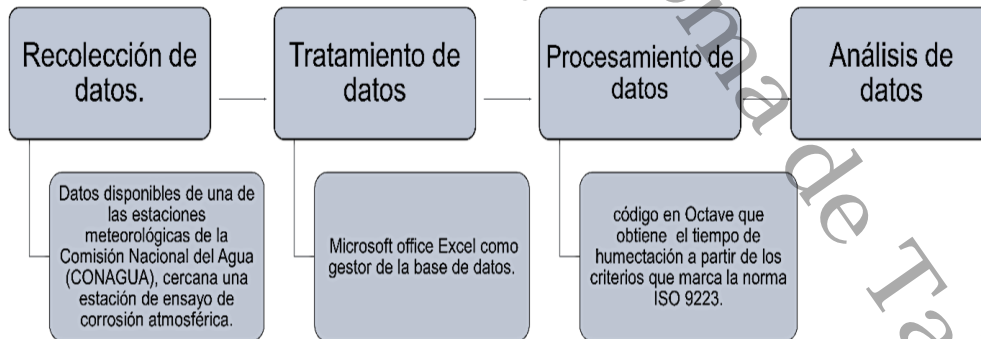


Figura 13. Proceso para realizar el cálculo del tiempo de humectación

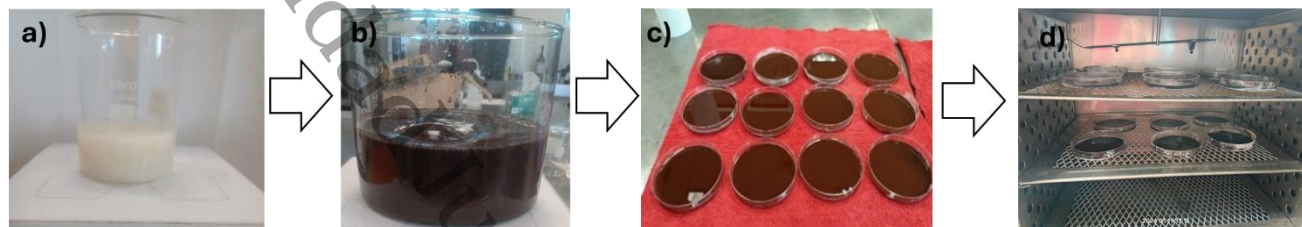


### 3.5.2. Platos de sulfatación

La preparación de platos de sulfatación se hizo siguiendo la Norma ISO9225:2012. Tiene como principio que el dióxido de azufre atmosférico (SO<sub>2</sub>) sufre una reacción con el dióxido de plomo (PbO<sub>2</sub>), lo que resulta en la formación de sulfato de plomo (PbSO<sub>4</sub>).

Los platos se expusieron durante 30 días, tras la exposición, se retiraron para analizar el contenido residual de sulfato y determinar el grado de absorción del dióxido de azufre. La velocidad de deposición de dióxido de azufre se cuantifica en miligramos por metro cuadrado por día [ $\text{mg}/(\text{m}^2\text{-d})$ ] y con base en los valores obtenidos se asigna categoría de acuerdo con la norma ISO 9223.

Figura 15 Preparación de platos de sulfatación, como se describe en la Norma ISO 9225.



*Nota:* a) Se preparó una pasta de papel filtro con goma de tragacanto en agitación continua; b) luego de dos horas se añadió dióxido de plomo, c) después de se depositó la solución en cajas Petri; d) que posteriormente se dejaron secar por 20 horas a  $60^\circ\text{C}$ .

### 3.5.3. Velas húmedas

La vela húmeda se realizó con gasa húmeda, que envuelve a un tubo de ensayo de 25 mm, que se introdujo por un tapón perforado que sella un frasco de plástico al que se le colocó una solución de 40% v/v de glicerol. Las velas se expusieron durante 30 días. La cantidad de cloruro acumulado se evaluó por titulación con nitrato de plata (ver anexo 3). Posteriormente, se calculó la velocidad de deposición de cloruro, expresada en miligramos por metro cuadrado por día [ $\text{mg}/(\text{m}^2)$ ] y se realizó la clasificación de agresividad atmosférica con base en el contenido de cloruros de acuerdo con la norma ISO 9223. En la Figura 16 se ilustra el proceso de preparación de las velas húmedas de acuerdo con la norma ISO 9225.

Figura 16 Procedimiento para preparar velas húmedas



### 3.6. Estimación de velocidad de corrosión

La evaluación de la velocidad de corrosión de las probetas de cobre, acero galvanizado, hierro y aluminio, se llevó a cabo de acuerdo con la metodología descrita en la norma ISO 8407 (2009) se realizó la limpieza de la probeta por inmersiones sucesivas en solución química (específica de cada metal) para eliminar los contaminantes de la superficie. En la Tabla 9 se ofrece una descripción detallada de las composiciones utilizadas.

Tabla 9. Soluciones químicas preparadas para la limpieza de productos de corrosión después de los periodos de exposición

Material	Químicos	Tiempo	Temperatura
Acero	500 ml de ácido clorhídrico (HCl, $\rho = 1,19$ g/ml)	10 min	25 °C
	3,5 g hexametilentetramina		
	Agua destilada hasta completar 1000ml		
Zinc	250 g glicina (NH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COOH)	5 min	20 °C a 25 °C
	Agua destilada hasta completar 1 000 ml (solución saturada)		
Cobre	50 g de ácido sulfámico	5 min a	20 °C a 25 °C
	Agua destilada hasta completar 1 000 ml		

La eliminación satisfactoria de los productos de corrosión permitió un análisis de los datos iniciales de las probetas expuestas de cada material, y los resultados de pérdida de masa de la limpieza y realizar el cálculo de la velocidad de corrosión de las probetas como marca la norma ISO 9226(ISO 9226, 2012) utilizando la ecuación 15:

$$r'_{corr} = \frac{\Delta m}{A \cdot \rho \cdot t} \quad (15)$$

Donde:

$r'_{corr}$ : velocidad de corrosión ( $\mu\text{m/a}$ )

$\Delta m$ : pérdida de masa del metal (g)

$A$ : área de metal expuesta ( $\text{m}^2$ )

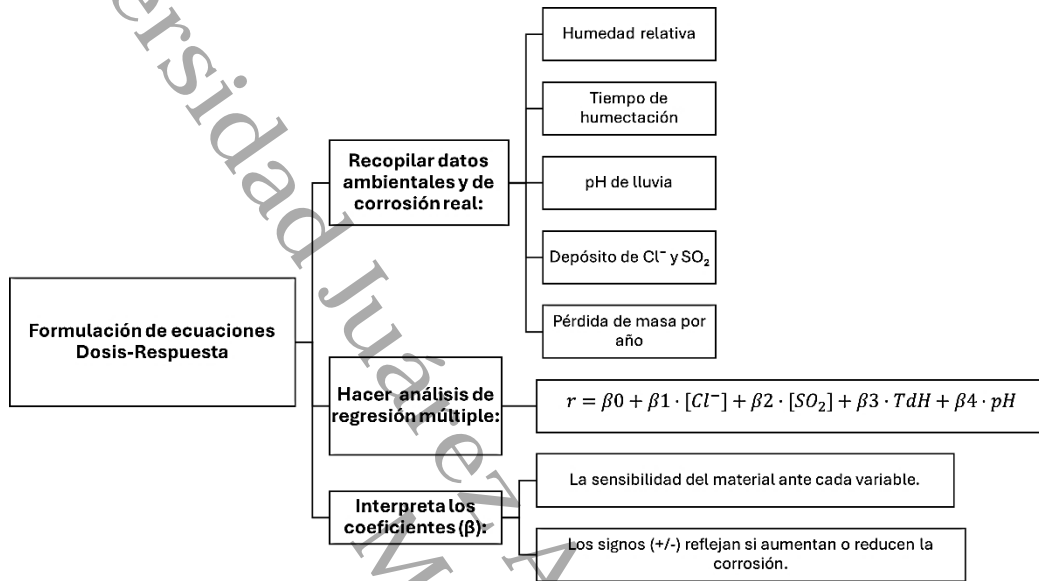
$\rho$ : densidad del metal expuesto ( $\text{g/cm}^3$ )

$t$ : tiempo de exposición (años)

Posterior a la obtención de los factores ambientales y la velocidad de cada material, se realizó el ajuste de las ecuaciones dosis-respuesta mediante regresión estadística, la

Figura 17 muestra los pasos para la formulación de las ecuaciones dosis-respuesta y su relación con la corrosión.

Figura 17. Metodología para formular ecuaciones dosis-respuesta



### 3.7. Análisis de productos de corrosión

Para identificar los productos de corrosión formados sobre las probetas de estudio, se utilizaron para el caso de las probetas metálicas, las técnicas DRX además de MEB. Para el caso de las probetas de polímero, se utilizaron las técnicas de MEB, Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier en el módulo de Reflectancia Atenuada.

#### 3.7.1. Difracción de Rayos X (DRX)

La caracterización por difracción de rayos X (DRX) se realizó utilizando el difractómetro Bruker D2-phaser, operando a 30 kV y 10 mA, equipado con un detector Lynxeye y un ánodo Cu-K $\alpha$  (1.5406 Å). La muestra para el análisis se preparó realizando corte en el centro de la probeta expuesta, se analizaron en un rango de 2 $\theta$  de 30° a 80°, con incrementos de 0.02° y un tiempo de 3 segundos por posición.

#### 3.7.2. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Los análisis de Microscopía Electrónica de barrido se realizaron sobre las probetas utilizando un Microscopio electrónico de Barrido JEOL JSM-6010La con

detectores de electrones retro dispersados, electrones secundarios y energía dispersiva de Rayos X.

Se analizaron las probetas testigo, así como una probeta de cada material expuesto por periodo. Los aumentos alcanzados en los análisis fueron desde 100x hasta 1500x. También se realizó análisis de Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS).

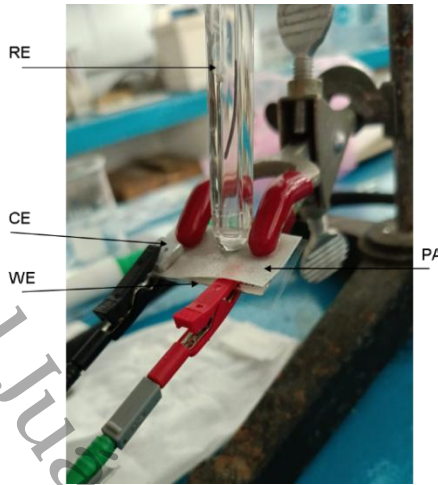
### **3.7.3. Espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)**

La Espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) se utilizó para analizar las probetas de polímero, se utilizó el Módulo de Reflectancia Total Atenuada (ATR) en un rango de 700 a 3800  $\text{cm}^{-1}$ . Utilizando un espectrofotómetro Nicolet IS50 Thermo Scientific con barridos de 64 por muestra.

### **3.7.4. Ruido electroquímico**

Las evaluaciones del ruido electroquímico se realizaron empleando una configuración de un par de electrodos de trabajo, como se ilustra del lado derecho de la figura 18. El primer electrodo de trabajo (WE), de la probeta de metal corroída, el segundo electrodo de trabajo (CE), de placa del mismo metal de 1  $\text{cm}^2$ , sometido a un proceso de lijado para lograr un acabado superficial caracterizado por 600 granos, seguido de un procedimiento de lavado y secado minucioso con acetona. Un paño absorbente (PA), de las mismas dimensiones de la probeta (20x40mm) y 1 mm de grosor, se colocó estratégicamente entre WE y CE para facilitar las mediciones electroquímicas. Posteriormente, esta tela se saturó con un volumen de 1 ml de agua destilada, que luego interactuó con los componentes solubles de las películas de producto de la corrosión que se habían formado en las superficies de ambas probetas de metal, lo que da lugar a la formación de un electrolito acuoso. La adquisición de las mediciones del ruido actual comenzó 5 minutos después del establecimiento de la configuración electroquímica, lo que garantizó que el sistema se hubiera estabilizado adecuadamente. Las mediciones del ruido electroquímico se realizaron utilizando un instrumento VersaSTAT 3A, capaz de registrar un total de 2100 puntos de datos, y cada adquisición de datos se realizó a intervalos de 0,5 segundos.

Figura 18. Proceso para realizar ruido electroquímico sobre probetas metálicas



Nota: Fotografía el arreglo utilizado para realizar las pruebas de ruido electroquímico.

Los datos resultantes del análisis se utilizaron para determinar la resistencia al ruido ( $R_n$ ) mediante el dividendo de la desviación estándar de potencial ( $\sigma_E$ ) y la desviación estándar de corriente ( $\sigma_I$ ) como lo muestra la ecuación 12.

$$R_n = \frac{\sigma_E}{\sigma_I} \quad (16)$$

La característica de protección de los productos de corrosión formados en las muestras se determinó a través del ruido de corriente electroquímica utilizando la desviación estándar de la señal de ruido de corriente y el índice de localización (IL) que se determina según:

$$IL = \frac{\sigma_I}{I_{RMS}} = \frac{\sigma_I}{\sqrt{\sigma_I^2 - \bar{x}_I^2}} \quad (17)$$

Tabla 10. Correlación entre el IL y el tipo de corrosión

Tipo de corrosión	Valores de IL	
	max	mín
Localizada	1.0	0.1
Mixta	0.1	0.01
Uniforme	0.01	0.001

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados de la evaluación de la agresividad atmosférica de acuerdo con la norma ISO 9223, y los resultados de la caracterización de los metales expuestos al ambiente, así como información de los eventos de precipitación, que permitieron determinar el pH de la lluvia y el cálculo del TdH

### 4.1. Precipitación pluvial y pH

Durante el periodo de enero 2024-febrero 2025, se registraron 60 eventos de precipitación. En la Figura 19, se presenta la información de las precipitaciones mensuales (mm) y en la línea negra punteada se muestra el promedio de las precipitaciones mensuales (mm). Los meses secos fueron marzo a julio y diciembre 2024, debido a mínima o nula precipitación. Los meses con humedad significativa fueron: enero (46 mm), mayo (25 mm), septiembre (49 mm), octubre (97 mm), noviembre (32 mm) y febrero 2025 (130 mm), estos meses presentan precipitación más alta, especialmente octubre y febrero, en estos meses reporta un valor más alto del TdH.

En total, el promedio de las precipitaciones fue de 427 mm acumulado durante el año, esto es por debajo de la media anual de precipitación para el estado de Tabasco, según datos de la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua, 2025). Los 130 mm de precipitaciones acumulados durante febrero 2025 fueron 16 veces más altas que los 8 mm acumulados en febrero 2024.

Otro factor que influyen en el proceso corrosivo de la atmósfera sobre metales expuestos es el nivel de acidez de los eventos pluviales, que generalmente se conoce como (runoff, en inglés) y la literatura en español reconoce como escorrentía (ver anexo 4); la Tabla 11, muestra el promedio mensual del pH de precipitaciones directas (lluvia) y las escorrentías de acero al carbón, acero galvanizado, aluminio y cobre; cada valor va acompañado de su desviación estándar (S), lo que indica la variabilidad del pH durante cada mes.

La escorrentía del acero al carbón mostró valores de pH más neutros que la lluvia, sin embargo, en septiembre y febrero el pH bajó a 6.31 y 6.44, respectivamente, lo que coincide con meses de mayor precipitación. Esto indica una mayor velocidad de

disolución de productos de corrosión y renovación de la película del metal, manteniendo la superficie activa para nuevos procesos.

Figura 19. Total, de precipitaciones sucedidas durante un año (enero 2024-febrero 2025)

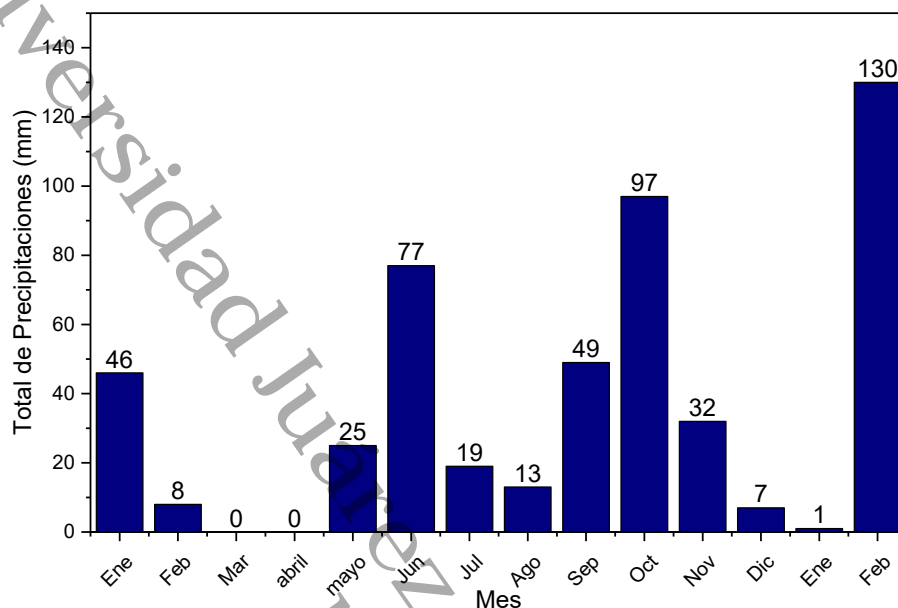


Tabla 11. Promedio mensual del pH de las precipitaciones registradas y datos de pH la escorrentía por metal (agosto 2024 – febrero 2025)

Año	Mes	Lluvia		Acero al carbón		Acero galvanizado		Aluminio		Cobre	
		Prom	S	Prom	S	Prom	S	Prom	S	Prom	S
2024	Ago	4.30	0.17	6.23	0.04	6.38	0.13	7.05	0.09	6.85	0.09
2024	Sep	4.67	0.22	6.31	0.22	6.73	0.54	6.72	0.13	7.26	0.10
2024	Oct	4.88	0.21	6.88	0.33	7.12	0.22	6.78	0.21	6.81	0.30
2024	Nov	4.90	0.00	6.35	0E+00	7.00	1.88E-07	6.94	1.69E-07	6.98	1.19E-07
2024	Dic	5.03	0.20	7.24	0.05	7.35	0.41	6.95	0.53	7.11	0.25
2025	Ene	4.91	0.03	7.14	0.23	7.14	0.23	6.89	0.03	6.75	0.14
2025	Feb	5.23	0.16	6.44	0.42	6.18	0.15	6.47	0.43	5.97	1.00

El pH del aluminio (pH 6.47 - 7.05) presenta valores de pH cercanos a la neutralidad (6.72 - 7.05) con muy baja desviación estándar, lo cual indica una alta estabilidad química en la interfase metal-electrolito.

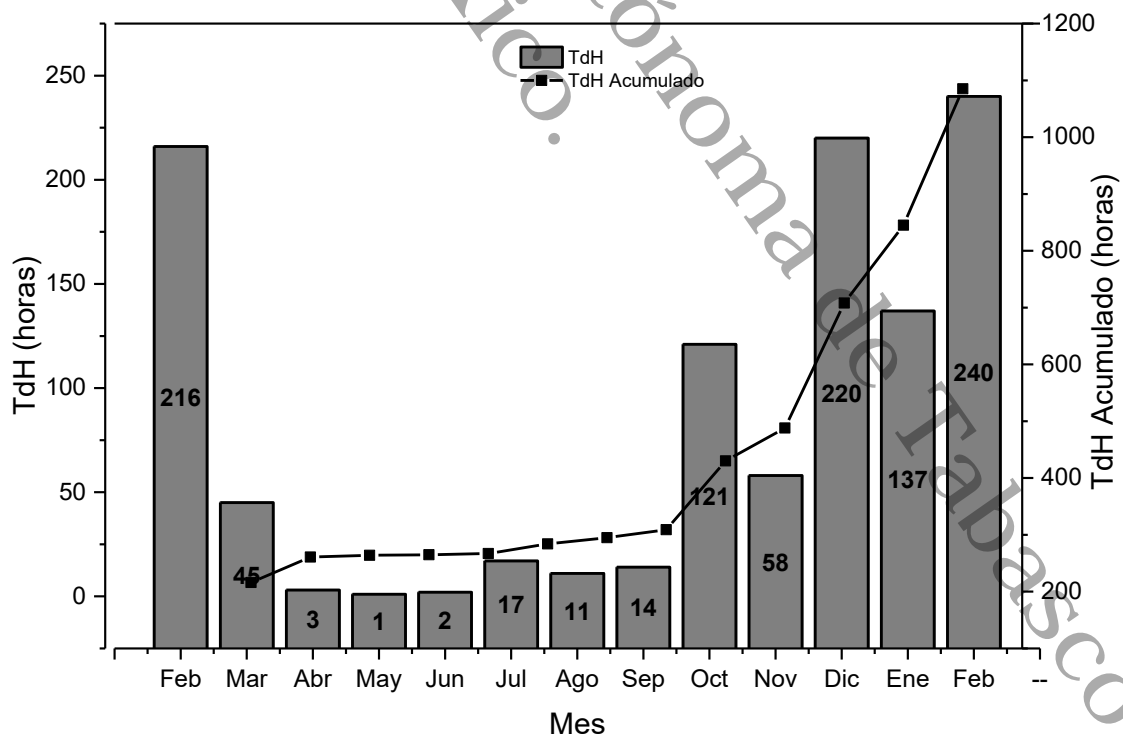
El comportamiento del cobre (pH 5.97 - 7.26) muestra un rango amplio, desde valores más ácidos (5.97 en febrero) hasta valores neutros o ligeramente básicos (7.26 en septiembre).

## 4.2. Tiempo de humectación

En la Figura 20, se muestra el TdH mensual (barras grises), y el TdH acumulado (línea negra con puntos) para obtener el TdH anual.

El monitoreo del TdH anual, se obtuvo en 4 periodos: 1) de febrero – abril 2024, el TdH fue; 216 h en febrero, 45 h en marzo, casi nulo en abril, febrero tiene el valor más alto del periodo. 2) De mayo a agosto 2024, a pesar de las lluvias ligeras, el TdH se mantuvo con valores de 1 a 17 h, esto indica que la humectación fue casi nula debido a la rápida evaporación en la superficie del metal, por las altas temperaturas registradas, como se puede comprobar en el Anexo 5 mediante las gráficas de variabilidad de Temperatura y Humedad relativa por horas durante el día; 3) en el siguiente periodo de septiembre – noviembre 2024, hubo un incremento de TdH con valor de 14 h en septiembre, 121 h en octubre, y con valor de 58 h en noviembre; 4) de diciembre 2024 – febrero 2025, fue el periodo más crítico del año (diciembre con 220 h, 137 h en enero y 240 h en febrero, estos valores son altos, superando ampliamente el umbral de 100 h considerado como crítico de acuerdo a la Norma ISO 9223.

Figura 20. Tiempo de humectación calculado durante el periodo del ensayo



Como parte de la categorización de la atmósfera evaluada en función de los parámetros analizados, se presenta la Tabla 12, que muestra los meses que presentaron eventos de precipitación, el TdH correspondiente y los niveles de pH de la lluvia y la escorrentía de los metales.

Tabla 12. Correlación de TdH, precipitación y pH de escorrentía

Mes	Precipitación (mm)	TdH (h)	pH Lluvia	pH metales (Rango)
Ago 2024	13	11	4.30	6.23 – 7.05
Sep 2024	49	14	4.67	6.31 – 7.26
Oct 2024	97	121	4.88	6.88 – 6.78
Nov 2024	32	58	4.90	6.35 – 6.98
Dic 2024	7	220	5.03	7.24 – 7.11
Ene 2025	3	137	4.91	7.14 – 6.75
Feb 2025	130	240	5.23	6.44 – 5.97

Con base en los resultados, el TdH para la atmósfera de Cunduacán fue de 1085 h, en el rango de 1-240 ± 118 horas. Cunduacán, Tabasco es de T<sub>3</sub> de agresividad basada en el tiempo de humectación de acuerdo con la Norma ISO 9223:2012.

#### 4.3. Velocidad de deposición de contaminantes

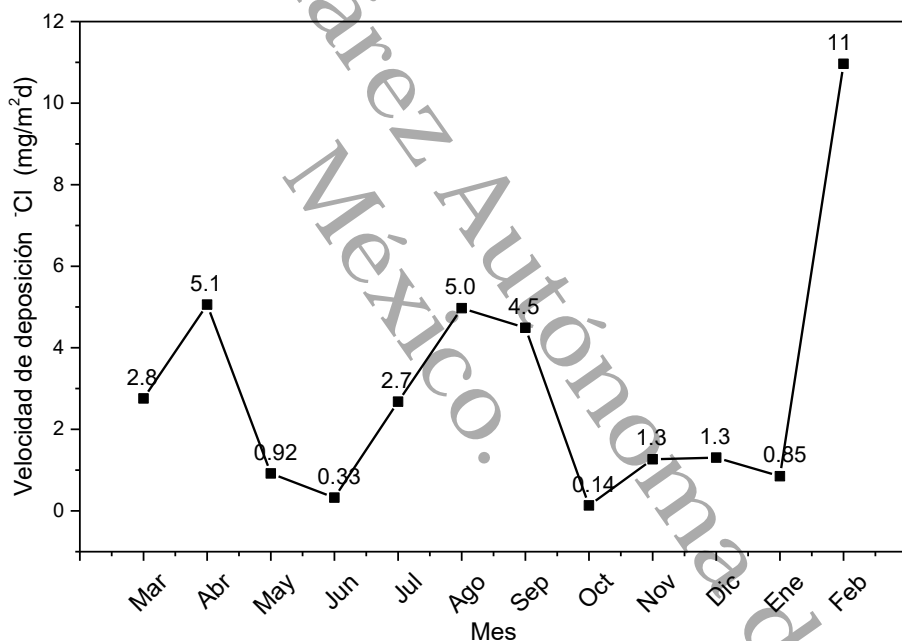
En la Figura 21, se muestra la variación mensual de la velocidad de deposición de cloruros expresada en mg/(m<sup>2</sup>·día) determinadas mediante los dispositivos de vela húmeda expuestos en la estación de ensayo de Cunduacán, Tabasco.

Las deposiciones más altas de cloruros ocurrieron durante febrero 2025 que presentó la más alta deposición (10.96 mg/m<sup>2</sup>·día), dado que la fuente de cloruros suele ser la costa, se analizaron las velocidades de rapidez de las ráfagas de viento (Anexo 6) y se encontró consistencia con las deposiciones. Durante este mes también se registró una alta humectación (240 h) y precipitaciones ácidas (pH =5), lo que en conjunto generó el ambiente más corrosivo del año de ensayo.

En agosto de 2024 se registró una velocidad de deposición de 5.06 mg<sub>Cl</sub>/m<sup>2</sup>·día, a pesar de registrar una baja humectación (TdH=11 h), la alta carga de cloruros sugiere transporte por brisas salinas o vientos marinos, típicos de la región.

Los meses de marzo (2.8 mg de Cl<sup>-</sup>/(m<sup>2</sup>·día) y julio (2.7 mg de Cl<sup>-</sup>/(m<sup>2</sup>·día), obtuvieron una deposición moderada mientras que de abril a junio y octubre a enero estuvieron en el rango de 0.92 – 1.31 mg de Cl<sup>-</sup>/(m<sup>2</sup>·día) que representa una deposición baja. En octubre se registró el valor más bajo (0.14 mg de Cl<sup>-</sup>/(m<sup>2</sup>·día), posiblemente asociado a las lluvias ocurridas que limpian la atmósfera y baja actividad de vientos. Las categorías de agresividad de la atmósfera por mes en función de la deposición de iones cloruro se muestra en el Anexo 8. El promedio anual de velocidad de deposición de iones cloruro fue de 17.19 ±3.08 mg/ (m<sup>2</sup>·día con lo que se le asignó una categoría de agresividad S<sub>1</sub>

Figura 21. Variación mensual de la velocidad de deposición de cloruros mg/(m<sup>2</sup>·día)

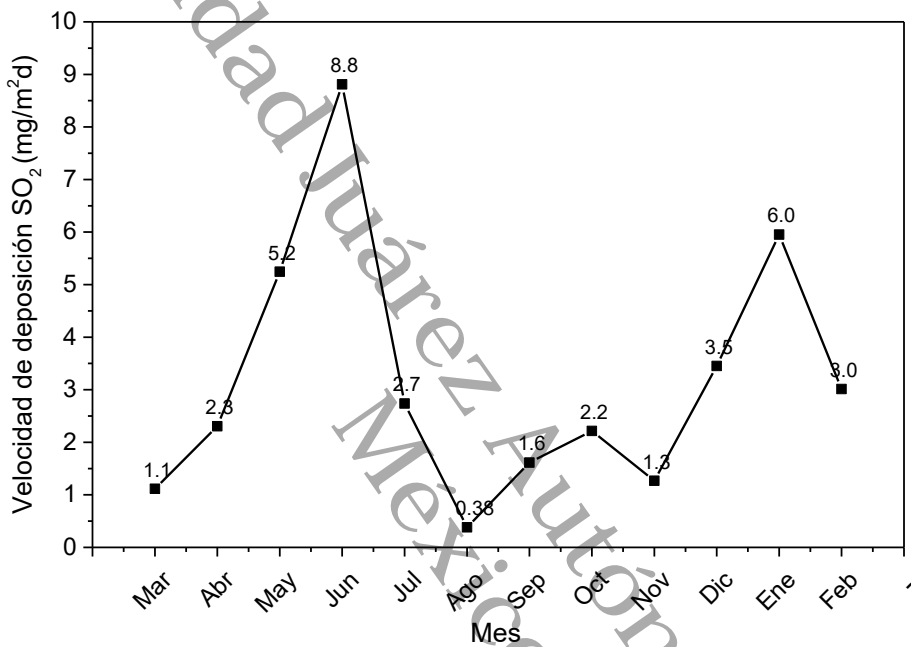


En la Figura 22, se presenta la velocidad mensual de deposición de iones sulfato en la atmósfera, expresada en mg/(m<sup>2</sup>·día), obtenidas a través de los platos de sulfatación expuestos en los diferentes meses. El mes con mayor deposición de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> fue junio (8.61 mg/m<sup>2</sup>·día) que coincide con valores bajos de pH (mayor acidez) y un incremento en el tiempo de humectación. Seguido de enero (5.56 mg/m<sup>2</sup>·día).

Los meses de mayo (5.26 mg/(m<sup>2</sup>·día), diciembre (3.8 mg/(m<sup>2</sup>·día), julio (2.74 mg/(m<sup>2</sup>·día) y octubre (2.22 mg/(m<sup>2</sup>·día) tuvieron niveles moderados mientras que abril (1.12 mg/m<sup>2</sup>·día) y marzo (1.38 mg/m<sup>2</sup>·día) fueron los meses con menor deposición.

La velocidad de deposición anual de este contaminante fue de  $20.51 \pm 2.41$  y con base en la Norma ISO 9223 se asigna la categoría P<sub>1</sub> a la atmósfera de estudio, con lo que se puede clasificar este ambiente como urbano con baja agresividad. Las categorías de agresividad por mes en función de la deposición de iones sulfato se muestra en el Anexo 9.

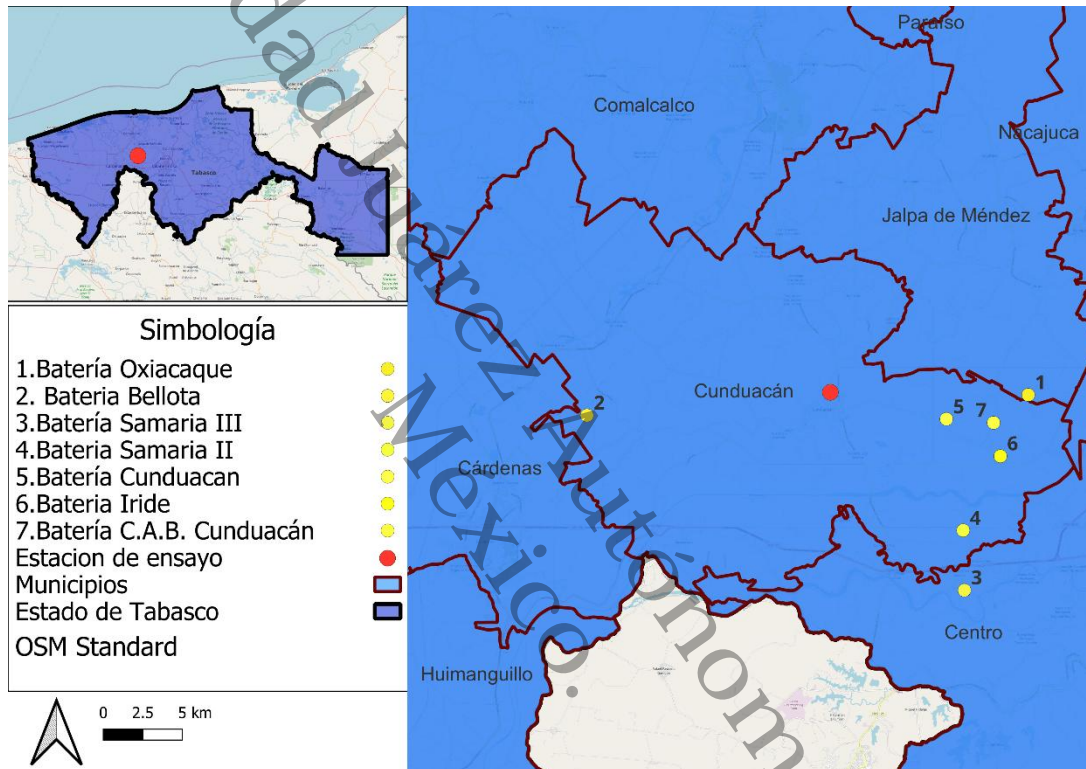
Figura 22. Velocidades de deposición de sulfatos en el periodo marzo-septiembre



Las cifras obtenidas de deposición de dióxido de azufre muestran que la presencia del SO<sub>2</sub> se limita a una estación específica, lo que sugiere la influencia de una fuente antropogénica, que en el caso del sitio de estudio pueden ser el tráfico vehicular o las emisiones generadas por los centros procesadores de hidrocarburos: Batería Bellota (15.5 km), Batería Samaria III (15.1 km), Batería Samaria II (11.5 km), Batería Cunduacán (7.4 km), Batería Iride (11.5 km), Batería C.A.B. Cunduacán (10 km), Batería Oxiacaque (13.2 km) que se muestran en la Figura 23 señaladas con puntos amarillos. El reporte al primer trimestre de 2024 emitido por Petróleos Mexicanos (PEMEX) señala que las emisiones de óxidos de azufre incrementaron un 8% con respecto a 2023 (PEMEX, 2024) y un incremento de 28.9 % en comparación con el primer trimestre de 2024 (Petróleos Mexicanos (PEMEX), 2025). En este último, también se menciona que “este aumento se debe principalmente al incremento de los volúmenes de gas ácido

enviados a desfogue en exploración y extracción, así como a la intermitencia en la operación de los sistemas de recuperación de azufre, especialmente en los complejos procesadores de gas” las baterías señaladas de acuerdo con información disponible en el sitio de PEMEX realizan procesos de transporte y separación de gas.

Figura 23. Mapa de distribución de plantas de proceso de hidrocarburos en los alrededores del sitio



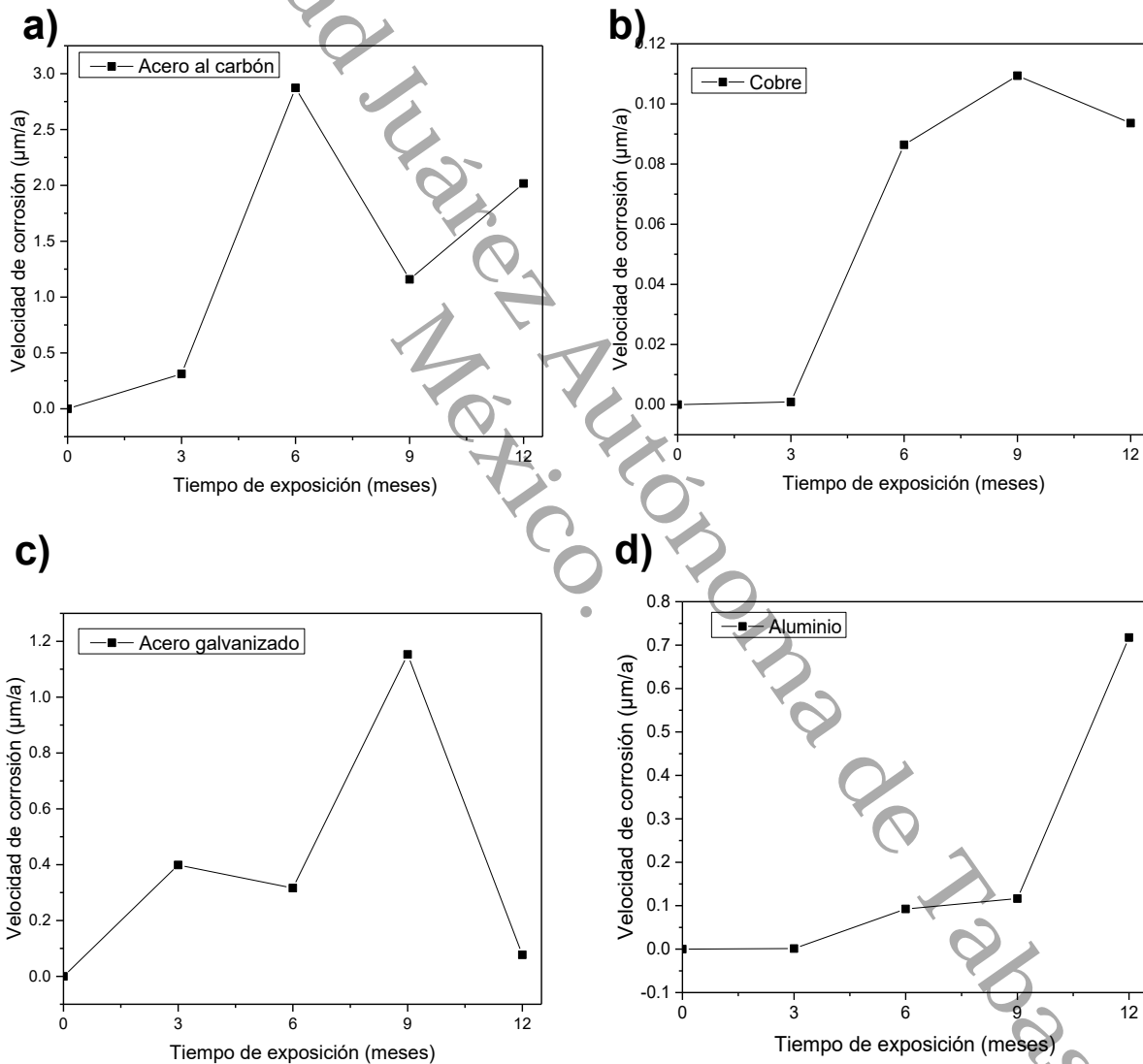
#### 4.4. Velocidad de corrosión

En la Figura 24 se muestran las velocidades de corrosión de cada material expuesto en función del tiempo de exposición estimado a partir de la pérdida de masa por corrosión en cada periodo.

Se puede observar en la Figura 24a, que la velocidad de corrosión anual del acero al carbón fue de  $2.0168 \mu\text{m/a}$ . Se observa un aumento progresivo de la velocidad de corrosión hasta alcanzar un pico máximo ( $2.8 \mu\text{m/a}$ ) a los 6 meses. Posteriormente, hay una disminución hacia los 9 meses, seguida de un nuevo incremento a los 12 meses ( $2.0 \mu\text{m/a}$ ). En el caso del cobre, Figura 24b, la velocidad de corrosión fue de  $0.0936 \mu\text{m/a}$ , presentó una velocidad de corrosión muy baja ( $0.09 \mu\text{m/a}$ ) durante los primeros 3 meses,

aumentando ligeramente hasta un valor máximo de  $0.1 \mu\text{m/a}$  a los 9 meses, y luego decreciendo levemente a los 12 meses hasta  $0.0936 \mu\text{m/a}$ . El acero galvanizado (Figura 24c), presenta un aumento inicial de la velocidad de corrosión hasta un pico de  $1.1 \mu\text{m/a}$  a los 9 meses, seguido de una abrupta disminución a casi 0 a los 12 meses. El aluminio (Figura 24d) muestra una velocidad de corrosión muy baja durante los primeros 9 meses ( $<0.1 \mu\text{m/a}$ ), seguida de un incremento abrupto a los 12 meses ( $0.71 \mu\text{m/a}$ ).

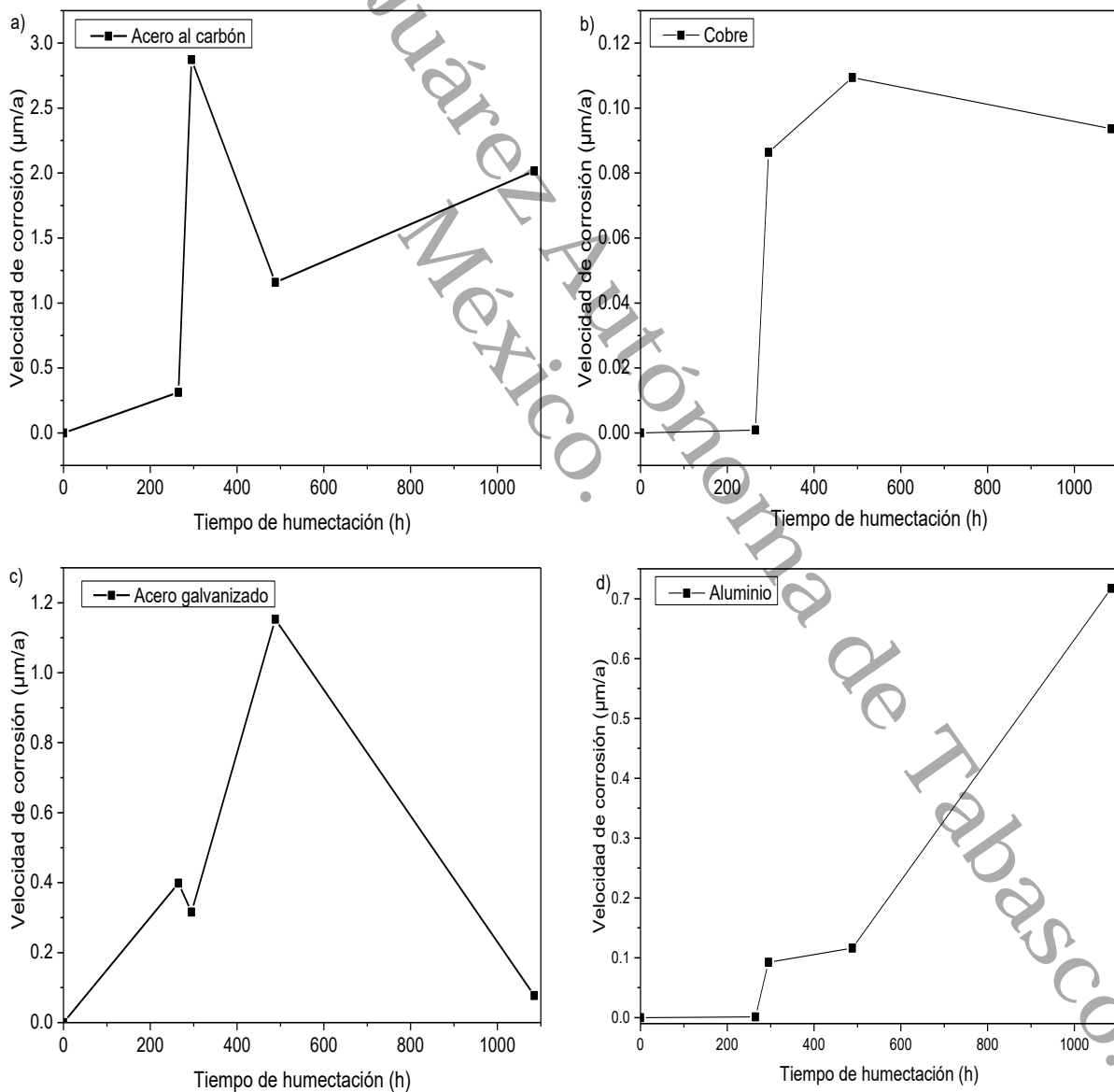
Figura 24. Velocidad de corrosión con respecto al tiempo de exposición



El análisis de la relación entre la velocidad de corrosión y el TdH (Figura 25), mostró que el acero al carbón (Figura 25a), presenta la mayor velocidad de corrosión

entre todos los materiales. A medida que aumenta el tiempo de humectación, la velocidad de corrosión se incrementa. El cobre, aunque los valores corresponden a corrosión moderada, el incremento es mucho más controlado en comparación con el acero al carbón. El acero galvanizado mostró velocidad de corrosión inicialmente baja (0.39  $\mu\text{m/a}$ ), con un ligero aumento conforme crece el tiempo de humectación. El aluminio mostró la menor velocidad de corrosión anual (0.11  $\mu\text{m/a}$ ) de todos los materiales, fue relativamente constante, con muy poca variación a lo largo del tiempo de humectación.

Figura 25. Velocidad de corrosión contra TdH de los metales expuestos



Con base en los datos obtenidos, la Norma ISO 9223, permite asignar categorías de agresividad corrosiva para cada metal, estas se muestran en la Tabla 13. Al acero al carbón se le asignó categoría C2, que corresponde con una susceptibilidad media a la atmósfera. En el caso del Cobre y el acero galvanizado se asignaron categorías C1 que indican baja agresividad del ambiente. Para el aluminio, la velocidad de corrosión anual fue de  $0.11 \mu\text{m/a}$ , pero no se encuentra en el rango de categorización de la norma ISO 9223.

Tabla 13. Categorías de agresividad con base en la velocidad de corrosión anual

Material	$r_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ )	Categoría de agresividad
Acero al carbón	2.0168	C2 Media
Cobre	0.0936	C1 Baja
Acero galvanizado	0.0771	C1 Baja

#### 4.4.1. Ecuaciones Dosis-Respuesta (EDR)

El monitoreo de parámetros ambientales y climáticos permitió establecer las variables, que influyen en el proceso corrosivo de los materiales de estudio; tiempo de humectación (TdH), velocidad de deposición de iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), velocidad de deposición de iones sulfato ( $\text{SO}_2$ ), precipitación pluvial y pH de la lluvia. En la Tabla 14 se muestran los valores utilizados para la modelación de las ecuaciones dosis respuesta, realizadas mediante regresión múltiple.

Tabla 14. Parámetros utilizados para formulación de las ecuaciones

Tiempo (meses)	$\text{Cl}^-$ mg/( $\text{m}^2\cdot\text{día}$ )	$\text{SO}_2$ mg/( $\text{m}^2\cdot\text{día}$ )	TdH horas	pH
0	0	0	0	0
3	8.73	8.67	265	6.18
6	16.71	20.6	295	7.14
9	22.6	25.69	790	6.38
12	35.12	31.11	1085	6.18

La variable de respuesta en las ecuaciones planteadas es la Velocidad de corrosión ( $V_{corr}$ ), se utilizaron los datos obtenidos en cada periodo para cada material que se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Velocidad de corrosión en función del tiempo de exposición

Tiempo de exposición meses	Velocidad de corrosión ( $\mu\text{m/a}$ )			
	Acero galvanizado	Acero al carbón	Aluminio	Cobre
3	0.3988	0.3117	0.0013	9.08E-04
6	0.3160	2.8724	0.0925	0.0864
9	1.1529	1.1584	0.1163	0.1094
12	0.0771	2.0168	0.7173	0.0936

Al analizar los efectos de la relación entre las variables ambientales y la velocidad de corrosión, se obtuvieron las ecuaciones 17-20, con coeficientes de correlación  $R^2 = 1$ , para cada modelo del metal que representa el 100% del ajuste de las variables con las ecuaciones dosis respuesta, este ajuste permite estimar con precisión la respuesta del sistema fuera del rango experimental (periodos después de un año sin mediciones continuas), permitiendo una mejor predicción a largo plazo.

#### Acero al carbón

$$v_{corr} = 8.8817E^{-16} + 0.11776 (Cl^-) - 0.071601 (\text{pH}) + 0.179465 (SO_2) - 0.00691891 (\text{TdH}) \quad (17)$$

$$R^2 = 1$$

#### Cobre

$$v_{corr} = -4.33681E^{-18} + 0.0119553 (Cl^-) - 0.00623853 (SO_2) - 0.00724002 (\text{pH}) - 0.0000133532 (\text{TdH})$$

$$R^2 = 1$$

#### Aluminio

$$v_{corr} = 2.22045E^{-16} - 0.0398391 (Cl^-) - 0.03057 (\text{pH}) + 0.0765421 (SO_2) + 0.0004454 (\text{TdH}) \quad (19)$$

$$R^2 = 1$$

#### Acero Galvanizado

$$v_{corr} = -6.66134E^{-16} + 0.119834 (Cl^-) + 0.0606394 (pH) - 0.208205 (SO_2) + 0.00302901(TdH) \quad (20)$$
$$R^2 = 1$$

#### 4.4.1. Análisis por ruido electroquímico

El análisis estadístico de la señal de ruido electroquímico se considera una forma fácil de obtener información sobre el comportamiento electroquímico de los metales en corrosión. Uno de los parámetros estadísticos más importantes es la desviación estándar de la señal de ruido de corriente  $\sigma_i$ , cuyo valor se espera que aumente a medida que aumenta la velocidad de corrosión, así como cuando la corrosión tiende a ser altamente localizada.

La Figura 26 muestra las señales de potencial electroquímico (Ruido de Potencial) registradas de los cuatro materiales metálicos: estas señales corresponden a mediciones en función del tiempo y permiten estudiar la naturaleza, intensidad y tipo de procesos de corrosión que están ocurriendo en cada uno de los materiales bajo condiciones ambientales específicas.

El acero al carbón presenta traspasos amplios y abruptos, con picos típicos de corrosión localizada, por picadura o penetración puntual. Las transiciones rápidas del potencial indican eventos de ruptura-repasivación (Jáquez-Muñoz et al., 2021).

El cobre presenta una señal con baja variabilidad, muy cercana a una línea base estable, con intermitencias suaves, lo que indica un comportamiento más estable y resistente a la corrosión. El cobre forma una capa de óxidos que lo protege de manera pasiva, lo cual se refleja en la baja energía de fluctuación.

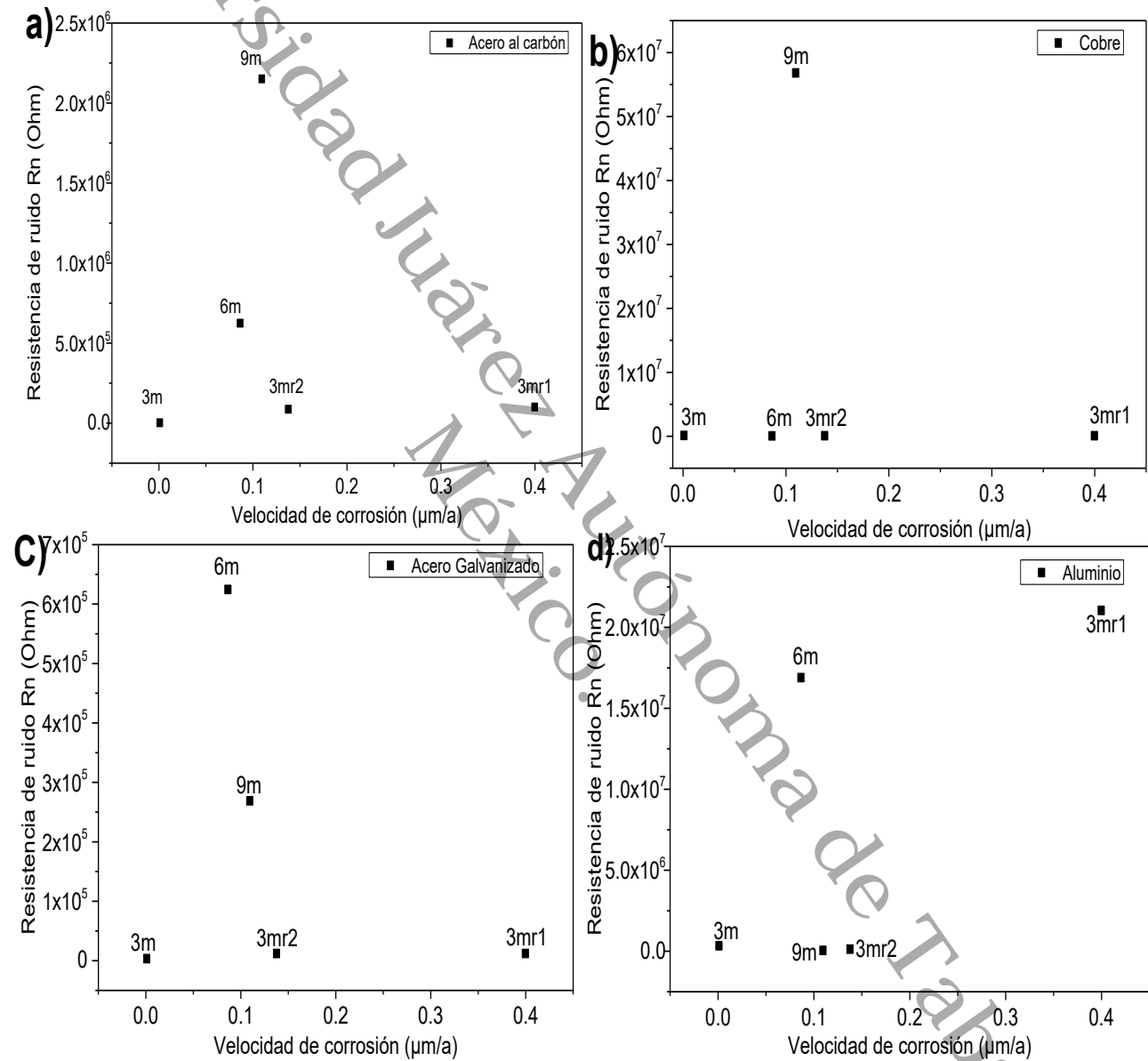
El acero galvanizado exhibe picos aislados de alta amplitud combinados con periodos de aparente estabilidad. Este patrón indica que, aunque el zinc actúa como ánodo de sacrificio, eventualmente ocurren eventos localizados de corrosión cuando esa capa protectora se ve comprometida. Lo que es señal de alerta para posible inicio de falla en recubrimiento o saturación de zonas activas.

El aluminio presentó un comportamiento similar al cobre, muestra una señal suavizada y de baja amplitud. Indica un comportamiento pasivo, característico del aluminio expuesto a condiciones atmosféricas moderadas.

Los espectros de potencial y corriente de los análisis de ruido electroquímico se pueden ver en el Anexo 10. Los cálculos para el análisis de resistencia al ruido y de

índice de localización se presentan en la Tabla 16. Con base en los resultados del IL y la Tabla 13 presentada anteriormente, la corrosión en el acero al carbón fue localizada. El cobre también presentó corrosión localizada durante los periodos analizados y la probeta

Figura 26. Desviación estándar de corriente vs velocidad de corrosión



testigo tenía puntos de corrosión mixta antes de la exposición.

Por otro lado, el aluminio y el acero galvanizado presentaron durante los primeros cuatro periodos de exposición, corrosión localizada y en el quinto periodo indica el IL corrosión uniforme.

Tabla 16. Cálculos de índice de localización y resistencia al ruido

		Resistencia de ruido Rn (Ohm)	Velocidad de corrosión ( $\mu\text{m/a}$ )	Media de $\sigma$ (Xi)	Índice de Localización (IL)
Cobre	Testigo	3.20E+03		3.6E-06	0.26
	3m	1.32E+05	9.08E-04	7.21E-07	0.50
	3mr1	8.38E+04	4.00E-01	-4.77E-06	0.12
	6m	5.01E+04	8.64E-02	-2.69E-06	0.45
	3mr2	8.61E+04	1.38E-01	-9.32E-07	0.04
	9m	5.68E+07	1.09E-01	3.73E-11	0.72
	12m	1.00E-03	0.0936	-9.9E-06	1.00
Acero al carbón	Testigo	39197.93		-5.697E-05	0.03
	3m	2011.99	0.3117	-0.0002065	0.11
	3mr1	100522.18	0.2808	-5.433E-07	0.70
	6m	624524.16	2.8724	-1.754E-07	0.39
	3mr2	86521.63	4.496	-1.85E-06	0.20
	9m	2151087.62	1.1584	-6.21E-08	0.40
	12m	2151087.62	2.0168	6.6E-08	0.38
Aluminio	Testigo	26443.17		9.6152E-08	0.97
	3m	340857.53	0.0013	1.0077E-06	0.11
	3mr1	21044889	0.9835	1.0853E-09	0.97
	6m	16896118.1	0.0925	1.372E-09	0.98
	3mr2	125099.98	0.2856	4.6121E-07	0.08
	9m	45751.30	0.1163	-1.174E-06	0.13
	12m	68421.49	0.7173	4.2E-07	0.10
Acero galvanizado	Testigo	2.12E+03		-7.972E-06	0.29
	3m	350312	0.3998	9.7582E-05	0.14
	3mr1	12203.81	0.8851	-1.202E-05	0.13
	6m	269055.55	0.316	-1.202E-05	0.13
	3mr2	12203.81	0.0561	-1.202E-05	0.13
	9m	269055.55	1.1529	3.642E-07	0.08
	12m		0.0771		

Nota: Xi es la media de desviación estándar, calculada a partir de las desviaciones estándar de la resistencia de ruido de cada espectro; El índice de localización (IL) se calculó a partir de la ecuación 17.

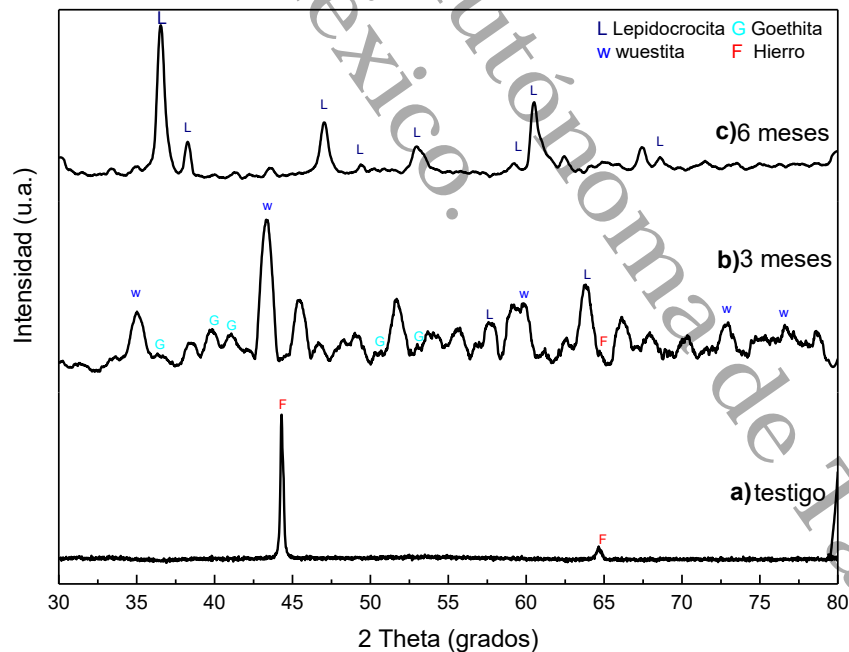
## 4.5. Caracterización de los metales

### a) Acero al carbono

Este material, con base en los resultados de velocidad de corrosión fue el más afectado por el ambiente de Cunduacán, las caracterizaciones de las probetas expuestas a lo largo del estudio permitieron identificar las fases cristalinas de los productos de corrosión (PdC) y la morfología de estos.

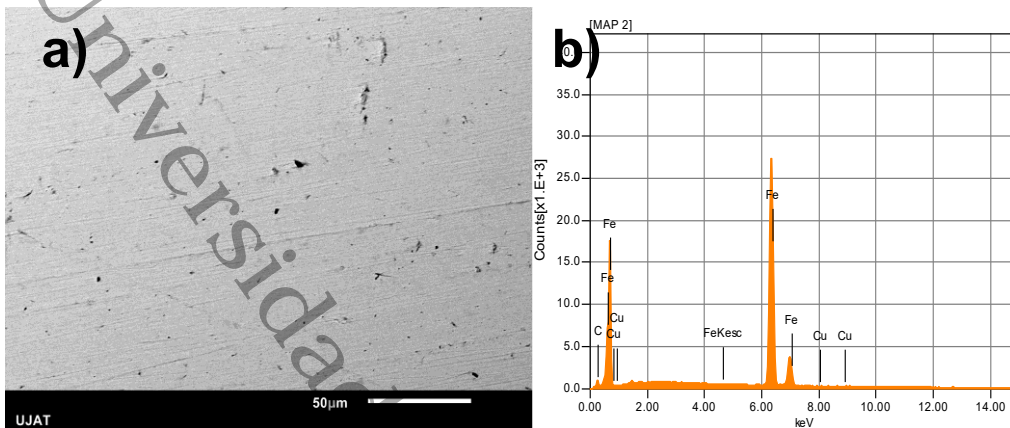
A partir de la Difracción de Rayos X, y la Microscopía Electrónica de Barrido, se corroboró que previo a la exposición, las probetas no tenían presencia de corrosión, La Figura 27a presenta un difractograma con las señales características del Hierro (PDF #84-1410) en las posiciones 44.2° y 64.8; la Figura 28, muestra la micrografía (28a) y el análisis EDS (28b) de los componentes del acero al carbono, en particular la alta presencia de hierro facilitó la confirmación de una composición de buena calidad, los porcentajes de cobre (0.02%) se esperaban como impurezas despreciables.

Figura 27. Espectro DRX de probeta de acero al carbón



Nota: los espectros corresponden a) muestra testigo; b) probeta expuesta tres meses; c) probeta expuesta seis meses

Figura 28. Micrografía de acero al carbón previo a exposición



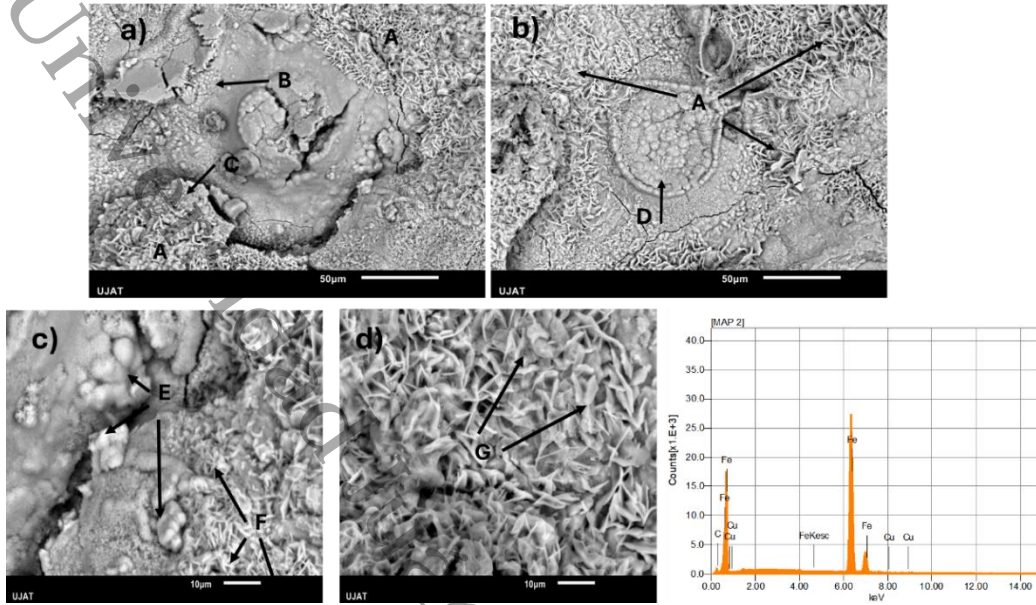
Nota: a) micrografía de la probeta de acero al carbón; b) análisis EDS de la probeta de acero

En cambio, en el análisis de los tres meses (Figura 27b), se identificó la presencia de lepidocrocita (PDF ##08-0098) y goethita (PDF #96-221-1653) y algunas señales que se identificaron como wustita (PDF #34-1266), el análisis de MEB sobre la misma probeta permitió identificar morfologías reportadas como lepidocrocita (Leygraf et al., 2016) aunque se observó diferencia entre las intensidades de las señales, así como un desplazamiento de los ángulos de aproximadamente  $0.2^\circ$  con respecto al difractograma de la probeta testigo. En la Figura 29, las formas de Lepidocrocita se nombraron de acuerdo con la literatura como: Lepidocrocita tipo laminar nido de pájaro “bird nest” se indica con la etiqueta A en la Figura 29a, la lepidocrocita laminar, arenosa, globular, nido de gusano y placa de nido de pájaro se indican con las etiquetas B, C, D, F Y G respectivamente. En la Figura 29d se indica la goethita de tipo bola de algodón con la etiqueta E.

Después de seis meses de exposición, las señales del difractograma (Figura 27c) se identificaron como lepidocrocita con algunas señales de goethita, en la Figura 30, tanto la Goetita en forma de bola de algodón como Lepidocrocita de tipo nido de gusano (A) y globular (B) se muestran como PdC.

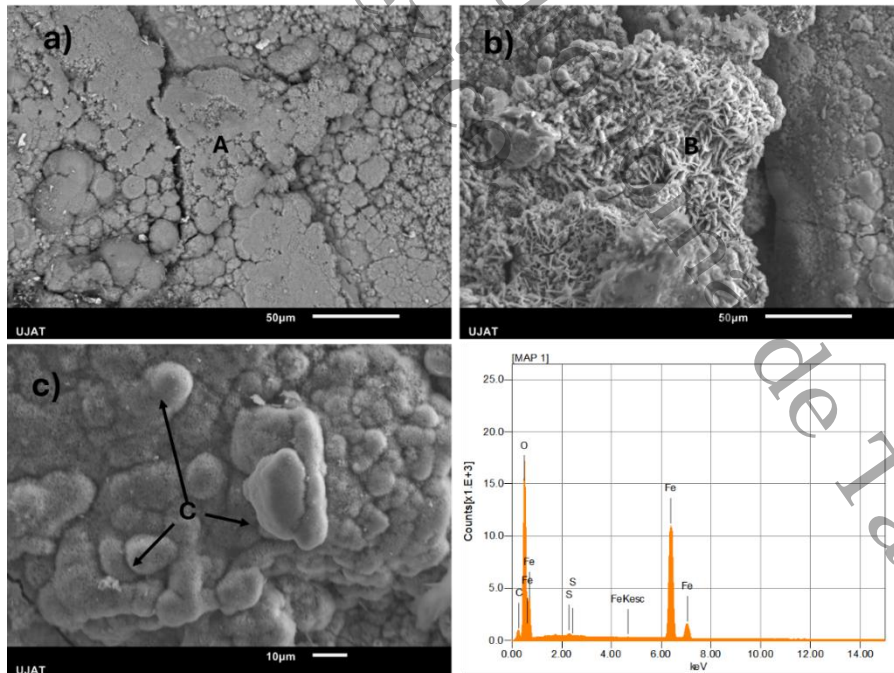
La figura 31 muestra los productos de corrosión después de nueve meses de exposición. Las fases encontradas fueron las mismas que en los periodos anteriores, siendo globular (A), arenosa (B) lepidocrocita, goethita en forma de aguja en la superficie

Figura 29. Morfologías de los productos de corrosión de acero al carbono expuesto durante 3 meses



Nota: La morfología del producto de corrosión después de una exposición de tres meses: a) nido de pájaro (A) lepidocrocita; laminar (placas) (B), arenosa (C) lepidocrocita; b) bola de algodón tipo goethita (D); c) globular (E), Nido de gusano (F) Lepidocrocita; d) placa de nido de pájaro (G); e) análisis EDS

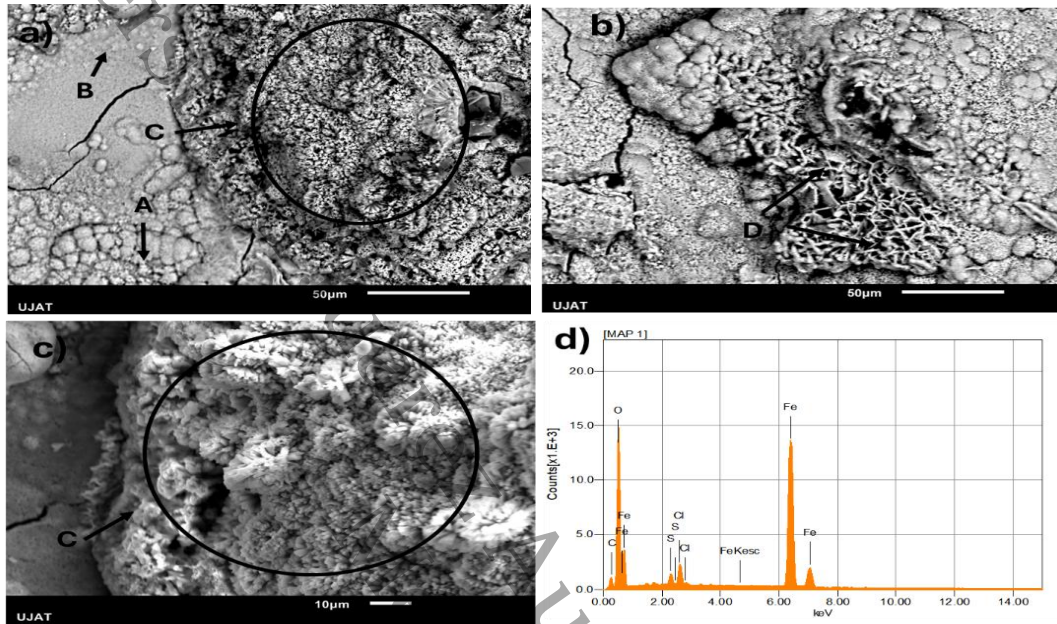
Figura 30. Morfologías de los productos de corrosión de acero al carbono expuesto durante 6 meses



Nota: La morfología del producto de corrosión después de una exposición de seis meses: a) lepidocrocita globular (A); b) Lepidocrocita nido de gusano; c) a la izquierda nido de gusano (A) lepidocrocita, a la derecha goethita bola de algodón; d) análisis EDS.

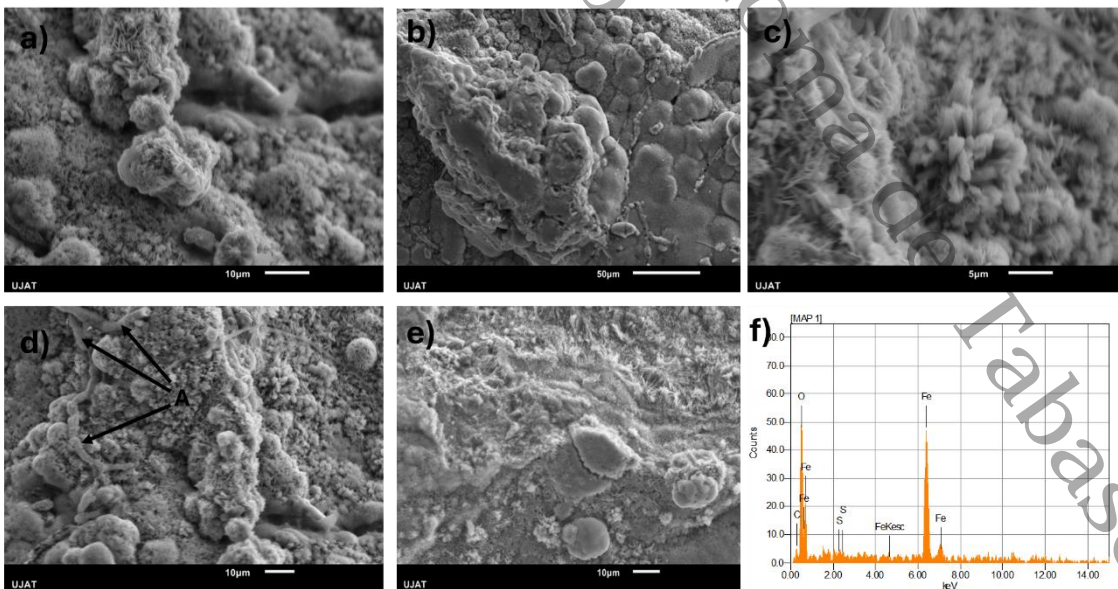
Las morfologías detectadas al año de exposición se muestran en la Figura 33, nuevamente se presentó Lepidocrocita en forma globular, nido de pájaro, placas y se encontró también en forma de bastones. Se detectó algo de goethita en forma de agujas.

Figura 31. Morfologías de los productos de corrosión de acero al carbono expuesto durante 9 meses



Nota: La morfología del producto de corrosión después de una exposición de nueve meses: (a) globular (A), arenosa (B) lepidocrocita, goethita en forma de aguja en la superficie (C); b) Nido de pájaro (D) Lepidocrocita; c) goethita en forma de aguja en la superficie (C); d) análisis EDS

Figura 32. Morfologías de los productos de corrosión de acero al carbono expuesto durante 12 meses

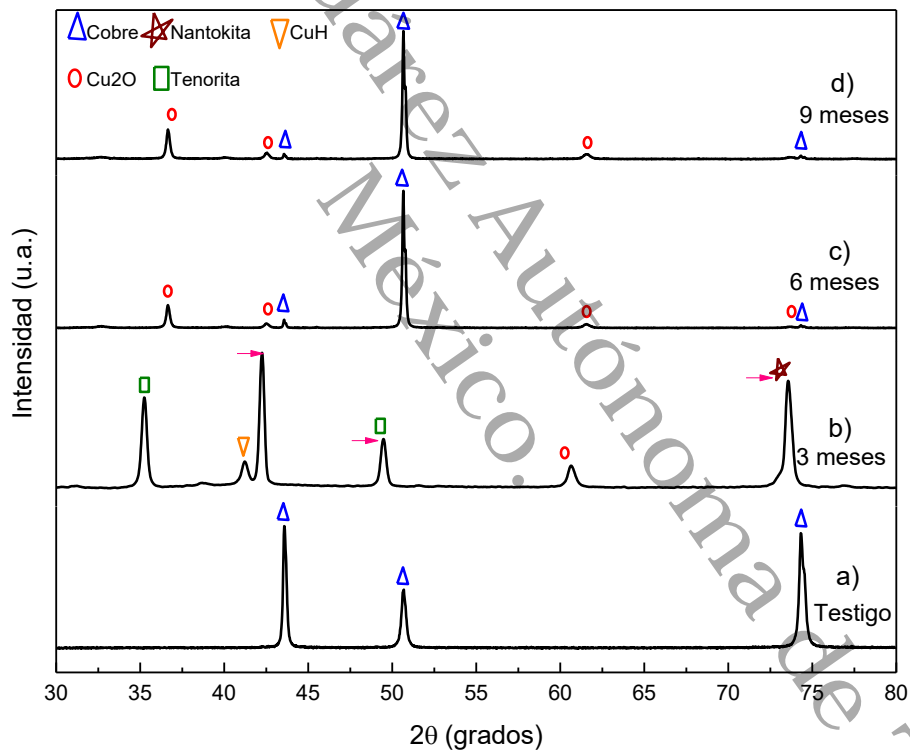


Nota: La morfología del producto de corrosión después de una exposición de doce meses: (a) Nido de pájaro, b) globular c) goethita en forma de aguja; d) Bastones de lepidocrocita (A); e) placas de lepidocrocita f) análisis EDS

### a) Cobre

En la Figura 33, se presenta el DRX para las probetas de cobre expuestas. El espectro de la probeta Testigo (Figura 33a) presenta los picos característicos del cobre en un rango de posición de 20 a 80°, en este intervalo es posible localizar tres de los picos característicos del cobre en las posiciones 43, 50 y 74. La imagen microscópica del análisis de MEB/EDS (Figura 34) sobre la misma probeta, confirma la ausencia de elementos diferentes de la composición del material con ligera presencia de oxígeno (2.04 % mol) y menos cantidad de carbono (1.04% mol).

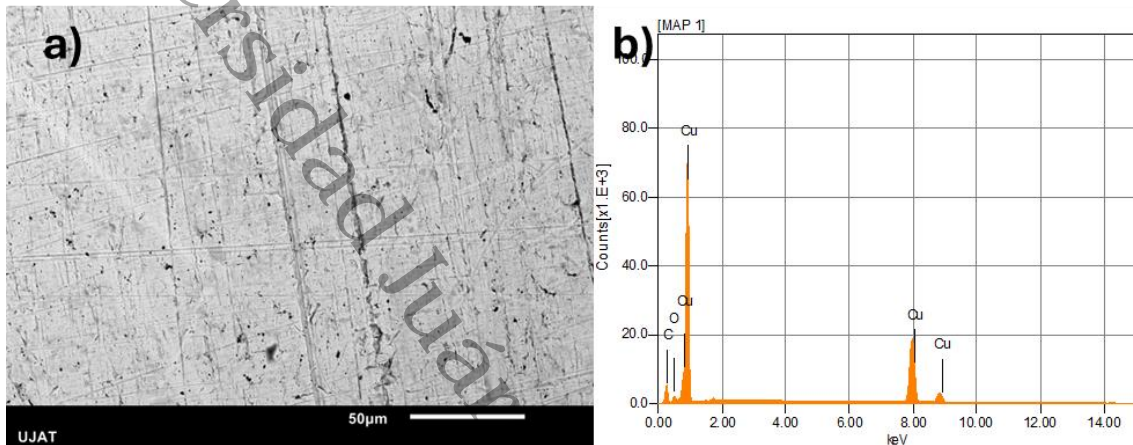
Figura 33. Espectro DRX de probetas de cobre expuestas y testigo



Después de la exposición de tres meses, además del cobre estructural de la probeta, se identificó la presencia de óxido de cobre ( $\text{CuO}_2$ ) con arreglo cúbico (Figura 34b), este óxido de cobre dada su naturaleza negra y densa proporciona un efecto protector sobre el cobre (Yan et al., 2019). La Figura 36 muestra la acción corrosiva sobre el cobre durante las primeras diez semanas documentadas, y se alcanza a observar la formación de la película de cuprita, aunque no de manera homogénea sobre las probetas. Sin embargo, dado que la probeta analizada corresponde a la primera etapa

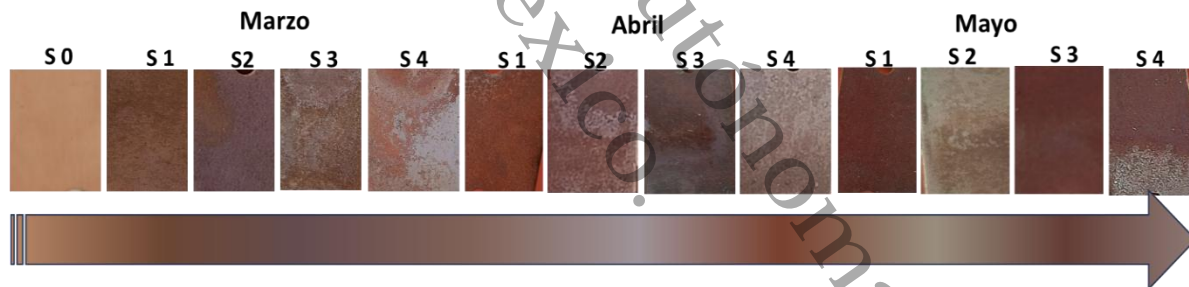
de exposición al ambiente, estos productos de corrosión se encuentran en etapa inicial del proceso de corrosión, lo que concuerda con los resultados de la velocidad de deposición de cloruros, que afecta al cobre.

Figura 34. Micrografía de cobre previo a exposición



Nota: Micrografía de probeta de cobre sin exponer (a) y análisis EDS (b) que muestra la presencia de oxígeno y carbono

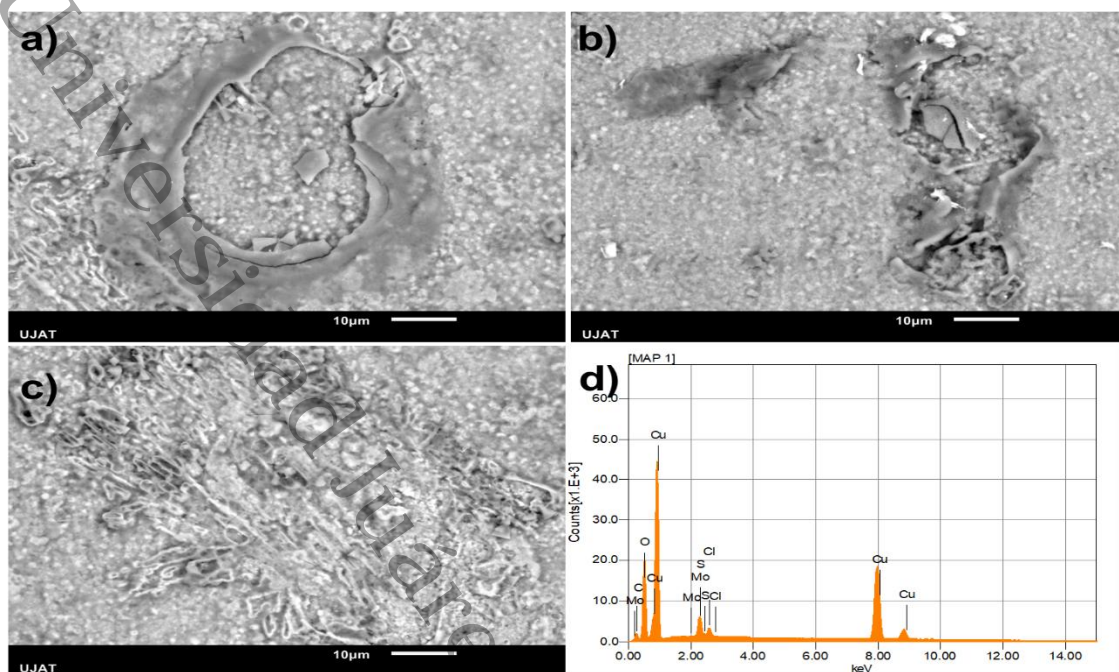
Figura 35 Proceso macroscópico de la corrosión del cobre



Nota: El cambio de coloración en las probetas de cobre, fue rápido en comparación con las probetas de acero, en la Figura, el número acompañado de la S representa el número de semanas transcurridas hasta el momento de captura de la fotografía, se observa que después de la semana 1, hubo un cambio en la coloración de las probetas.

La Figura 36, corresponde con los análisis de MEB/EDS de la probeta expuesta tres meses, se observaron formaciones tipo “pozo” o cavidades (Figura 36 a) que podrían ser sitios de inicio de picaduras. Además, se observaron depósitos irregulares y estructuras filamentosas (Figura 36b), indicativas de productos de corrosión superficiales. La Figura 36c muestra estructuras granulares más finas.

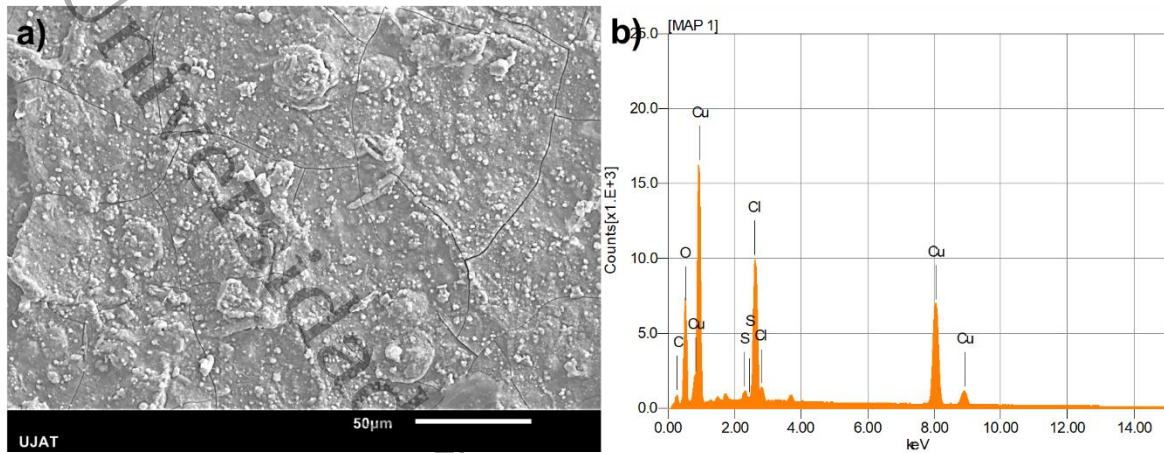
Figura 36. Morfologías de los productos de corrosión de cobre expuesto durante 3 meses



Nota: Las morfologías encontradas sobre la superficie de la probeta de cobre fueron a) formaciones tipo “pozo”, b) estructuras filamentosas, c) estructuras granulares. El análisis EDS (d) mostró picos intensos de Cu, además de O, Cl, S y Mo, elementos comunes en ambientes contaminados. La presencia de Cl y S sugiere influencia de sales higroscópicas, lo que favorece mecanismos como corrosión bajo depósito y picadura.

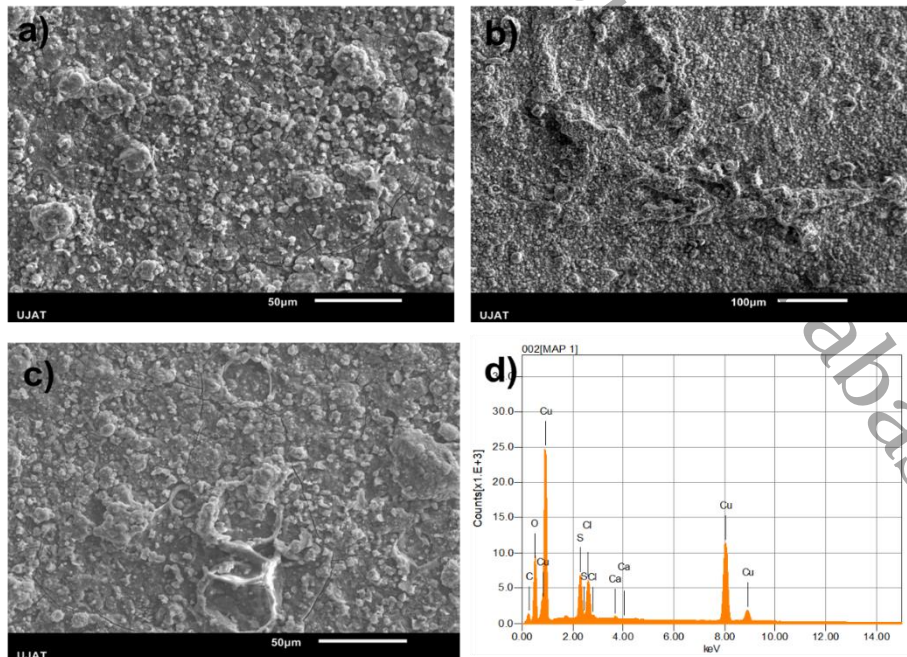
En la Figura 37a se observa una superficie rugosa, con presencia de partículas y regiones que indican el inicio de procesos de corrosión. Las irregularidades en contraste con zonas lisas, sugiere la coexistencia de metal base expuesto y productos de corrosión localizados. Del análisis elemental (Figura 37b), se obtuvieron las composiciones para Cu: 26.83%, Cl:9.80%, S:0.68% y O:35.24%, C:27.45%

Figura 37. Morfologías de los productos de corrosión de acero al carbono expuesto durante 6 meses



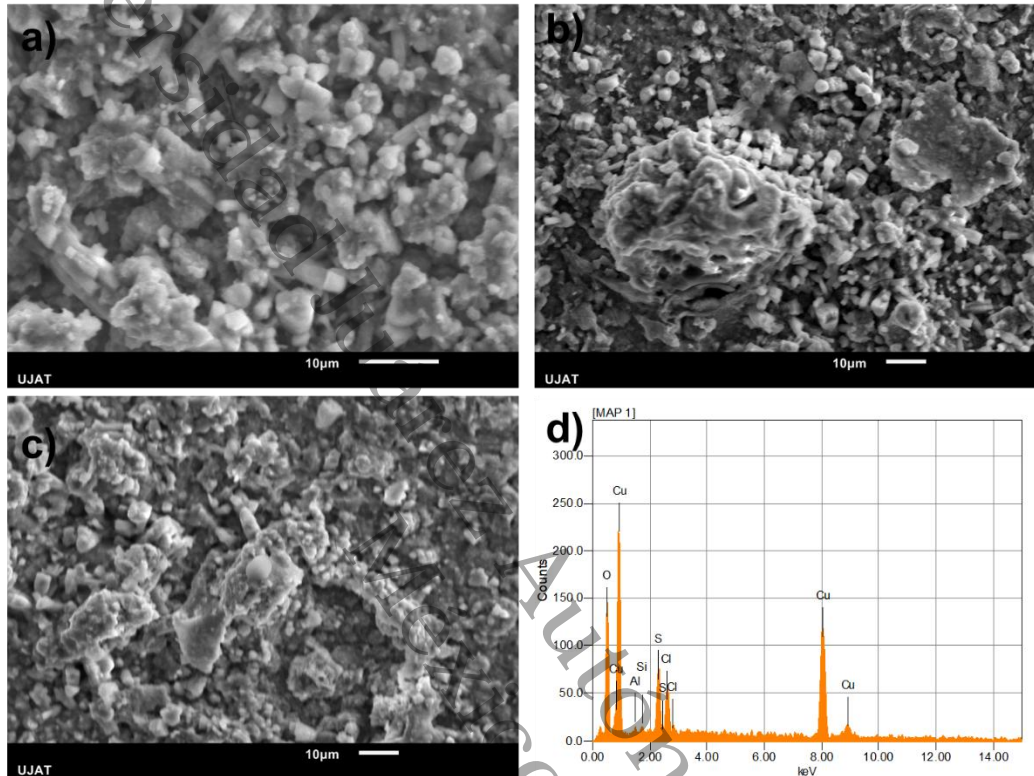
Las micrografías de la Figura 38 muestran una superficie mucho más rugosa y cubierta de depósitos globulares, característicos de acumulación de productos de corrosión cuprosos, como  $\text{Cu}_2\text{O}$  de acuerdo con el difractograma de la Figura 33d. la Figura (38a) muestra una textura rugosa, pero de mayor homogeneidad que la Figura 39b, donde se aprecia un ataque más profundo. La Figura 38c por otro lado, destaca cavidades más definidas, señalando un avance significativo de la corrosión localizada. El análisis EDS (Figura 38d) mostró la persistencia de señales de Cl, O, S, junto con Ca y C, estos últimos posiblemente provenientes de aerosoles urbanos o actividad biológica.

Figura 38. Morfologías de los productos de corrosión del cobre expuesto durante 9 meses



Los productos de corrosión sobre las probetas expuestas 12 meses, como se puede observar en la Figura 39a regiones más densas, en la Figura 39b y 39c se presentan formas granulares de poca adherencia.

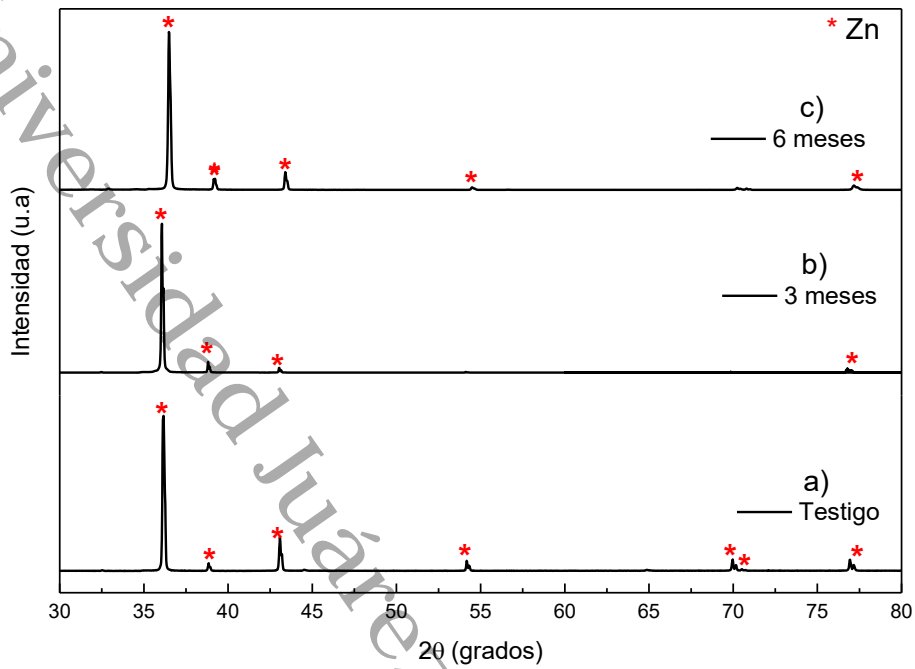
Figura 39. Morfologías de los productos de corrosión del cobre expuesto durante 12 meses



### b) Acero galvanizado

De la probeta testigo se identificaron los picos representativos del zinc en las posiciones señaladas en la Figura 40a. Se observan picos bien definidos, correspondientes a la fase metálica de zinc (Zn), lo cual indica una superficie sin productos de corrosión cristalina detectables. El análisis EDS (Figura 41b) por otro lado, detectó señales de oxígeno y fósforo.

Figura 40. Difractograma de la probeta de acero galvanizado expuestas al ambiente



Después de tres meses de exposición, en el difractograma (Figura 40b) se mantienen los picos principales de Zn, pero aparecen nuevos picos de baja intensidad. La Figura 41a presenta una superficie suficientemente homogénea para establecer que no hay exposición del acero base, aunque existe la presencia de depósitos finos indicadores del inicio del proceso corrosivo.

Figura 41, Micrografía y EDS de acero galvanizado sin exponer

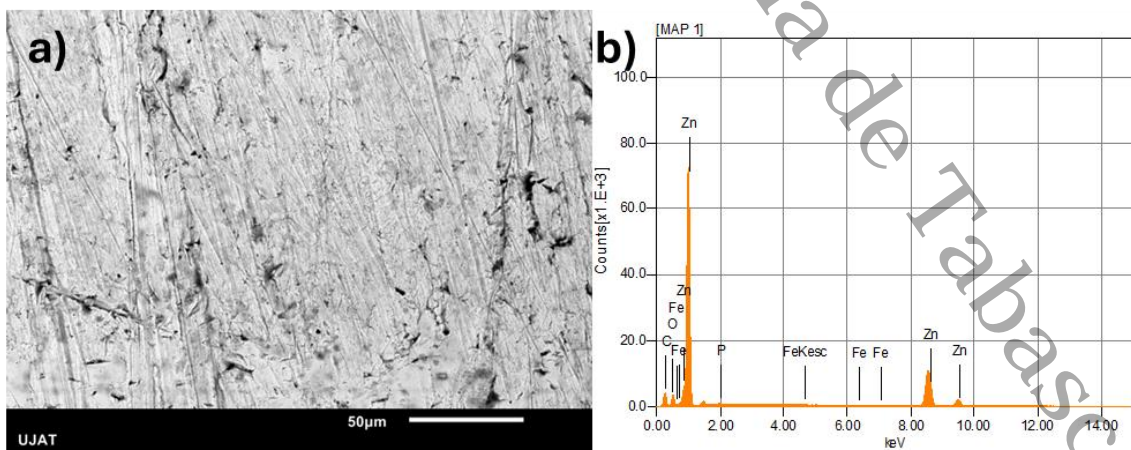
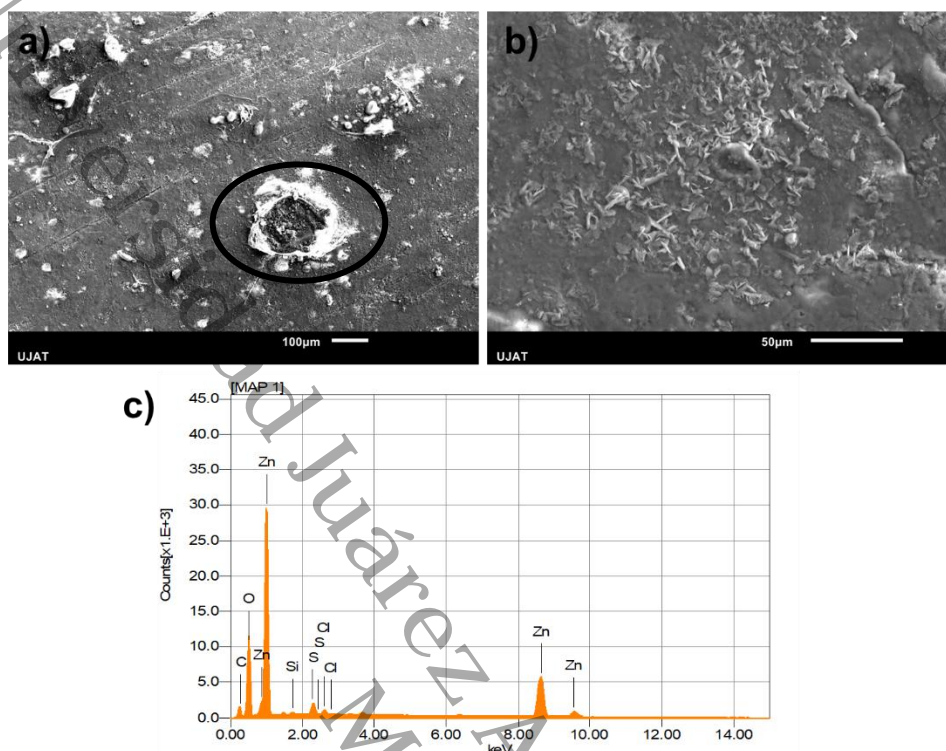
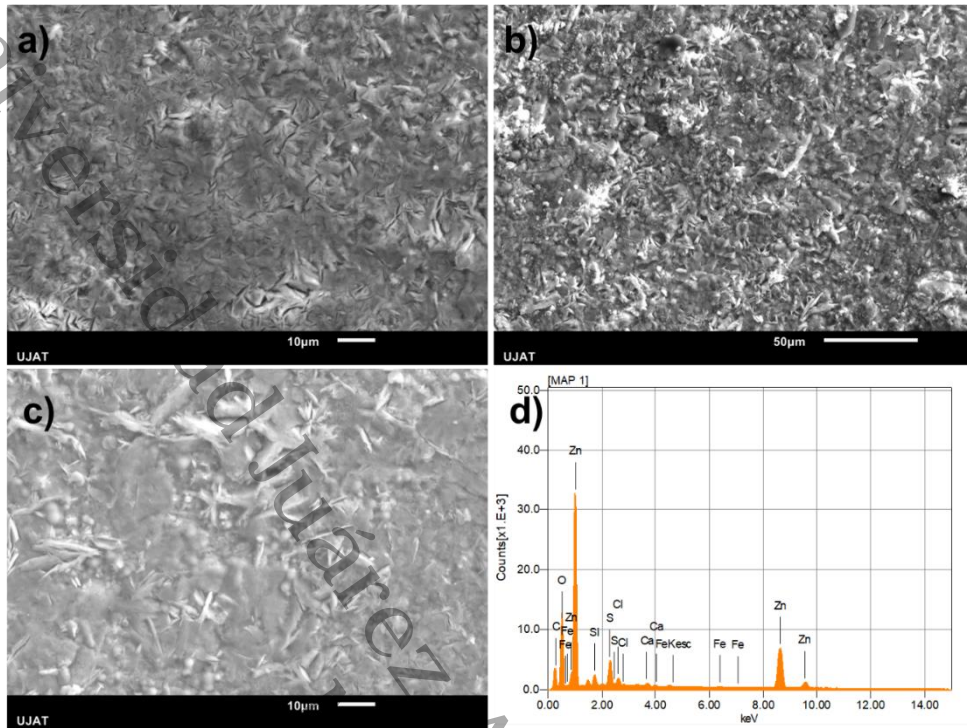


Figura 42. Micrografía y EDS de acero galvanizado después de tres meses de exposición



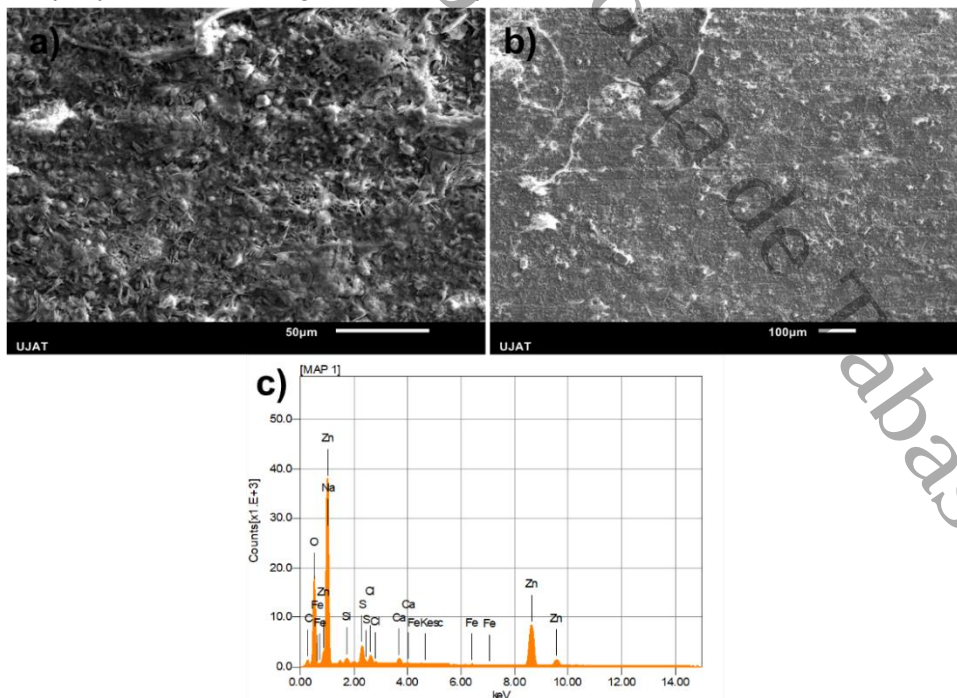
En la Figura 43a y 43b, se observa una morfología con estructuras características de una capa de galvanizado, con orientación laminar o tipo flor de roseta. Estas estructuras son típicas de un recubrimiento galvanizado intacto o parcialmente degradado. La Figura 43c corresponde a una superficie más amplificada donde se identifica una textura más rugosa y heterogénea, lo que sugiere un grado inicial de corrosión atmosférica, posiblemente por ataque húmedo o deposición de contaminantes ambientales. Se aprecian regiones de descomposición superficial o productos de corrosión incipientes. El análisis EDS (Figura 43d) muestra elementos mayoritarios como Zn, Fe, O, Cl, Ca, y S, indicando la presencia de óxidos, hidroxidocloruros o sulfitos, asociados a productos de corrosión típicos del zinc en atmósferas húmedas y ligeramente contaminadas. Sin embargo, como se aprecia en la Figura 40b, el difractograma no detectó las señales de estos posibles productos, dada la baja concentración de ellos en la probeta analizada.

Figura 43. Micrografía y EDS de probeta de acero galvanizado expuesta 6 meses



La Figura 44a muestra una superficie más heterogénea, con visible presencia de depósitos más compactos, el análisis elemental (Figura 44c) detectó cantidades pequeñas de Ca, C y S.

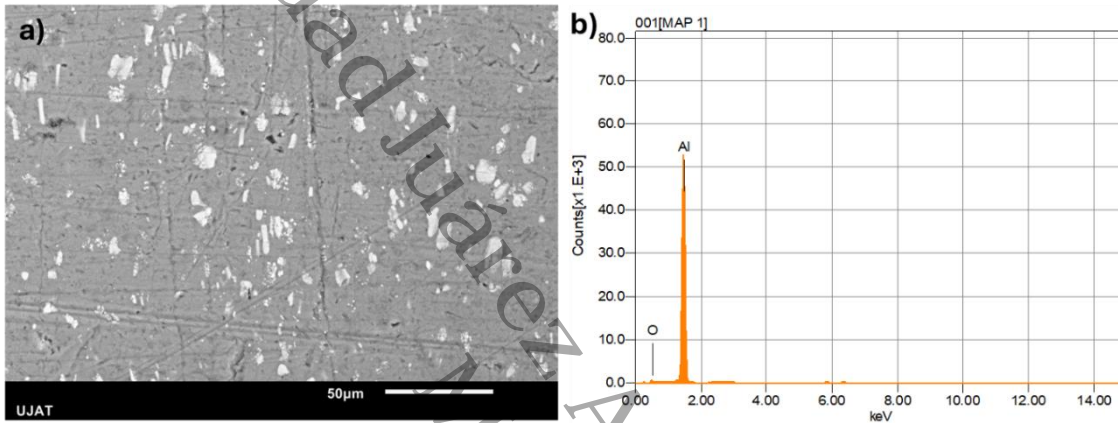
Figura 44. Microscopía y EDS del acero galvanizado expuesto 9 meses



### a) Aluminio

En la Figura 45a fue posible diferenciar dos diferentes texturas, ambas pertenecen al sustrato de aluminio con diferente composición de oxígeno: con 0.86% las zonas más iluminadas y con 2.75% las más oscuras. Esta presencia de oxígeno se atribuye a leve exposición antes del almacenamiento.

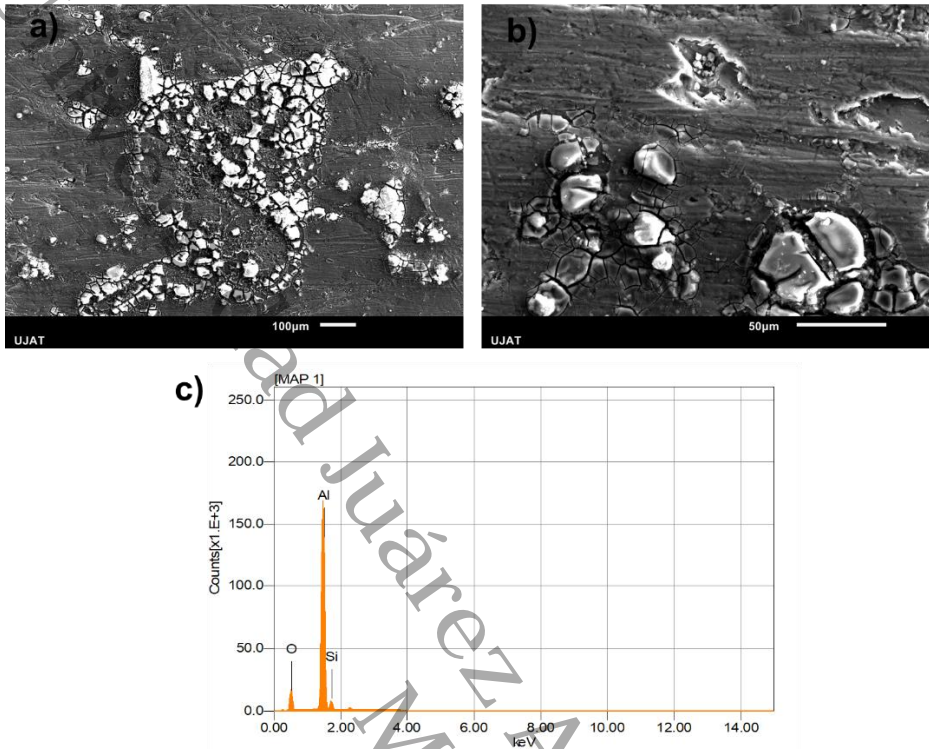
Figura 45. Micrografía y EDS de aluminio previo a exposición



Las morfologías superficiales de las muestras de aluminio expuestas durante un período de tres meses se muestran en la Figura 46, se presenta una superficie más rugosa y con presencia de partículas dispersas, probablemente productos de oxidación. estas películas de óxido se van propagando por el sustrato ya que es posible que las nuevas picaduras se inicien en los bordes de las picaduras iniciales. La Figura 46b, muestra corrosión por picadura poco profunda, no se evidencian grietas profundas ni zonas de ataque localizado.

El aluminio expuesto seis meses, en cambio, muestra superficie con mayor rugosidad, poros y presencia de depósitos (Figura 47a), en las Figuras 47b y 47c se identifican áreas micro agrietadas, lo que indica posibles señales de interrupciones locales en la capa pasiva.

Figura 46 Morfologías de aluminio expuesto durante 3 meses



Morfologías superficiales de los productos de corrosión formados sobre aluminio expuesto durante 3 meses en la atmósfera de Cunduacán, Tabasco.

Figura 47. Micrografía y EDS de aluminio expuesto 6 meses

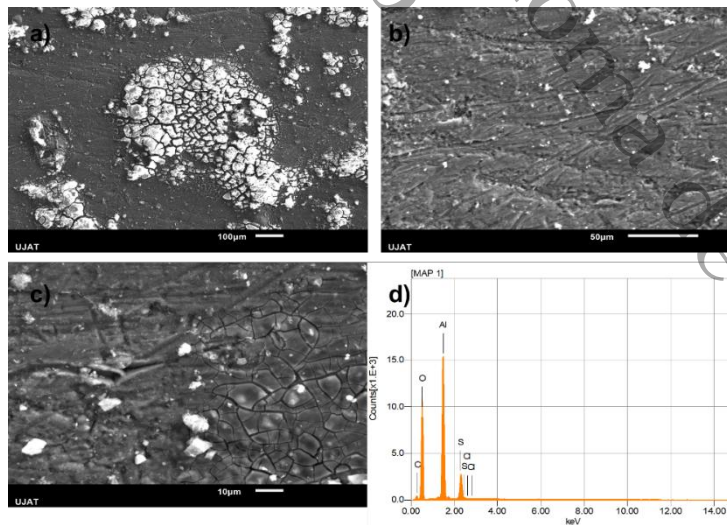
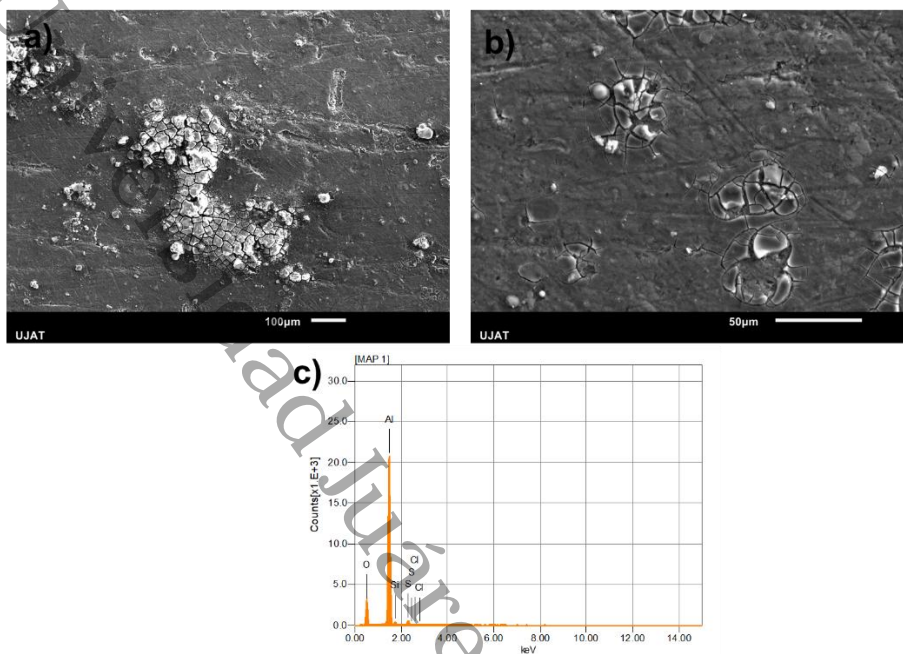


Figura 48. Micrografía y EDS de aluminio expuesto 9 meses



En el análisis de la probeta expuesta nueve meses (Figura 48a) se observa una acumulación importante de productos de corrosión en forma de depósitos aglomerados, con morfología granular y estructura segmentada, estos agregados parecen haberse nucleado en defectos superficiales del recubrimiento natural de óxido de aluminio. El patrón de distribución sugiere corrosión localizada, posiblemente picaduras, donde el centro de ataque ha sufrido una disolución preferencial, seguida de precipitación de productos de corrosión en forma de grupos cristalinos.

La Figura 48b muestra formaciones circulares, poligonales, parcialmente huecas, con bordes bien definidos, que podrían corresponder a cráteres de corrosión por picaduras y depósitos secundarios alrededor de las cavidades. Algunos tienen una textura suave en el interior, lo que indica una disolución metálica seguida de precipitación de óxidos / hidróxidos en la periferia. La distribución y la forma de estas características son indicativas de corrosión localizada.

El análisis EDS (Figura 48c) muestra aluminio (Al) y oxígeno (O), lo que confirma que la superficie está recubierta principalmente por óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), que es uno de los productos de corrosión típicos del aluminio. La detección de cloro (Cl) indica la presencia de contaminantes salinos, iniciadores de la corrosión por picaduras en el

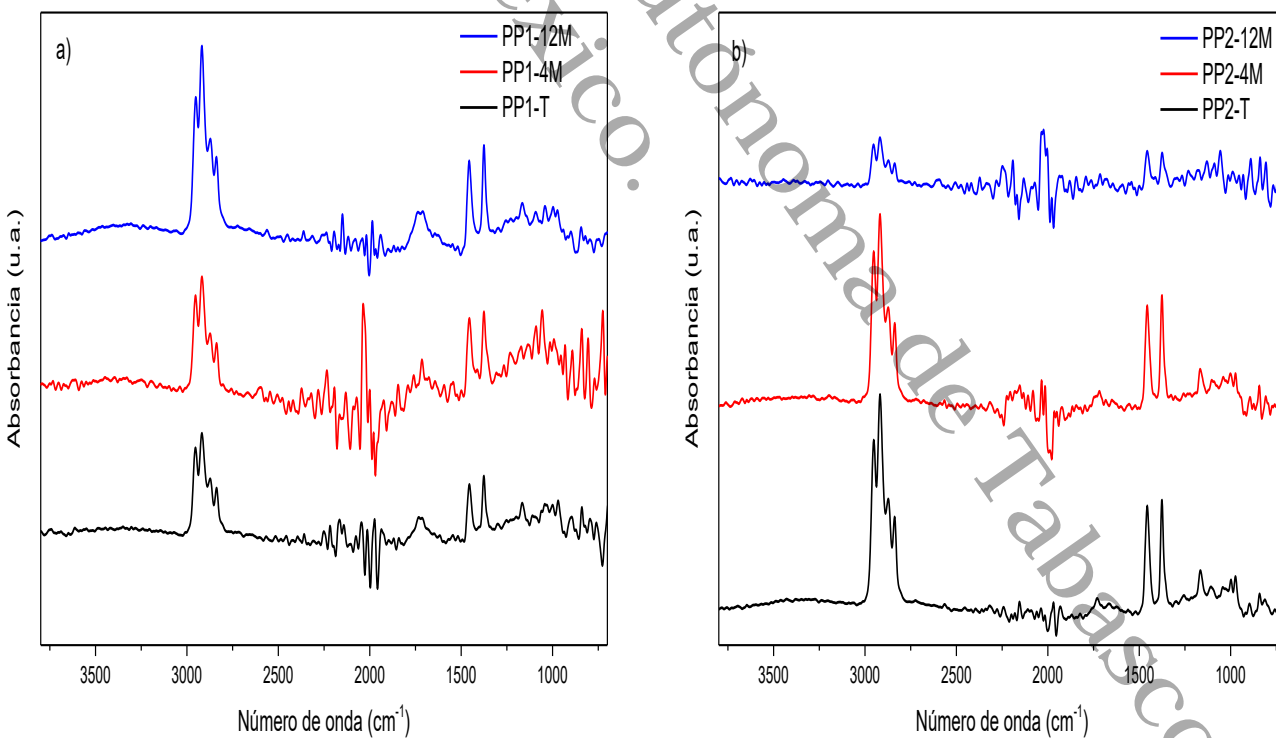
aluminio. El azufre (S) y el silicio (Si) detectados pueden estar asociados con contaminantes del aire industrial y polvo mineral, respectivamente.

#### 4.6. Degradación de polímeros

Los resultados mostrados en la Figura 49 y 50 fueron realizados en el rango de 750 a 3800  $\text{cm}^{-1}$  y a un promedio de 64 barridos por muestra, la cual fue concentrada sobre el dispositivo ATR.

La Figura 49 muestra los espectros de las probetas del PP expuestas (de rojo: 4 meses; azul: 12 meses). La Figura 49a corresponde al PP no estabilizado y la 50b al PP estabilizado, en ambos espectros se observa un incremento notable en la intensidad de bandas alrededor de 1700  $\text{cm}^{-1}$ , que no están presentes o son mínimas en la muestra testigo (negra). Esta banda es característica de los grupos carbonilo ( $\text{C}=\text{O}$ ), lo que indica procesos de fotooxidación y degradación oxidativa, comunes cuando el PP es expuesto a radiación UV, humedad y contaminantes atmosféricos.

Figura 49. Espectro IR-ATR de probetas de polipropileno expuestas en Cunduacán



Comparando los espectros a 4 y 12 meses, se nota que: la intensidad de las bandas de carbonilo es mayor a los 12 meses, lo cual sugiere una progresiva oxidación del material. Aparecen otras bandas adicionales o más definidas en la región de 1100–1300  $\text{cm}^{-1}$ , asociadas a vibraciones C–O, posiblemente de ésteres o alcoholes, productos también relacionados con la degradación por oxidación.

Algunas bandas características del polipropileno virgen (como las de 2950–2800  $\text{cm}^{-1}$  por los enlaces C–H de los grupos metilo y metileno) se reducen o modifican, especialmente en la muestra azul (12 meses), lo que indica una pérdida de integridad estructural del polímero.

Los espectros muestran claramente que el polipropileno sufre una degradación progresiva con el tiempo en condiciones urbanas, evidenciada por la aparición y aumento de bandas de oxidación, aunque en la Figura 50b, este proceso no es tan marcado como en el caso del polipropileno sin estabilizar.

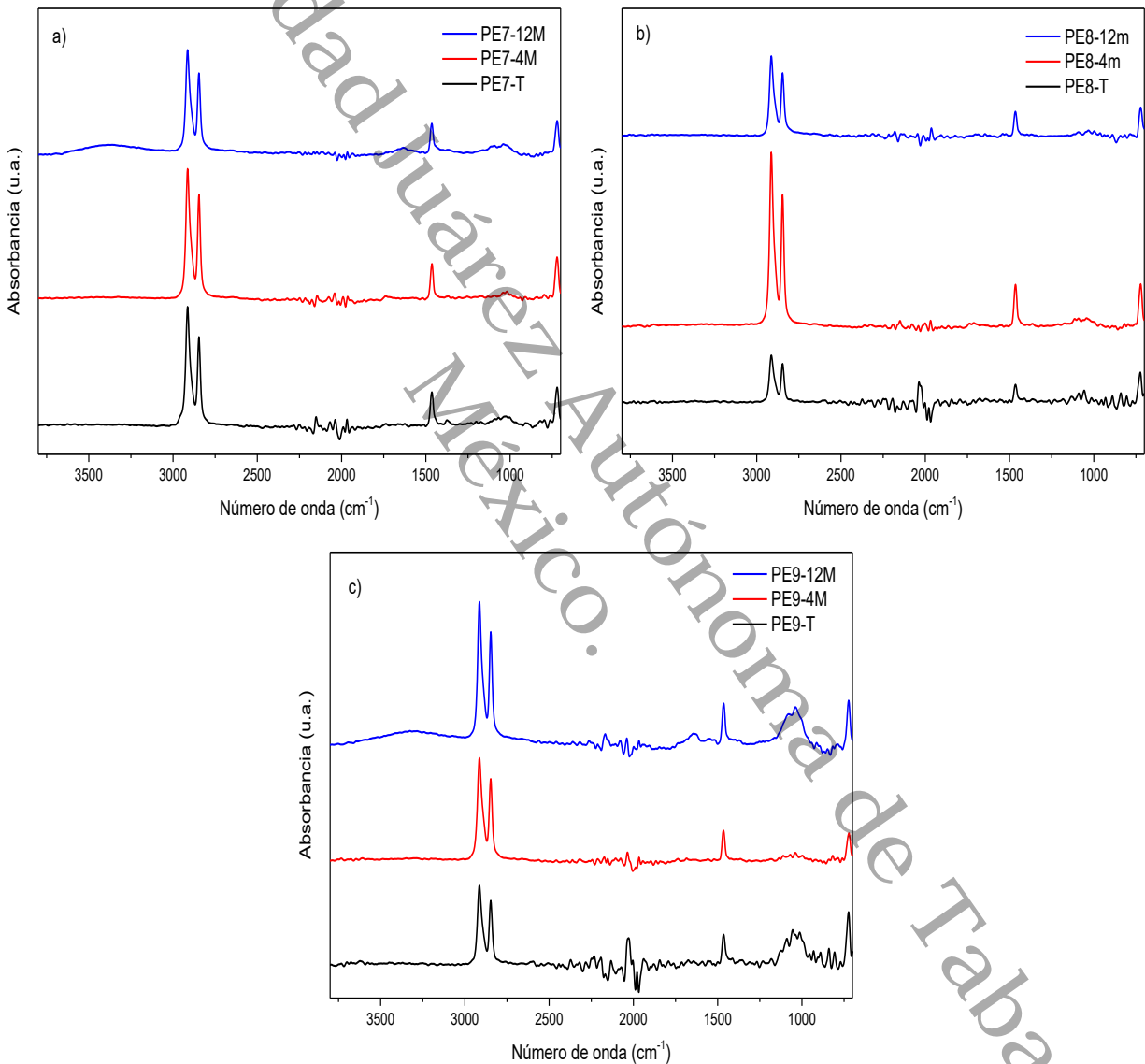
La Figura 50 muestra los espectros IR de las probetas de polietileno (PE) expuestas. La Figura 51a, del PE sin estabilizar (PE7) muestra a los 4 meses (rojo), un incremento de las bandas en la región de 1700  $\text{cm}^{-1}$ , lo cual sugiere que la degradación comienza rápidamente en ausencia de estabilizantes. A los 12 meses (azul) muestra intensa aparición de bandas en la misma región, correspondientes a grupos carbonilo (C=O), indicadores claros de fotooxidación. También hay incremento de bandas en la región 1100–1300  $\text{cm}^{-1}$ , asociadas a productos secundarios como alcoholes y ésteres, lo que confirma el avance de los mecanismos oxidativos.

En la Figura 50b, del PE con 0.20% HALS (alto peso molecular) + 1% antioxidante (PE8). Se observa que las bandas de carbonilo en las probetas expuestas en ambos periodos de exposición son menores que para el PE7, incluso tras 12 meses. Esto sugiere que la protección contra la fotooxidación es efectiva, limitando la formación de productos oxidativos. Sin embargo, en el espectro de 12 meses aún se detectan pequeñas señales de carbonilo, indicando que la protección es retardante, pero no permanente.

Los HALS de alto peso molecular son conocidos por su acción lenta pero sostenida, lo cual concuerda con los resultados observados.

En la Figura 50c del PE con 0.10% HALS (alto peso molecular) + 0.10% HALS (bajo peso molecular) + 1% antioxidante (PE9), muestra ligera presencia de carbonilos tras 12 meses, aunque menos intensa que en el PE7, pero más marcada que el PE8

Figura 50. Espectro IR-ATR de probetas de polipropileno expuestas en Cunduacán



## CAPÍTULO V. DISCUSIÓN

### 5.1. Clasificación de la atmósfera

En la lluvia analizada se observaron valores de pH en el rango de 4.30 - 5.23, indica lluvia ácida. Este pH entre 4.3 y 5.2 implica que el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), y posiblemente otros gases ácidos como  $\text{SO}_2$  o  $\text{NO}_x$ , están disueltos en el agua de lluvia (Kumar Maurya et al., 2022). Por otro lado, esta acidez, en conjunto con el TdH contribuyó como electrolito conductor ácido acelerando la corrosión en los materiales, especialmente en el acero al carbón, como se mostró en la Tabla 13 (Hoseinpoor et al., 2020; Jang et al., 2023; Karimova et al., 2019).

La variabilidad de pH se ve influenciada principalmente por la dirección de los vientos predominantes, a través de los cuales son transportados los contaminantes como el  $\text{SO}_2$  y  $\text{Cl}^-$  desde las fuentes emisoras, por ejemplo, la zona costera (Paterlini et al., 2024) en el caso de los  $\text{Cl}^-$  o las instalaciones de producción y transporte de hidrocarburos (Castañeda et al., 2021; Onakpohor et al., 2024)(caso del  $\text{SO}_2$ ).

El TdH acumulado durante el periodo del ensayo fue de 1085 h, lo que representa un entorno de moderada a alta agresividad en corrosión atmosférica  $\tau_3$ . Aunque el pH de la lluvia fue ligeramente ácido, la persistencia de la humedad, especialmente en enero y febrero, donde hubo aumento del TdH, incrementó los procesos corrosivos (Hoseinpoor et al., 2020).

En contraste con el TdH estimado por Del Angel et al. (2009) durante inicios del milenio, el TdH osciló entre 4603-5741h en atmósfera urbana (Villahermosa, Tabasco), los valores calculados para Cunduacán, Tabasco a un año de monitoreo fueron de 1085 h, este dato resulta menos de la tercera parte de las horas de humectación reportadas para principios de los 2000 (Domínguez et al., 2021).

Durante este año del estudio se observó que las temperaturas registradas fueron altas la mayor parte del tiempo, en el rango de 17.2-42.5 °C (Ver anexo 7), ocasionando la disminución de los tiempos de humectación estimados para el ambiente de Cunduacán, Tabasco lo que revela en parte, el alcance del cambio climático, principal responsable de las alteraciones existentes en las frecuencia y duración de los periodos húmedos y secos (Almazroui et al., 2017), relacionados con el aumento o disminución de los niveles de humedad en algunas regiones (Zaitchik et al., 2023). Además, se

observó que la precipitación y TdH no siempre coinciden, por lo que la humectación por condensación o niebla tiene un papel crítico que debiera analizarse en estudios posteriores (Ji et al., 2021).

En la Tabla 17, se presentan algunas de las investigaciones más recientes que reportan la estimación del tiempo de humectación anual para distintas zonas, destacan la diferencia entre los tipos de atmósfera, y que en las zonas marina se obtuvieron menores categorías de agresividad dada sus cercanías con la costa, sin embargo, esta estimación no tiene en cuenta la naturaleza de los materiales expuestos. La categoría de agresividad basada en el tiempo de humectación fue  $\tau_3$ , con 1085 horas se acerca bastante a lo estimado por (Thandar et al., 2022) para el sitio de Mandalay, Myanmar donde también se considera atmósfera urbana. Por otro lado, (Titakis & Vassiliou, 2020a) reportaron un TdH categoría  $\tau_3$  pero para un ambiente marino con 2439 h, reflejando que la amplitud en los rangos de asignación de categoría de ISO es bastante amplios.

Tabla 17. Cuadro comparativo de cálculo de Tiempo de Humectación

Referencia	Tipo de Atmósfera	TDH (horas/año)	Categoría
(Santa et al., 2024)	Urbana	4499	$\tau_4$
	Urbana Industrial	4743	$\tau_4$
	Urbana	5032	$\tau_4$
	Urbana industrial	4588	$\tau_4$
	Urbana	5595	$\tau_5$
(Thandar et al., 2022)	Urbana	5532	$\tau_4$
	Urbana	4002	$\tau_4$
	Urbana	<b>1172</b>	$\tau_3$
(Vera et al., 2023)	Marina	3344	$\tau_4$
(Titakis & Vassiliou, 2020b)	Marina	2439	$\tau_3$
<b>Este trabajo</b>	<b>Urbana-rural</b>	<b>1486</b>	<b><math>\tau_3</math></b>

La distancia de la estación de ensayo con la costa del Golfo de México es de aproximadamente 50 km, esto en conjunto con las velocidades de viento durante mayo, que alcanzaron en promedio 10 km/h con direcciones en promedio de  $110^\circ$  (*Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's), s/f*), siendo en mayor parte vientos del este que

ocasionaron que las velocidades de los vientos fueron bajas durante el periodo reportado, lo que influyó en la poca dispersión de partículas de cloruro proveniente de esta (Jang et al., 2023).

Por otro lado, la influencia de los iones sulfato en la corrosión de los metales es considerable, especialmente en ambientes como Tabasco donde existe la posibilidad de que interactúen con otros iones, como los cloruros (Liu et al., 2020) dada la cercanía con la costa. La interacción entre los sulfatos y el acero provoca el desarrollo de capas protectoras; sin embargo, en circunstancias específicas, como elevados porcentajes de humedad como el caso de Cunduacán, y la precipitación prolongada, así como el pH de esta, pueden agravar la corrosión al facilitar el desprendimiento de productos de corrosión que se forman sobre la superficie del metal. La presencia de iones sulfatos sobre el acero, provoca principalmente corrosión localizada (Melo et al., 2022; P. Zhang et al., 2024).

## **5.2. Velocidad de corrosión**

El comportamiento de la velocidad de corrosión del acero al carbón sugiere una etapa inicial de activación, seguida posiblemente por la formación de productos de corrosión que temporalmente ofrecen una protección parcial. Sin embargo, a los 12 meses, el aumento de la velocidad indica una ruptura o desestabilización de dichos productos, favoreciendo la renovación del proceso corrosivo. Para el acero al carbono, se asignaron categorías de agresividad bajas ( $C_1$ ) durante periodos de exposición de tres meses, sin embargo, después de un año, la velocidad de corrosión alcanzó niveles medios de agresividad  $C_2$ .

Los productos corrosivos producidos durante la corrosión atmosférica en este material fueron lepidocrocita y goethita. Las morfologías más comunes son el nido de pájaro y la lepidocrocita globular, así como la goethita de bola de algodón. Las morfologías más tempranas que aparecieron y permanecieron persistentemente durante todo el período de exposición fueron nido de pájaro y lepidocrocita globular, y goethita de bola de algodón. Esto es consistente con un informe de Fonna et al. (2021) de que la lepidocrocita y la goethita dominan el período temprano de la corrosión atmosférica. Por su parte, Alcántara et al. (2016) mencionan que es habitual encontrar grandes proporciones de ambas fases (lepidocrocita y goethita) en la superficie más externa de

la capa de óxido formada por el acero al carbono expuesto a la atmósfera además que la formación de uno se da cerca del otro dada la conocida transformación de la lepidocrocita en goethita. El análisis elemental arrojó datos de los componentes que se pueden encontrar en superficies de acero expuestas a la atmósfera incluyendo además del hierro y el carbono, oxígeno, Bismuto, Molibdeno, magnetita, algo de aluminio, azufre y Cloro. El acero, dado el contexto y los resultados carece de una capa pasivante estable.

En el caso del cobre, Algunos investigadores coinciden que el cobre al ser expuesto comienza a formar capas continuas de óxido que incrementan su grosor conforme avanza el tiempo hasta formar una pátina estable que ocasiona que la velocidad de corrosión ocurra más lenta (de la Fuente et al., 2008; Ekerenam et al., 2025a; Wang et al., 2023). Lo que se evidencia con el incremento en las velocidades de corrosión entre los periodos de exposición de tres meses, principalmente debido al lavado de las capas pasivas de óxido que el cobre tiende a formar cuando reacciona con el oxígeno (Ekerenam et al., 2025b). La velocidad de corrosión después de seis meses tiende a disminuir entonces puesto que, a mayor tiempo de exposición, más uniforme se vuelve la capa de productos de corrosión que evita el avance de la corrosión. El proceso de corrosión se observó muy rápido en comparación con las probetas de los otros metales, aunque es común que con el paso del tiempo se formen de manera paulatina los productos de reacciones químicas llevadas a cabo sobre la superficie del metal y estas se manifiesten en primera instancia con cambios de coloración hacia un color que cambia con el tiempo de exposición, para el caso del cobre(WAN et al., 2021), el proceso no suele ser tan rápido a menos que sean expuestos a ambientes muy ácidos o alcalinos (Hamidah et al., 2021). Durante las primeras diez semanas documentadas, se observó una acción corrosiva fuerte sobre estas probetas, atribuible a la susceptibilidad del cobre a compuestos como el  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  y  $\text{H}_2\text{S}$  que como se presenta en la sección de microscopía, se encontraron sobre las superficies de acuerdo con el análisis elemental realizado. Se atribuye el transporte de estas partículas a las cercanías de los complejos industriales (Batería de separación Cunduacán, Batería C.A.B) que procesan crudo para separar compuestos más ligeros como el aceite y el gas natural, este procedimiento

emplea procesos físicos como destilación atmosférica (Mathew et al., 2022) y destilación al vacío que suele derivar en la emisión de gases con contenido de azufre de hasta 7%.

Para el acero galvanizado, el comportamiento del recubrimiento de zinc actúa como ánodo de sacrificio, protegiendo el acero subyacente. En los análisis de DRX, el pico observado podría deberse a la rápida degradación del zinc por exposición continua, posiblemente por presencia de cloruros que como se mostró en los análisis EDS el elemento Cl estuvo presente la mayor parte del tiempo. La caída posterior puede indicar agotamiento parcial del recubrimiento o una redistribución de productos de corrosión de zinc que ofrecen protección temporal (Zheng & Gong, 2018). La agresividad atmosférica corresponde a una categoría de agresividad media C<sub>2</sub>.

El conjunto de resultados MEB–EDS–DRX confirma que el recubrimiento de zinc sobre acero galvanizado está experimentando una degradación progresiva bajo condiciones atmosféricas urbanas de Tabasco. Las primeras etapas de corrosión se manifiestan morfológicamente como rugosidad superficial y formación de productos porosos, y composicionalmente mediante la aparición de compuestos oxidados con oxígeno, cloro y azufre. Estos resultados son consistentes con un ataque tipo atmosférico húmedo, probablemente en condiciones de alta humedad relativa, lluvia ácida o deposición de partículas ricas en cloruros y SO<sub>2</sub>. El sistema protector del recubrimiento aún no ha colapsado completamente a los 6 meses, pero ya muestra signos claros de iniciación de corrosión.

Para el aluminio, la velocidad de corrosión se encuentra muy por debajo de los valores de referencia por lo que ISO 9223 no contempla categoría de agresividad, sin embargo, los análisis SEM–EDS–DRX mostraron el efecto que tiene el ambiente de Cunduacán sobre este metal, observándose un ataque agresivo más lento que a mayor tiempo de exposición representará un daño estructural significativo.

### **5.3. Envejecimiento de polímeros**

La aparición de nuevas bandas en la región aproximada de 1710–1765 cm<sup>-1</sup> (carbonilos) en las muestras expuestas (principalmente en las de 4 y 12 meses) evidencia una fotooxidación del PP. Este comportamiento coincide con estudios de envejecimiento térmico, donde se observa que a oxidación del material puede medirse

por la región carbonilo ( $1650\text{--}1850\text{ cm}^{-1}$ ) (Nasir et al., 2011). Por otro lado, algunos trabajos señalan que la formación de estos carbonilos se debe a los hidroperóxidos formados durante el envejecimiento (Jansson et al., 2004).

En los espectros FTIR del PE expuesto, se observó un incremento progresivo en la banda de carbonilo  $\sim 1700\text{ cm}^{-1}$ , que denota la formación de cetonas, ácidos, aldehídos, ésteres y lactonas lo que resulta en un indicador típico de degradación oxidativa de este material (Gulmine et al., 2003). Al igual que en los espectros de PP, la formación de hidroperóxidos ( $\text{-OOH}$ ) en las muestras de PE es un paso intermedio en su degradación, que puede detectarse en la región de  $3450\text{--}3350\text{ cm}^{-1}$ : (Rocha et al., 2009).

## CONCLUSIONES

El acero al carbono mostró una tasa de corrosión anual de  $2.0168\text{ (}\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}\text{)}$  que corresponde a una categoría de agresividad anual de C2, los análisis SEM realizados a lo largo del estudio mostraron desestabilización de los productos protectores iniciales (lepidocrocita y goethita). El modelo dosis-respuesta obtenido para este metal presentó un coeficiente de correlación  $R^2 = 1$ , lo que indica un ajuste perfecto, mostrando una relación positiva con la concentración de iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) y el tiempo de humectación (TOW), mientras que el  $\text{SO}_2$  y el pH mostraron relaciones negativas. Esto sugiere que, en este entorno específico, el  $\text{SO}_2$  actúa de manera menos agresiva y que el nivel de acidez (pH) favorece el avance del proceso corrosivo.

El cobre tuvo una tasa de corrosión anual de  $0.0936\text{ (}\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}\text{)}$  correspondiente a una categoría de agresividad de C1 (baja), el análisis morfológico mostró una formación progresiva de capas de óxido y pátina que contribuyeron a esta tasa de corrosión; sin embargo, se observó corrosión acelerada en las primeras diez semanas de exposición atribuida a la presencia de compuestos de azufre ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) emitidos por las instalaciones de procesamiento de hidrocarburos. Con base en el modelo obtenido, la corrosión del cobre fue menos sensible al  $\text{SO}_2$ , con influencia significativa de  $\text{Cl}^-$  pero inferior a la observada en los otros metales. El TOW y el pH tuvieron un efecto reducido, lo que confirma la relativa resistencia del cobre a condiciones atmosféricas agresivas.

El acero galvanizado, clasificado en categoría de agresividad C2 con velocidad de corrosión anual de  $0.0771 \text{ (}\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}\text{)}$ , experimentó degradación progresiva del recubrimiento de zinc por ataque de cloruros y  $\text{SO}_2$ , evidenciado por rugosidad superficial, productos de corrosión porosos y signos incipientes de corrosión del sustrato a través de análisis morfológicos y EDS. La ecuación dosis-respuesta en función de la velocidad de corrosión y los demás parámetros utilizados, reveló que, en el acero galvanizado, el  $\text{SO}_2$  y el pH tienen una influencia positiva en la corrosión, mientras que el efecto del  $\text{Cl}^-$  se redujo.

El aluminio mostró índices de corrosión por debajo de los valores de referencia establecidos por la norma ISO 9223, aunque se identificaron indicios de ataque superficial que, a largo plazo, podrían provocar daños estructurales significativos. En aluminio, el modelo de ecuación dosis-respuesta indicó una fuerte influencia del  $\text{Cl}^-$  y un efecto protector del pH debido a la baja acidez del medio. Sin embargo, la penetración de iones de cloruro a través de la capa de óxido pasivo puede inducir picaduras y corrosión intergranular.

El análisis conjunto de los resultados indica que el pH de la lluvia ejerce un impacto diferenciado sobre los metales evaluados, condicionado por la naturaleza química y la estabilidad de sus capas protectoras. En el acero al carbono, los valores de pH entre 4,30 y 5,23 favorecieron la corrosión al generar un electrolito ácido, con presencia de cloruros y suficiente TdH para que se produzcan reacciones electroquímicas. Por lo tanto, el efecto del pH se manifiesta como un factor de aumento de la agresividad atmosférica, a pesar de que el modelo dosis-respuesta muestra una correlación negativa, lo que sugiere que, en este ambiente de Cunduacán, la acidez no es el factor dominante en comparación con otros contaminantes.

De los materiales analizados el más vulnerable a la atmósfera es el acero al carbono con categoría de agresividad de C2, mientras que el acero galvanizado presentó una protección moderada de categoría de agresividad C1. Por otro lado, el cobre mostró buena resistencia en general, al que el ambiente resulta poco agresivo de categoría C1. El aluminio se encontró altamente resistente, aunque con riesgos puntuales debido a la corrosión por picaduras.

En cuanto a la agresividad de la atmósfera influenciada por parámetros climáticos, se encontró que los valores de pH de precipitación, entre 4.30 y 5.23, muestran la presencia de lluvia ácida asociada a la incorporación de CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> en el agua de lluvia, lo que favorece la formación de electrolitos ácidos y acelera los procesos de corrosión electroquímica, especialmente en el acero al carbono.

El TdH registrado en febrero de 2025 fue de 1085 horas, clasificado como agresividad atmosférica τ<sub>3</sub>, lo que representa menos de un tercio del TdH estimado en el período 2005-2007 (4603-5741 h) para la misma área. Esta reducción está parcialmente relacionada con los cambios en el régimen climático, particularmente en la frecuencia y duración de los intervalos húmedos y secos. Las temperaturas registradas durante el período de estudio oscilaron entre 17,2 y 42,5 °C, favoreciendo la reducción de TdH y evidenciando la influencia de las condiciones climáticas en la corrosión atmosférica. La orientación predominante de los vientos del este y las velocidades medias de 30 km/h condicionaron el transporte de contaminantes como Cl<sup>-</sup> y SO<sub>2</sub> desde las regiones costeras y las instalaciones industriales cercanas, influyendo en la morfología y composición de los productos de corrosión.

La información climática presentada representó una mejora en el análisis del comportamiento corrosivo de los materiales expuestos en Cunducán. El tiempo de humectación, que se ha relacionado con las precipitaciones, las temperaturas y los porcentajes de humedad relativa resultó relevante en las ecuaciones dosis-respuesta que ayudan en la estimación de velocidad de corrosión sin la necesidad de exponer a tiempos más prolongados.

La correlación entre datos meteorológicos y velocidad de corrosión permitió explicar las variaciones en la velocidad de corrosión observadas en los gráficos, los picos de corrosión en acero al carbón y galvanizado coincidieron con periodos de pH bajo y mayor precipitación. Además de que se estableció la relación entre bajo pH con alta humedad (como ocurre en septiembre, octubre y febrero) donde se dieron las condiciones ideales para la corrosión por humedad prolongada con valores de TdH elevados, aunque estas relaciones no siempre se observaron con tendencia lineal.

El pH de lluvia en todos los meses fue levemente ácido, suficiente para activar procesos de corrosión.

Las ecuaciones dosis-respuesta generadas a partir de los datos recolectados en la parte experimental, incorporan una visión multivariable y localmente calibrada de la corrosividad atmosférica en Cunduacán. Esto se demuestra a través del buen ajuste obtenido permitiendo predecir con mayor precisión el comportamiento real de cada material en la atmósfera específica de Cunduacán, gracias a la incorporación de: deposiciones específicas de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_2$ , tiempo efectivo de corrosión (TdH), condición química del medio húmedo (pH).

En resumen, el pH de la lluvia en el rango registrado promueve la corrosión en acero galvanizado y acero al carbono en mayor medida, tiene un efecto limitado sobre el cobre en estas condiciones y ejerce una acción protectora relativa sobre el aluminio, aunque con riesgo de pérdida de estabilidad pasiva bajo una acidez más extrema.

La combinación de parámetros ambientales y RE permite una evaluación integral de la corrosividad atmosférica, evidenciando la influencia del entorno en la durabilidad de los metales. El análisis espectral y el índice de localización confirmaron mecanismos de corrosión localizada en materiales como el acero y el cobre y para el aluminio y el acero galvanizado en periodos de un año, corrosión más uniforme, aunque presentaron en etapas iniciales de exposición corrosión localizada.

Los espectros IR de los materiales poliméricos analizados, mostraron que la exposición ambiental en Tabasco induce una degradación fotooxidativa superior en el PP, y más lenta en el PE, esto concuerda con la aparición de grupos funcionales oxigenados.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda incluir en futuras evaluaciones análisis de iones disueltos ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) y conductividad para complementar la estimación del riesgo corrosivo atmosférico. El envejecimiento de los polímeros y su análisis se recomienda complementar con pruebas con nanoidentación y algunas pruebas físicas de los materiales.

## REFERENCIAS CITADAS

- Abaroa-Pérez, B., Ortiz-Montosa, S., Hernández-Brito, J. J., & Vega-Moreno, D. (2022). Yellowing, Weathering and Degradation of Marine Pellets and Their Influence on the Adsorption of Chemical Pollutants. *Polymers*, 14(7), 1305. <https://doi.org/10.3390/POLYM14071305/S1>
- Alcántara, J., Chico, B., Simancas, J., Díaz, I., de la Fuente, D., & Morcillo, M. (2016). An attempt to classify the morphologies presented by different rust phases formed during the exposure of carbon steel to marine atmospheres. *Materials Characterization*, 118, 65–78. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2016.04.027>
- Almazroui, M., Balkhair, K. S., Islam, M. N., & Şen, Z. (2017). Climate Change Impact on Monthly Precipitation Wet and Dry Spells in Arid Regions: Case Study over Wadi Al-Lith Basin. *Advances in Meteorology*, 2017(1), 5132895. <https://doi.org/10.1155/2017/5132895>
- Castañeda, A., Corvo, F., Pech, I., Valdés, C., Marrero, R., & Del Angel-Meraz, E. (2021). Atmospheric Corrosion in an Oil Refinery Located on a Tropical Island under New Pollutant Situation. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(6), 4529–4542. <https://doi.org/10.1007/S11665-021-05746-9/METRICS>
- Chen, J., Song, J., Hu, W., Zhu, T., Gao, J., & Xiao, K. (2022). Corrosion Behaviour of Polyurethane Coating Containing Fluorocarbon on Carbon Steel in Tropical Marine Atmospheric Environment. *International Journal of Electrochemical Science*, 17(11), 221160. <https://doi.org/10.20964/2022.11.65>
- Chen, Q., Li, Z., Yin, X., Tang, S., Liu, W., & Ma, Y. (2024). Phase-field investigation of intergranular corrosion mechanism and kinetics in aluminum alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 8841–8853. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2024.05.209>
- Comisión Nacional del Agua. (2025). *Precipitación*. CONAGUA. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/pronostico-climatico/precipitacion-form>
- Cosnita, M., Cazan, C., Pop, M. A., & Cristea, D. (2023). Aging resistance under short time ultraviolet (UV) radiations of polymer wood composites entirely based

- on wastes. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103208.  
<https://doi.org/10.1016/J.ETI.2023.103208>
- de la Fuente, D., Simancas, J., & Morcillo, M. (2008). Morphological study of 16-year patinas formed on copper in a wide range of atmospheric exposures. *Corrosion Science*, 50(1), 268–285. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2007.05.030>
- Del Angel, E., Corvo, F., Hernandez Morales, N. E., & Tejero-Rivas, M. C. (2021). Particularities of indoor atmospheric corrosion of steel inside electric boxes in the tropical climate of Tabasco, Mexico. *Indoor and Built Environment*, 30(10), 1609–1619.  
[https://doi.org/10.1177/1420326X20950411/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177\\_1420326X20950411-FIG7.JPEG](https://doi.org/10.1177/1420326X20950411/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_1420326X20950411-FIG7.JPEG)
- Del Angel, E., Vera, R., & Corvo, F. (2015). Atmospheric Corrosion of Galvanised Steel in Different Environments in Chile and Mexico. *International Journal of Electrochemical Science*, 10(10), 7985–8004. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)11071-6](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)11071-6)
- Del Angel, M. E., Veleza, L., & Acosta, A. (2009). Agresividad atmosférica basada en el tiempo de humectación del clima tropical húmedo del estado de Tabasco. *Universidad y ciencia*, 25(2), 111–120.  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792009000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792009000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Domínguez, A. S., Meraz, E. D. A., & Pérez, A. E. C. (2021). La Corrosión del Acero Galvanizado en una Atmósfera marina-costera de Tabasco, México. *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*, 5(2), 147–162.  
<https://doi.org/10.19136/JEEOS.A5N2.4710>
- Ekerenam, O. O., Ikeuba, A. I., Njoku, C. N., Njoku, D. I., Emori, W., Nwokolo, I. K., Etim, I.-I. N., Okonkwo, B. O., Udoh, I. I., Daniel, E. F., Uzoma, P. C., Awonusi, B. O., Kolawole, S. K., Etim, I. P., & Olanrele, O. S. (2025a). Advancements in corrosion studies and protective measures for copper and copper-based alloys in varied environmental conditions. *Results in Engineering*, 105257.  
<https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2025.105257>

- Ekerenam, O. O., Ikeuba, A. I., Njoku, C. N., Njoku, D. I., Emori, W., Nwokolo, I. K., Etim, I.-I. N., Okonkwo, B. O., Udoh, I. I., Daniel, E. F., Uzoma, P. C., Awonusi, B. O., Kolawole, S. K., Etim, I. P., & Olanrele, O. S. (2025b). Advancements in corrosion studies and protective measures for copper and copper-based alloys in varied environmental conditions. *Results in Engineering*, 105257. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2025.105257>
- Emetere, M. E., & Olawole, O. C. (2019). Environmental Effect of Corrosion on Meteorological Parameters Over Malabo. *Procedia Manufacturing*, 35, 854–860. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2019.07.016>
- Enikeev, M. R., Potemkin, D. I., Enikeeva, L. V., Enikeev, A. R., Maleeva, M. A., Snytnikov, P. V., & Gubaydullin, I. M. (2020). Analysis of corrosion processes kinetics on the surface of metals. *Chemical Engineering Journal*, 383, 123131. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2019.123131>
- Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's)*. (s/f). Recuperado el 7 de marzo de 2024, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
- Fang, Q., Zhao, Y., Wei, J., Wang, Z., & Yao, J. (2024). Investigation of the Working Mechanism of CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Flow Corrosion of Mild Carbon Steel. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 63(1), 636–647. [https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.3C02885/SUPPL\\_FILE/IE3C02885\\_SI\\_001.PDF](https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.3C02885/SUPPL_FILE/IE3C02885_SI_001.PDF)
- Fonna, S., Bin M. Ibrahim, I., Gunawarman, Huzni, S., Ikhsan, M., & Thalib, S. (2021). Investigation of corrosion products formed on the surface of carbon steel exposed in Banda Aceh's atmosphere. *Heliyon*, 7(4), e06608. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E06608>
- Fuad Khoshnaw (Ed.). (2024). Part I: General Aspects of Corrosion, Corrosion Control, and Corrosion Prevention. En *Corrosion Atlas Case Studies* (pp. xxix–xlvi). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13228-5.09993-1>
- González Terrazas, D., Vermonden Thibodeau, A., & Gress Carrasco, F. (2021). *Municipios Vulnerables al Cambio Climático con base en los resultados del Atlas Nacional de Vulnerabilidad al cambio climático*. <https://www.gob.mx/inecc>

- Grimm, E. (2021). The study of copper corrosion mechanisms using electrochemical experimental techniques. *Electronic Theses and Dissertations*.  
<https://doi.org/10.18297/etd/3908>
- Gulmine, J. V., Janissek, P. R., Heise, H. M., & Akcelrud, L. (2003). Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering. *Polymer Degradation and Stability*, 79(3), 385–397. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00338-5](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00338-5)
- Guo, Q., Li, S., Shen, J., & Lu, J. (2022). Thermal demands and its interactions with environmental factors account for national-level variation in aggression. *Frontiers in Psychology*, 13, 911159. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2022.911159/BIBTEX>
- Hamad, H. S., & Mohammed, K. A. (2024). Localized Corrosion Behavior of Carbon Steel as a Function of Surface Temperature and Water Condensation Rate at the Top of Oil and Gas Pipelines. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 14(2), 88–100. <https://doi.org/10.52716/JPRS.V14I2.866>
- Hamidah, I., Solehudin, A., Hamdani, A., Hasanah, L., Khairurrijal, K., Kurniawan, T., Mamat, R., Maryanti, R., Nandiyanto, A. B. D., & Hammouti, B. (2021). Corrosion of copper alloys in KOH, NaOH, NaCl, and HCl electrolyte solutions and its impact to the mechanical properties. *Alexandria Engineering Journal*, 60(2), 2235–2243. <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2020.12.027>
- Henson, Robert., & Ahrens, C. Donald. (2021). *Meteorology today an introduction to weather, climate and the environment*.
- Herting, G., Saarimaa, V., Heydari, G., Kaleva, A., Sundell, P. E., & Odnevall, I. (2022). Simulated rain exposures can mimic long-term metal runoff at atmospheric conditions—A case study on naturally and prepatinated zinc sheet. *Materials and Corrosion*, 73(8), 1178–1192. <https://doi.org/10.1002/MACO.202213052;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Hoseinpoor, M., Prošek, T., Babusiaux, L., & Mallécol, J. (2020). Toward more realistic time of wetness measurement by means of surface relative humidity. *Corrosion Science*, 177, 108999. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2020.108999>

- ISO. (2012). ISO 9223:2012 Corrosion of metals and alloys-Corrosivity of atmospheres-Classification, determination, and estimation. En *Reference number ISO* (Vol. 9223).
- ISO - Search. (s/f). Recuperado el 8 de junio de 2025, de [https://www.iso.org/es/search.html?PROD\\_isoorg\\_es%5Bquery%5D=corrosion](https://www.iso.org/es/search.html?PROD_isoorg_es%5Bquery%5D=corrosion)
- ISO 8565. (2011). *ISO 8565:2011 Metals and alloys Atmospheric corrosion testing General requirements* (8665).
- ISO 9225. (2012). *ISO 9225:2012(E) Corrosion of metals and alloys-Corrosivity of atmospheres-Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres*.
- ISO 9226. (2012). *ISO 9226-2012 Corrosion of metals and alloys-Corrosivity of atmospheres-Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity*.
- Jang, E., Choi, S., Yoo, E., & Hyun, S. (2023). *Impact of shipping emissions regulation: Urban aerosol composition changes revealed by receptor and numerical modelling*. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-2642296/V1>
- Jansson, A., Möller, K., & Hjertberg, T. (2004). Chemical degradation of a polypropylene material exposed to simulated recycling. *Polymer Degradation and Stability*, 84(2), 227–232. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2003.10.016>
- Jáquez-Muñoz, J. M., Gaona-Tiburcio, C., Cabral-Miramontes, J., Nieves-Mendoza, D., Maldonado-Bandala, E., Olguín-Coca, J., Estupinán-López, F., López-León, L. D., Chacón-Nava, J., & Almeraya-Calderón, F. (2021). Frequency Analysis of Transients in Electrochemical Noise of Superalloys Waspaloy and Ultimet. *Metals* 2021, Vol. 11, Page 702, 11(5), 702. <https://doi.org/10.3390/MET11050702>
- Ji, Z. G., Ma, X. B., Zhou, K., & Cai, Y. K. (2021). An Improved Atmospheric Corrosion Prediction Model Considering Various Environmental Factors. *Corrosion*, 77(11), 1178–1191. <https://doi.org/10.5006/3879>
- Jin, X., Zhang, W., Han, N., Guo, S., Zhao, P., & Zhang, Y. (2023). Corrosion behavior and mechanism of 4004/Al-Mn-Cu-Mg-Si/4004 aluminum brazing sheet in sea

- water acidified accelerated test. *Materials Today Communications*, 35, 106161.  
<https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2023.106161>
- Jouen, S., Hannyer, B., Barbier, A., Kasperek, J., & Jean, M. (2004). A comparison of runoff rates between Cu, Ni, Sn and Zn in the first steps of exposition in a French industrial atmosphere. *Materials Chemistry and Physics*, 85(1), 73–80.  
<https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2003.12.008>
- Kablov, E. N., & Startsev, V. O. (2020a). Climatic Aging of Aviation Polymer Composite Materials: I. Influence of Significant Factors. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2020(4), 364–372.  
<https://doi.org/10.1134/S0036029520040102/METRICS>
- Kablov, E. N., & Startsev, V. O. (2020b). Climatic Aging of Aviation Polymer Composite Materials: II. Development of Methods for Studying the Early Stages of Aging. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2020(10), 1088–1094.  
<https://doi.org/10.1134/S0036029520100110/METRICS>
- Karimova, N. V., McCaslin, L. M., & Gerber, R. B. (2019). Ion reactions in atmospherically-relevant clusters: mechanisms, dynamics and spectroscopic signatures. *Faraday Discussions*, 217(0), 342–360.  
<https://doi.org/10.1039/C8FD00230D>
- Katona, R. M., Knight, A. W., Maguire, M., Bryan, C. R., & Schaller, R. F. (2023). Considerations for realistic atmospheric environments: An application to corrosion testing. *Science of The Total Environment*, 885, 163751.  
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.163751>
- Kou, J., & Ma, D. (2022). Galvanic corrosion based on wire beam electrode technique: Progress and prospects. *Corrosion Reviews*, 40(3), 205–220.  
<https://doi.org/10.1515/CORRECV-2021-0100/MACHINEREADABLECITATION/RIS>
- Krauklis, A. E., Karl, C. W., Rocha, I. B. C. M., Burlakovs, J., Ozola-Davidane, R., Gagani, A. I., & Starkova, O. (2022). Modelling of Environmental Ageing of Polymers and Polymer Composites—Modular and Multiscale Methods. *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 216, 14(1), 216.  
<https://doi.org/10.3390/POLYM14010216>

- Krivy, V., Kubzova, M., Kreislova, K., & Krejsa, M. (2018a). Prediction model of corrosion losses based on probabilistic approach. *Procedia Structural Integrity*, 13, 825–830. <https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2018.12.158>
- Krivy, V., Kubzova, M., Kreislova, K., & Krejsa, M. (2018b). Prediction model of corrosion losses based on probabilistic approach. *Procedia Structural Integrity*, 13, 825–830. <https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2018.12.158>
- Kubzova, M., Krivy, V., Kreislova, K., & Hong, H. P. T. (2019). Amount of Chlorides in Corrosion Products of Weathering Steel. *Transportation Research Procedia*, 40, 751–758. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2019.07.106>
- Kumar Maurya, S., Chechi, P., Prasad, R., Kant Susheel, C., & Manna, A. (2022). Effect of surface finish on corrosion behavior of polished Al6061 alloy in simulated acid rain environment. *Materials Today: Proceedings*, 64, 755–759. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.05.208>
- Kumar, R., Chaudhary, V. K., Pramanik, N., Ghosh, S., Kumar, R., Chaudhary, V. K., Pramanik, N., & Ghosh, S. (2024). Economic and Environmental Impact of Corrosion. <https://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/979-8-3693-7640-9.ch011>, 277–296. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-7640-9.CH011>
- Kychkin, A. K., Startsev, O. V., Lebedev, M. P., & Polyakov, V. V. (2020). Effect of solar radiation and synergism of the effect of UV radiation, temperature and moisture on the distraction of polymer composite materials in a cold climate. *Procedia Structural Integrity*, 30, 71–75. <https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2020.12.012>
- Leygraf, Christofer., Odnevall Wallinder, Inger., Tidblad, Johan., & Graedel, T. E. . (2016). *Atmospheric Corrosion, Second Edition*. 400.
- Li, Y., Tang, Y., Liu, X., & Li, Y. (2024). Insight into the crevice corrosion mechanism of AA7075-T651 high-strength aluminum alloys in neutral nitrate solution: The effect of Cl<sup>-</sup>. *Materials and Corrosion*. <https://doi.org/10.1002/MACO.202414334>
- Liu, Y., Gao, H., Wang, H., Tao, X., & Zhou, W. (2024). Study on the corrosion behavior of hot-dip galvanized steel in simulated industrial atmospheric

- environments. *International Journal of Electrochemical Science*, 19(1), 100445. <https://doi.org/10.1016/J.IJOES.2023.100445>
- Liu, Y., Zhao, H., Wang, Z., Wei, Y., Pan, C., & Lv, C. (2020). Corrosion Behavior of Low-Carbon Steel and Weathering Steel in a Coastal Zone of the Spratly Islands: A Tropical Marine Atmosphere. *International Journal of Electrochemical Science*, 15(7), 6464–6477. <https://doi.org/10.20964/2020.07.48>
- Longo, C., Savaris, M., Zeni, M., Brandalise, R. N., & Grisa, A. M. C. (2011). Degradation study of polypropylene (PP) and bioriented polypropylene (BOPP) in the environment. *Materials Research*, 14(4), 442–448. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000080>
- Maitra, S., & English, G. C. (1982). Environmental factors affecting localized corrosion of 7075-t7351 aluminum alloy plate. *Metallurgical Transactions*, 13(1), 161–166. <https://doi.org/10.1007/BF02642428>
- Mathew, T. J., Narayanan, S., Jalan, A., Matthews, L., Gupta, H., Billimoria, R., Pereira, C. S., Goheen, C., Tawarmalani, M., & Agrawal, R. (2022). Advances in distillation: Significant reductions in energy consumption and carbon dioxide emissions for crude oil separation. *Joule*, 6(11), 2500–2512. <https://doi.org/10.1016/J.JOULE.2022.10.004>
- Melo, P., Echagüe, M., Guerra, C., Jin, Q., Sancy, M., & Paul, A. (2022). On the effect of simulated contamination of chlorides and sulfates on steel rebar corrosion: Electrochemical behavior and surface analysis. *Construction and Building Materials*, 359, 129337. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129337>
- Mitali, S., Harsh, J., Devanshu, K., Santosh, K., & Rakesh, K. (2022). Overview on corrosion, classification and control measure: a study. *i-manager's Journal on Future Engineering and Technology*, 17(2), 26. <https://doi.org/10.26634/JFET.17.2.18501>
- Morcillo, M., Díaz, I., Cano, H., Chico, B., & de la Fuente, D. (2019). Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part II: Testing, inspection, maintenance. *Construction and Building Materials*, 222, 750–765. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.155>

- Nasir, A., Yasin, T., & Islam, A. (2011). Thermo-oxidative degradation behavior of recycled polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 119(6), 3315–3320. <https://doi.org/10.1002/APP.32918>
- Niu, J., Zhang, B., Ding, G., Dong, C., Qu, Z., Yang, H., & Gao, R. (2023). Study of short-term corrosion behavior of Q345 steel in marine atmospheric environment. *International Journal of Electrochemical Science*, 100374. <https://doi.org/10.1016/J.IJOES.2023.100374>
- Nogal, M., Bastidas-Arteaga, E., & Dos Santos Gervásio, H. M. (2020). Consideration of climate change-induced corrosion by structural codes. *IABSE Congress, Christchurch 2020: Resilient Technologies for Sustainable Infrastructure - Proceedings*, 1064–1070. <https://doi.org/10.2749/CHRISTCHURCH.2021.1064>
- Odnevall Wallinder, I., & Leygraf, C. (1997). A study of copper runoff in an urban atmosphere. *Corrosion Science*, 39(12), 2039–2052. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(97\)00081-4](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(97)00081-4)
- Onakpohor, A., Fakinle, B. S., Adesanmi, A. J., Sonibare, J. A., Oke, M. A., & Akeredolu, F. A. (2024). Determination of air emission factor of pollutants from local crude oil refineries. *Results in Engineering*, 22, 102036. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.102036>
- Ozkan, I. F., Ebrahimi, N., Zhang, J., Markovinovic, D., & Shirkhani, H. (2023). Atmospheric Corrosion of Steel Infrastructure in Canada Under Climate Change. *Corrosion*, 79(9), 1064–1078. <https://doi.org/10.5006/4296>
- Panchenko, Y. M., Marshakov, A. I., Bardin, I. V., & Shklyaev, A. V. (2019). Use of Statistical Analysis Methods for Estimating the Reliability of First-Year Carbon Steel and Zinc Corrosion Loss Predictions Calculated Using Dose-Response Functions. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 55(4), 753–760. <https://doi.org/10.1134/S2070205119040142/METRICS>
- Panchenko, Y. M., Marshakov, A. I., Nikolaeva, L. A., & Igonin, T. N. (2020). Evaluating the Reliability of Predictions of First-Year Corrosion Losses of Structural Metals Calculated Using Dose-Response Functions for Territories with Different Categories of Atmospheric Corrosion Aggressiveness. *Protection*

- of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 56(7), 1249–1263.  
<https://doi.org/10.1134/S207020512007014X/METRICS>
- Panchenko, Y. M., Marshakov, A. I., Nikolaeva, L. A., Kovtanyuk, V. V., Panchenko, Y. M., Marshakov, A. I., Nikolaeva, L. A., & Kovtanyuk, V. V. (2018). Prediction of first-year corrosion losses of copper and aluminum in continental regions. *AIMS Materials Science* 2018 4:624, 5(4), 624–649.  
<https://doi.org/10.3934/MATERSCI.2018.4.624>
- Paterlini, L., Brenna, A., Ceriani, F., Gamba, M., Ormellese, M., & Bolzoni, F. (2024). Atmospheric Corrosion of Different Steel Types in Urban and Marine Exposure. *Materials* 2024, Vol. 17, Page 6211, 17(24), 6211.  
<https://doi.org/10.3390/MA17246211>
- PEMEX. (2024). *Resultados al primer trimestre 2024*.  
<https://www.pemex.com/ri/finanzas/Paginas/resultados.aspx>
- Pertin, T., Flory, A., Cecutti, G., Beraud, L., Perez, C., Carvel, V., & Romana, L. (2022). *ITRF study of polymer aging under accelerated and ultra-accelerated conditions: comparison with natural aging*. <https://hal.univ-antilles.fr/hal-04039735>
- Petróleos Mexicanos (PEMEX). (2025). *Resultados al primer trimestre 2025*.  
<https://www.pemex.com/ri/finanzas/Reporte%20de%20Resultados%20no%20Dictaminados/Reporte%201T25.pdf>
- Pongsaksawad, W., Klomjit, P., Khamsuk, P., Sorachot, S., Pålsson, N. S., & Viyanit, E. (2021). Chloride distribution model and corrosion map of structural steels for tropical climate in Thailand. *Science of The Total Environment*, 787, 147465.  
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.147465>
- Qin, H., Liu, J., Shao, Q., Zhang, X., Teng, Y., Chen, S., Zhang, D., & Bao, S. (2024). Corrosion behavior and cellular automata simulation of carbon steel in salt-spray environment. *npj Materials Degradation* 2024 8:1, 8(1), 1–10.  
<https://doi.org/10.1038/s41529-024-00447-9>
- Raichev Raicho, & Veleva Lucien. (2009). *Corrosión de metales y degradación de materiales*.

- Rocha, M., Mansur, A., & Mansur, H. (2009). Characterization and Accelerated Ageing of UHMWPE Used in Orthopedic Prosthesis by Peroxide. *Materials* 2009, Vol. 2, Pages 562-576, 2(2), 562–576. <https://doi.org/10.3390/MA2020562>
- Santa, A. C., Montoya, D. A., Tamayo, J. A., Gómez, M. A., Castaño, J. G., & Baena, L. M. (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>
- Santa, A. C., Tamayo, J. A., Correa, C. D., Gómez, M. A., Castaño, J. G., & Baena, L. M. (2022). Atmospheric corrosion maps as a tool for designing and maintaining building materials: A review. *Heliyon*, 8(9), e10438. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E10438>
- Servicio Meteorológico Nacional. (s/f). Recuperado el 8 de noviembre de 2023, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
- Shiri, M., & Reza khani, D. (2020). Estimated and Stationary Atmospheric Corrosion Rate of Carbon Steel, Galvanized Steel, Copper and Aluminum in Iran. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 51(1), 342–367. <https://doi.org/10.1007/S11661-019-05509-1/METRICS>
- Spooner, M., Ambat, R., Conseil-Gudla, H., & Kula hci, M. (2022). A climate classification for corrosion control in electronic system design. *Machine Learning with Applications*, 9, 100397. <https://doi.org/10.1016/J.MLWA.2022.100397>
- Strieška, M., & Koteš, P. (2019). Sensitivity of dose-response function for carbon steel under various conditions in Slovakia. *Transportation Research Procedia*, 40, 912–919. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2019.07.128>
- Tejero-Rivas, M. C., Del Ángel-Meraz, E., Bautista-Margulis, G. R., & Hernández-Morales, N. E. (2015). Corrosividad atmosférica del cobre y del acero en dos localidades de Villahermosa, Tabasco. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(2), 197–206. <https://doi.org/10.1016/J.RIIT.2015.03.004>
- Thandar, W., Win, Y. Y. K., Khaing, T., Suzuki, Y., Sugiura, K., & Nishizaki, I. (2022). Investigation of Initial Atmospheric Corrosion of Carbon and Weathering Steels

- Exposed to Urban Atmospheres in Myanmar. *International Journal of Corrosion*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4301767>
- Titakis, C., & Vassiliou, P. (2020a). Evaluation of 4-Year Atmospheric Corrosion of Carbon Steel, Aluminum, Copper and Zinc in a Coastal Military Airport in Greece. *Corrosion and Materials Degradation 2020, Vol. 1, Pages 159-186*, 1(1), 159–186. <https://doi.org/10.3390/CMD1010008>
- Titakis, C., & Vassiliou, P. (2020b). Evaluation of 4-Year Atmospheric Corrosion of Carbon Steel, Aluminum, Copper and Zinc in a Coastal Military Airport in Greece. *Corrosion and Materials Degradation 2020, Vol. 1, Pages 159-186*, 1(1), 159–186. <https://doi.org/10.3390/CMD1010008>
- Veleva, L., Acosta, M., & Meraz, E. (2009). Atmospheric corrosion of zinc induced by runoff. *Corrosion Science*, 51(9), 2055–2062. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2009.05.030>
- Vera, R., Valverde, B., Olave, E., Sánchez, R., Díaz-Gómez, A., Muñoz, L., & Rojas, P. (2023). Atmospheric corrosion and impact toughness of steels: Case study in steels with and without galvanizing, exposed for 3 years in Rapa Nui Island. *Heliyon*, 9(7), e17811. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E17811>
- viento - *Glosario de Meteorología*. (s/f). Recuperado el 10 de junio de 2025, de <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Wind>
- Wallinder, I. O., & Leygraf, C. (2002). Environmental Effects of Metals Induced by Atmospheric Corrosion. *ASTM Special Technical Publication*, 1421, 185–199. <https://doi.org/10.1520/STP10893S>
- WAN, S., LIAO, B. kai, DONG, Z. hua, & GUO, X. peng. (2021). Comparative investigation on copper atmospheric corrosion by electrochemical impedance and electrical resistance sensors. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(10), 3024–3038. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65712-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65712-6)
- Wang, X., Su, H., Xie, Y., Wang, J., Feng, C., Li, D., & Wu, T. (2023). Atmospheric corrosion of T2 copper and H62 brass exposed in an urban environment. *Materials Chemistry and Physics*, 299, 127487. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2023.127487>

- Xiong, J., Yang, J., & Nie, J. (2020). Possible Dependence of Climate on Atmospheric Mass: A Convection–Circulation–Cloud Coupled Feedback. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 77(11), 3833–3846. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0022.1>
- Yan, F., Li, X., Jiang, B., Lin, D., Fu, M., & Li, W. (2019). Initial Corrosion Behavior of Pure Copper in Atmospheric Environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 384(1), 012039. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/384/1/012039>
- Zaitchik, B. F., Rodell, M., Biasutti, M., & Seneviratne, S. I. (2023). Wetting and drying trends under climate change. *Nature Water* 2023 1:6, 1(6), 502–513. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00073-w>
- Zhang, P., Yue, X., Sun, Y., Zhou, H., Zhang, J., & Wang, Y. (2024). Research on the mechanism of microbial corrosion in the subsurface layer of 7075 aluminum alloy under different corrosion environments with ultra low temperature double increase effect. *Vacuum*, 227, 113348. <https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2024.113348>
- Zhang, Y., Ayyub, B. M., & Fung, J. F. (2022a). Projections of corrosion and deterioration of infrastructure in United States coasts under a changing climate. *Resilient Cities and Structures*, 1(1), 98–109. <https://doi.org/10.1016/J.RCNS.2022.04.004>
- Zhang, Y., Ayyub, B. M., & Fung, J. F. (2022b). Projections of corrosion and deterioration of infrastructure in United States coasts under a changing climate. *Resilient Cities and Structures*, 1(1), 98–109. <https://doi.org/10.1016/J.RCNS.2022.04.004>
- Zhang, Z., Wang, H., Qian, H., Feng, Q., Jin, X., & Fan, F. (2023). Comparative analysis and applicability of corrosion test methods for construction steel components. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02034. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02034>
- Zheng, X., & Gong, M. (2018). Atmospheric corrosion behavior of carbon steel and galvanized steel in Southwest China. *Materialprüfung/Materials Testing*, 60(6). <https://doi.org/10.3139/120.111197>

## ANEXOS

### Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de la Tesis:	<b>Evaluación de la degradación atmosférica de materiales (metálicos y poliméricos) en un ambiente rural-urbano de Tabasco</b>
Autora de la Tesis:	<b>Osiris Angélica López Zapata</b>
ORCID:	<b>0009-0000-4514-0531</b>
Resumen de la Tesis:	<p>La corrosión atmosférica representa una amenaza significativa para la integridad de materiales metálicos expuestos a ambientes naturales. Esta investigación tuvo como objetivo caracterizar la corrosión de acero al carbón, acero galvanizado, aluminio y cobre en un entorno rural-urbano de Tabasco, integrando parámetros climatológicos, deposición de contaminantes y análisis electroquímico, además se realizó exposición de polietileno y polipropileno para evaluar su envejecimiento mediante espectroscopía infrarroja (FTIR), comparando probetas testigo (sin exponer), expuestas por 4 meses y por 12 meses en un sitio urbano de Tabasco. Se realizaron exposiciones durante 12 meses, registrando temperatura, humedad relativa, tiempo de humectación (TdH), pH de lluvia, y deposición de cloruros y sulfatos (ISO 9223). Se aplicaron ecuaciones dosis-respuesta con el fin de predecir el comportamiento de las variables climáticas en la velocidad de corrosión en el ambiente de estudio y se utilizó ruido electroquímico (RE) como técnica de monitoreo del tipo de corrosión que se desarrolló con</p>

	<p>respecto al tiempo en las probetas metálicas. Los resultados revelaron un TdH acumulado de 1085 h y lluvias con pH ácido (4.3–5.2), factores que aceleran la corrosión. El acero al carbón mostró la mayor velocidad de corrosión (2.02 <math>\mu\text{m/a}</math>) y alta actividad electroquímica. El cobre y el aluminio presentaron pasividad, con señales RE estables y bajas corrientes. El análisis espectral y el índice de localización confirmaron mecanismos de corrosión localizada en materiales activos como el acero al carbono. Los espectros de los polímeros mostraron incremento de bandas asociadas a grupos carbonilo (C=O) y otras funciones oxigenadas, indicando procesos de fotooxidación inducidos por la radiación UV y la humedad atmosférica. Se concluye que la combinación de parámetros ambientales y RE permite una evaluación integral de la corrosividad atmosférica, evidenciando la influencia del entorno en la durabilidad de metales. En el caso de las ecuaciones dosis-respuesta se observó que el pH de la lluvia es el que más influye en la corrosión de los metales.</p>
Palabras Clave de la Tesis:	acero al carbón, acero galvanizado, aluminio, cobre, corrosión
Referencias Citadas:	<b>Referencias citadas desde la página 87 hasta la 101</b>

## 1. Glosario de términos

<b>Término</b>	<b>Definición</b>
<b>Agresividad atmosférica</b>	Nivel de severidad del ambiente en cuanto a su capacidad de inducir corrosión.
<b>Alisios</b>	Vientos del este
<b>Análisis espectral</b>	Evaluación de la frecuencia de las señales de RE para identificar el tipo y mecanismo de corrosión.
<b>Bastidor de exposición</b>	Dispositivo donde se realiza el ensayo de corrosión en condiciones o naturales, suele ser de material resistente para que dure durante el tiempo de ensayo.
<b>Condensación atmosférica</b>	Proceso por el cual el vapor de agua se transforma en líquido sobre superficies metálicas.
<b>Contaminación industrial</b>	Presencia de contaminantes derivados de procesos industriales que afectan la calidad del aire y la corrosividad.
<b>Contaminantes atmosféricos</b>	Sustancias presentes en el aire como SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , y Cl <sup>-</sup> que afectan la agresividad del entorno.
<b>Corriente de ruido</b>	Evaluación de la frecuencia de las señales de RE para identificar el tipo y mecanismo de corrosión.
<b>Corrosión</b>	Proceso electroquímico o químico mediante el cual un material, generalmente metálico, se degrada por reacción con su entorno.
<b>Corrosión atmosférica</b>	Tipo de corrosión que ocurre cuando los materiales metálicos están expuestos directamente a la atmósfera, afectada por factores como humedad, contaminantes y temperatura.
<b>Corrosión localizada</b>	Daño que ocurre en una zona específica del metal, comúnmente en forma de picaduras, grietas o corrosión bajo tensión.
<b>Corrosión uniforme</b>	Tipo de degradación que ocurre de manera homogénea en toda la superficie del material.

<b>Deposición cloruros</b>	<b>de</b>	Acumulación de sales de cloro sobre superficies metálicas, contribuyendo a la corrosión, especialmente en ambientes marinos.
<b>Deposición sulfatos</b>	<b>de</b>	Presencia de sales sulfatadas provenientes de contaminación industrial, que pueden acelerar la corrosión.
<b>Dosis-respuesta</b>		Relación entre una variable ambiental (dosis) y la respuesta del material (por ejemplo, velocidad de corrosión).
<b>Electrodo referencia</b>	<b>de</b>	Electrodo con potencial conocido y constante, utilizado en mediciones electroquímicas.
<b>Electrolito</b>		Sustancia que contiene iones libres, esencial para que ocurra la corrosión electroquímica.
<b>Entorno urbano</b>	<b>rural-</b>	Zona de transición entre ciudad y campo que presenta combinación de contaminantes naturales e industriales.
<b>Escorrentía</b>		Agua de lluvia que fluye sobre la superficie de los materiales, afectando la velocidad y tipo de corrosión.
<b>Frecuencia evento</b>	<b>de</b>	Número de transientes registrados por unidad de tiempo. Alta frecuencia se asocia con actividad corrosiva intensa.
<b>Humedad relativa</b>		Porcentaje de vapor de agua en el aire comparado con la cantidad máxima que podría contener a una temperatura dada.
<b>Índice localización (LI)</b>	<b>de</b>	Parámetro derivado del RE que indica la propensión del material a experimentar corrosión localizada.
<b>Material activo</b>		Metal que tiende a corroerse fácilmente por no formar capas pasivantes estables.
<b>Material pasivo</b>		Metal que tiende a formar una película protectora que lo aísla del ambiente.
<b>Oxidación</b>		Reacción electroquímica en la que un átomo pierde electrones.
<b>Pasivación</b>		Formación de una capa protectora sobre el metal que reduce la velocidad de corrosión.

---

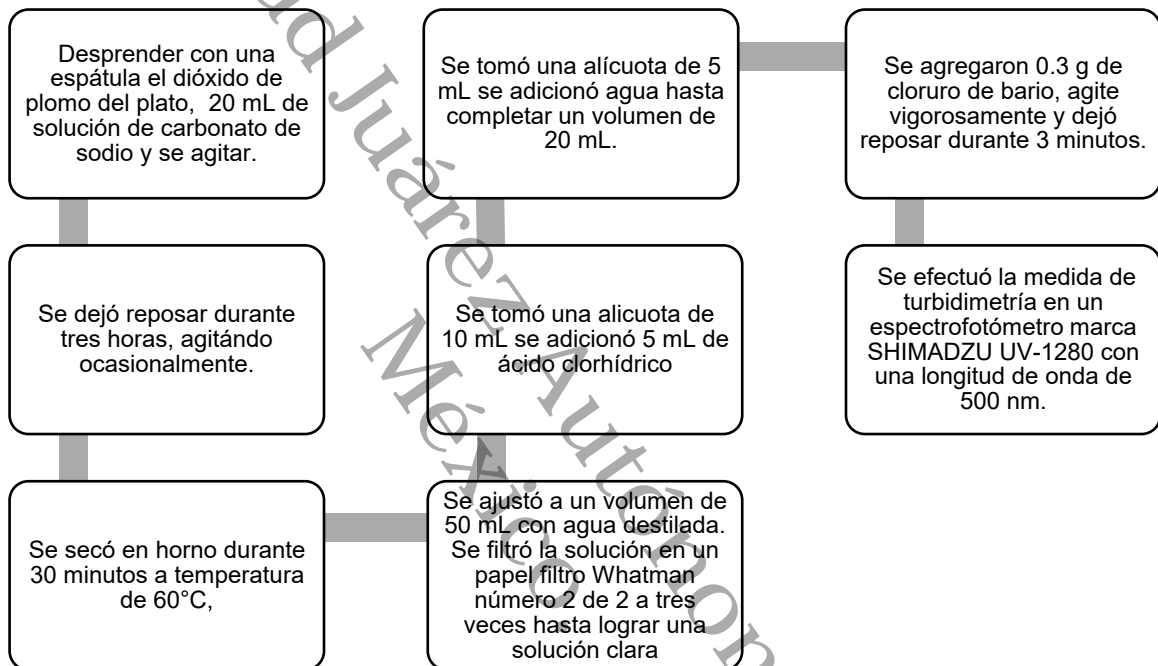
<b>Pérdida de masa</b>		Cantidad de material eliminado por corrosión, expresada en miligramos o gramos por unidad de tiempo o superficie.
<b>pH</b>		Medida de acidez o alcalinidad de una solución. Valores menores a 7 indican acidez, y mayores a 7, alcalinidad.
<b>Potencial de circuito abierto (OCP)</b>		Valor del potencial electroquímico de un electrodo sin aplicar corriente, indica la tendencia a la oxidación o reducción.
<b>Potencial de ruido</b>		Parte de la señal de RE que refleja las variaciones del potencial electroquímico en el sistema.
<b>Precipitación pluvial</b>		Caída de agua líquida desde la atmósfera a la superficie terrestre en forma de lluvia.
<b>Probeta de corrosión</b>		Muestras metálicas normalizadas expuestas al ambiente para medir la velocidad de corrosión.
<b>Reacción redox</b>		Reacción química que implica transferencia de electrones; incluye procesos de oxidación y reducción.
<b>Resistencia a la polarización (Rp)</b>		Medida de la resistencia al paso de corriente por una interfase metal-electrolito.
<b>Ruido electroquímico (RE)</b>		Fluctuaciones espontáneas de corriente y potencial generadas por procesos corrosivos.
<b>Tiempo de humectación (TdH)</b>		Tiempo durante el cual la superficie del metal permanece mojada, permitiendo reacciones electroquímicas.
<b>Trascientes</b>		Pulsos o picos abruptos en los registros de corriente o potencial. Se asocian con eventos individuales de corrosión localizada, como picaduras.
<b>Velocidad de corrosión</b>		Medida que indica cuánto material se pierde debido a la corrosión por unidad de tiempo, expresada usualmente en $\mu\text{m/año}$ .

---

## 2. Método de análisis de platos de sulfatación

El proceso de análisis de los platos de sulfatación expuestos en el ambiente de estudio consiste en la remoción del contenido de sulfato del plato y su posterior precipitación usando una solución de carbonato de sodio. Después, el sulfato es precipitado con cloruro de bario, y su concentración se determina por medio de turbidimetría.

Figura 51. Proceso de análisis realizado para determinar las concentraciones dióxido de azufre



## 3. Método de análisis vela húmeda

Después del periodo de exposición de las muestras, la gasa que cubre al tubo de ensaye se retiró y se colocó en el interior del frasco que contiene la solución fijadora y se llevaron las muestras al laboratorio para su análisis.

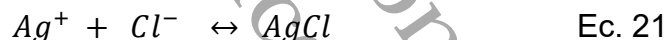
Se mide la cantidad total de la muestra recuperada al final del tiempo de exposición, en una probeta graduada, exprimiendo la gasa con una espátula (Figura 53a). El análisis se realizó con una valoración con nitrato de plata utilizando dicromato de potasio ( $K_2CrO_4$ ) como indicador de vire (Figura 53b) y se registraron los volúmenes gastados al término de cada valoración.

Figura 52. Titulación volumétrica con nitrato de plata de las velas húmedas



Nota: se muestra el análisis de las velas húmedas (realizado por cada vela expuesta y la vela testigo) por titulación volumétrica: a) se mide la cantidad de solución al final de la exposición, y se exprime la gasa de la mecha; b) se titula con nitrato de plata cada una de las velas; c) la valoración se da por finalizada cuando se observa el vire de amarillo claro a un color más intenso casi amarronado.

Se utilizaron las siguientes ecuaciones para determinar la masa de iones cloruro presentes en las velas.



Equivalente (analito)= equivalente (valorante)

$$Eq_{Cl} = Eq_{Ag} \quad \text{Ec.23}$$

$$N = \frac{Eq}{V} \rightarrow Eq = N \cdot V \rightarrow Eq = m/P_{eq} \quad \text{Ec.24}$$

$$\frac{m_{Cl}}{P_{eq_{Cl}}} = N_{Ag} \cdot V_{Ag} \quad \text{Ec.25}$$

$$m_{Cl} = N_{Ag} \cdot V_{Ag} \cdot P_{eq_{Cl}} \quad \text{Ec.26}$$

#### 4. Escorrentía de los metales

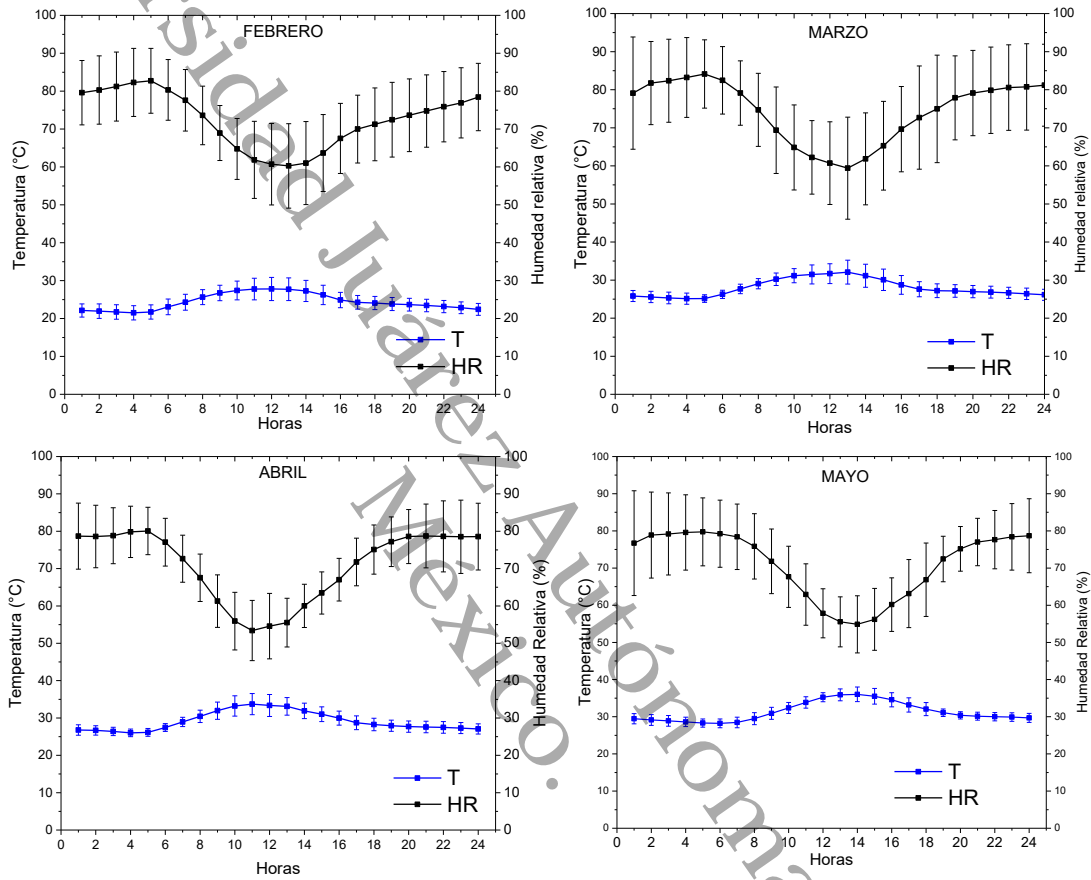
La escorrentía (runoff) en materiales metálicos es el proceso mediante el cual el agua de lluvia arrastra productos de corrosión, sales solubles y contaminantes depositados sobre la superficie del metal. Este fenómeno, por un lado, puede disminuir la concentración de contaminantes acumulados; por otro, puede facilitar la pérdida progresiva de masa metálica, acelerando el proceso corrosivo. (Wallinder & Leygraf, 2002) La escorrentía está estrechamente vinculada al pH del agua, el tiempo de humectación (TdH), y la solubilidad de los óxidos formados. Estudios (Herting et al., 2022; Jouen et al., 2004; Odnevall Wallinder & Leygraf, 1997) han demostrado que materiales como el cobre o el zinc pueden liberar trazas metálicas al medioambiente, lo que también plantea implicaciones ecológicas. La medición del pH del runoff proporciona una herramienta indirecta para evaluar la reactividad superficial y la agresividad de la atmósfera sobre el material, siendo un complemento importante en la caracterización del ambiente corrosivo (ISO 9225, 2012).

*Figura 53. La escorrentía de los metales de exposición se recolectó en recipientes plásticos de los cuales se analizó el pH*



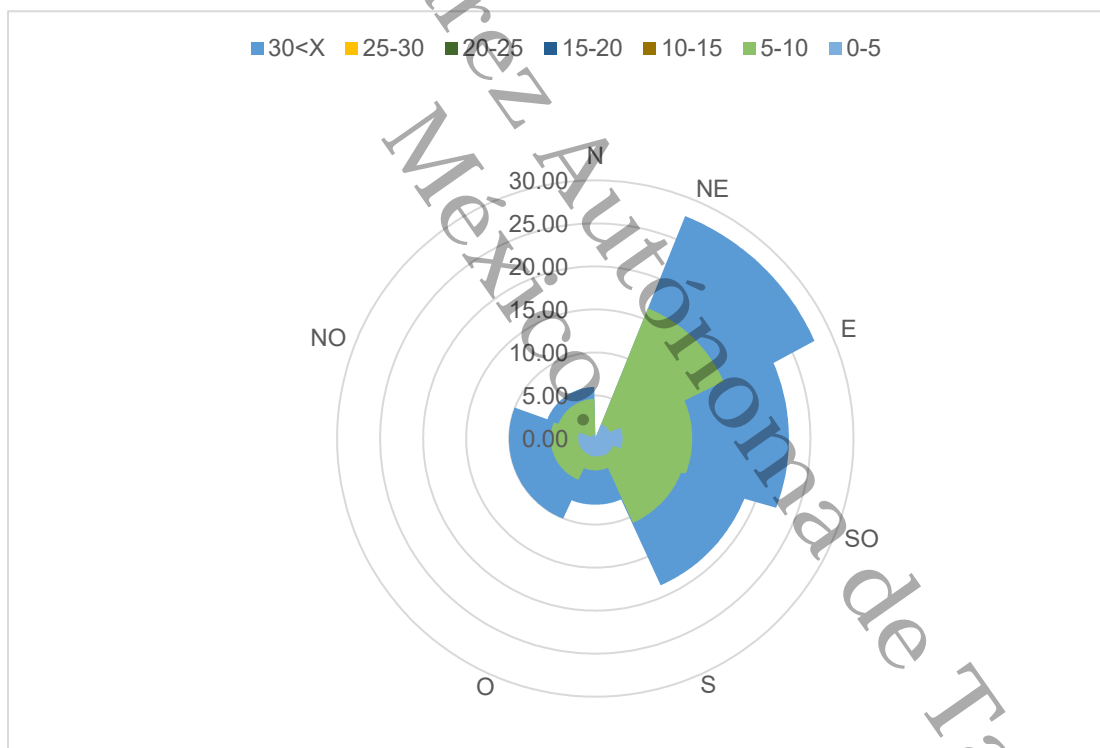
## 5. Graficas de comportamiento mensual de temperatura y humedad relativa durante los primeros meses del ensayo

Figura 54. Comportamiento de Temperatura y Humedad relativa periodo 1



## 6. Estadística de ráfagas de viento

El viento, que se define como el movimiento natural del aire con respecto a la superficie de la Tierra (*viento - Glosario de Meteorología, s/f*). La rosa de los vientos es la herramienta que se utiliza para determinar la dirección en la que estos soplan, así como su intensidad, en una localización concreta. La rosa de vientos en la Figura # elaborada a partir de los datos de la estación meteorológica, muestra la frecuencia relativa con la que el viento sopla desde diferentes direcciones a lo largo del año, así como la distribución de velocidades en cada dirección. Los colores representan rangos de velocidad del viento en km/h, las direcciones predominantes de los vientos fueron: Este (E), Sureste (SE) y Noreste (NE).



La mayor frecuencia de ocurrencia anual se concentra en el cuadrante oriental, lo cual indica que los vientos predominantes soplan desde el mar hacia dentro, en este sentido el Golfo de México tiene una influencia marcada.

La mayoría de los vientos registrados se encuentran en el rango de 5–15 km/h, con algunas incidencias de 20–25 km/h. En cambio, las velocidades más altas de 25–30 km/h y >30 km/h son muy poco frecuentes o ausentes.

Tal como se muestra en la Figura #, las direcciones Oeste (O), Noroeste (NO) y Suroeste (SO) muestran muy poca actividad eólica, lo cual sugiere que estas direcciones son menos relevantes para el transporte de humedad o contaminantes. Cunduacán, Tabasco, al estar en una zona tropical húmeda (Henson & Ahrens, 2021) y próxima al Golfo de México, recibe vientos alisios (dominantes del este), especialmente en temporada de lluvias y ciclones.

La rosa de vientos anual de Cunduacán muestra un patrón característico de regiones tropicales costeras, con predominancia de vientos moderados del E, SE y NE, lo que tiene implicaciones tanto ambientales como en infraestructura. Este patrón es coherente con la dinámica atmosférica del sureste mexicano, fuertemente influenciada por el Golfo de México.

## 7. Parámetros meteorológicos

Tabla 18. Promedio mensual, máximo y mínimo de Humedad Relativa y Temperatura

Año	Mes	HR	HR Máx.	HR Mín.	T	T Máx.	T Mín.
		Promedio (%)	(%)	(%)	Promedio (°C)	(°C)	(°C)
2024	enero	82.69	99	51	24.89	34.6	18.9
2024	febrero	73.02	95	39	24.64	35	17.7
2024	marzo	74.75	95	18	27.97	39.6	20.6
2024	abril	70.9	91	29	29.13	40.4	23.9
2024	mayo	71.15	93	33	31.33	42.5	24.9
2024	julio	75.57	92	46	29.39	35.9	24
2024	agosto	76	95	53	29.38	35.9	24.1
2024	septiembre	75.06	100	48	29.85	36.3	24.6
2024	octubre	79.43	96	46	27.06	33.7	22.8
2024	noviembre	74.63	96	43	26.99	34.5	18.9
2024	diciembre	76.08	93	44	24.56	32.2	19
2025	enero	78.77	93	52	23.72	32.8	17.2
2025	febrero	80.9	95	46	25.72	33.8	19.7

**8. Categorías de agresividad atmosférica por mes en función de la deposición de iones cloruro ( $S_d$ )**

Mes	Velocidad de deposición	Categoría ISO 9223	Velocidad de deposición acumulado
	[mg/(m <sup>2</sup> d)]		[mg/(m <sup>2</sup> d)]
mar-24	2.76	S <sub>0</sub>	2.76
abr-24	5.06	S <sub>1</sub>	7.81
may-24	0.92	S <sub>0</sub>	8.73
jun-24	0.33	S <sub>0</sub>	9.06
jul-24	2.68	S <sub>0</sub>	11.74
ago-24	4.97	S <sub>1</sub>	16.71
sep-24	4.49	S <sub>1</sub>	21.20
oct-24	0.14	S <sub>0</sub>	21.33
nov-24	1.26	S <sub>0</sub>	22.60
dic-24	1.31	S <sub>0</sub>	23.90
ene-25	0.85	S <sub>0</sub>	24.75
feb-25	10.96	S <sub>1</sub>	35.72
<b>Promedio anual</b>		<b>S<sub>1</sub></b>	<b>17.19</b>

**9. Categorías de agresividad atmosférica por mes en función de la deposición de iones sulfato ( $P_d$ )**

Mes	Velocidad de deposición	Categoría ISO 9223	Velocidad de deposición acumulada
	(mg/m <sup>2</sup> d)		(mg/m <sup>2</sup> d)
mar-24	1.12	p <sub>0</sub>	1.12
abr-24	2.30	p <sub>0</sub>	3.42
may-24	5.25	p <sub>1</sub>	8.67
jun-24	8.81	p <sub>1</sub>	17.48
jul-24	2.74	p <sub>0</sub>	20.21
ago-24	0.38	p <sub>0</sub>	20.60
sep-24	1.61	p <sub>0</sub>	22.21
oct-24	2.22	p <sub>0</sub>	24.43
nov-24	1.27	p <sub>0</sub>	25.69
dic-24	3.45	p <sub>0</sub>	29.15
ene-25	5.95	p <sub>1</sub>	35.10
feb-25	3.01	p <sub>0</sub>	38.11
<b>promedio anual</b>		<b>P<sub>1</sub></b>	<b>20.51</b>

## **10. Espectros de potencial y corriente obtenidos por Ruido Electroquímico para las probetas metálicas**

De Una vez realizados los ensayos de Ruido Electroquímico (RE) se trazaron los espectros de potencial y corriente para los distintos materiales metálicos como el Ruido Electroquímico Potencial (EPN) y el Ruido Electroquímico en Corriente (ECN) se midieron sincrónicamente, por lo tanto, están correlacionados. En la Figura 56 se presentan los espectros correspondientes a las probetas de aluminio, en la Figura 56a se muestran los espectros de potencial en azul y corriente en naranja, de ellos se obtuvieron señales con trascientes continuos y en los mismos sitios y al mismo nivel por lo que la influencia del electrolito (agua) no activó ninguna reacción de corrosión más allá de ligeras variaciones inherentes al contacto entre el mismo, el oxígeno y el material.

Por otro lado, en la Figura 56b y 56c se muestran los espectros para las probetas expuestas por tres meses en diferentes periodos estacionales, los picos de EPN medidos coinciden con los picos de ECN al mismo tiempo. En esta situación, ambas aleaciones de aluminio sufren una grave corrosión por picaduras durante la medición de RE. Sin embargo, la diferencia en la amplitud de las trascientes de ECN del espectro de tres meses Figura 56 b con las de EPN indican que hay corrosión localizada en gran parte de la superficie total de la probeta, aunque estas son pequeñas. A medida que la corrosión por picaduras se propaga, los valores ECN y EPN se desvían de 0, lo que indica que aparece una asimetría debido a que los potenciales de corrosión de WE1 y WE2 son diferentes.

En la Figura 58, en los espectros del cobre no hay grandes cambios en EPN, lo que indica que la actividad de corrosión no cambia en gran medida. Las posibles razones que inducen un cambio potencial son: la ruptura de la película y el proceso de carga/descarga de la capacitancia de la interfaz.

Figura 55. Espectros de potencial y corriente para aluminio

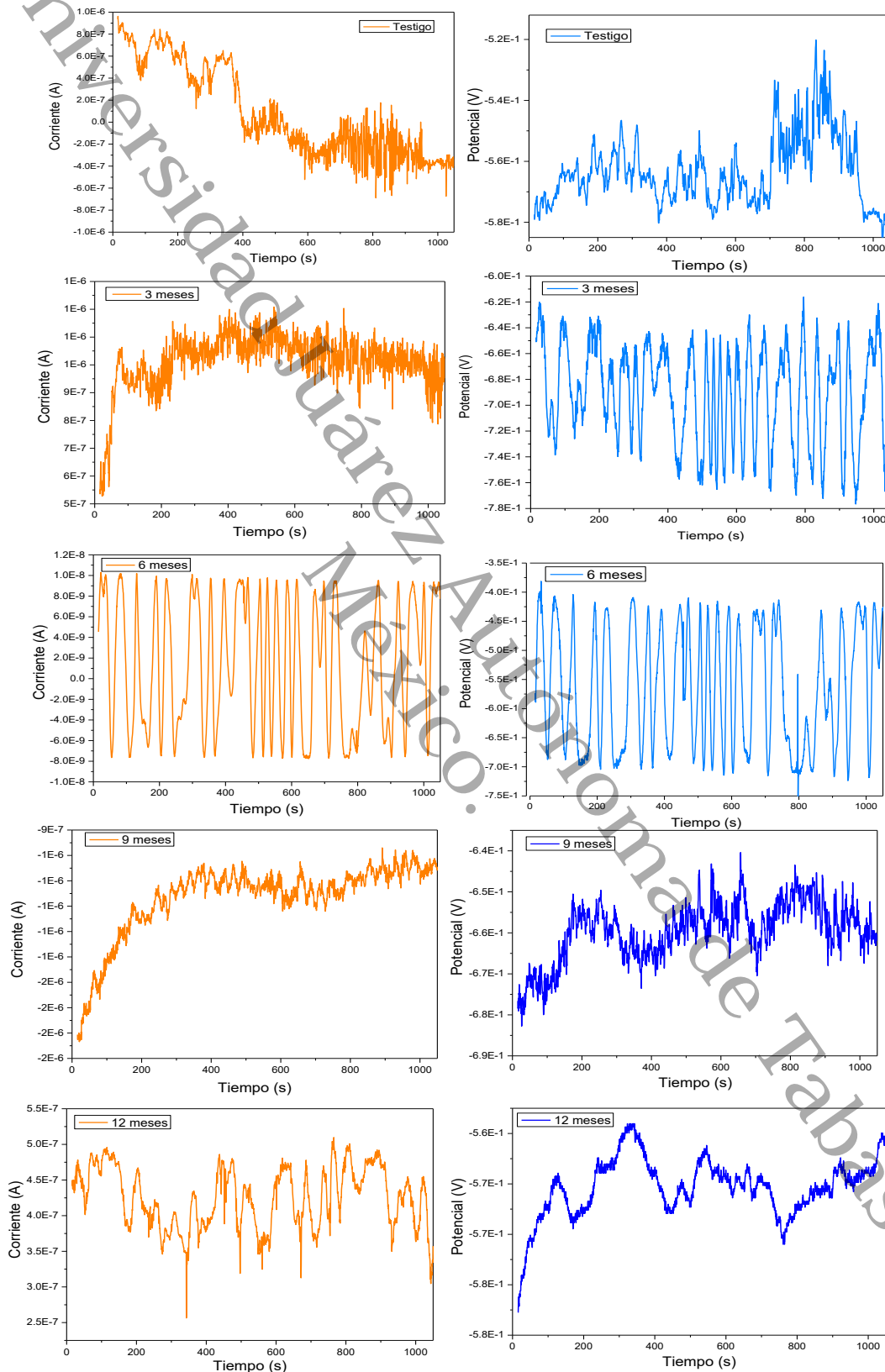


Figura 56. Espectros de potencial y corriente para el acero al carbono

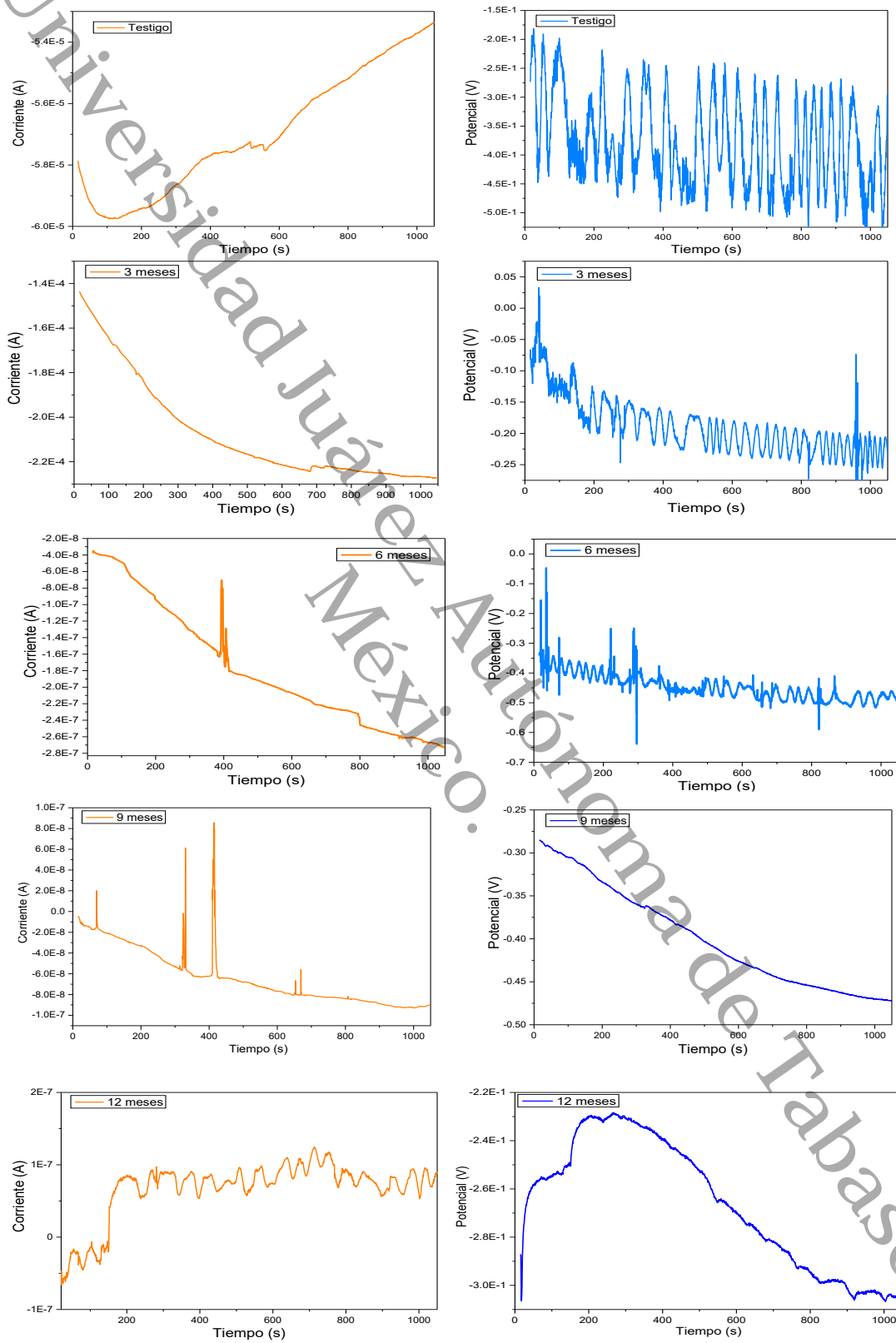


Figura 57. Espectros de potencial y corriente para el cobre

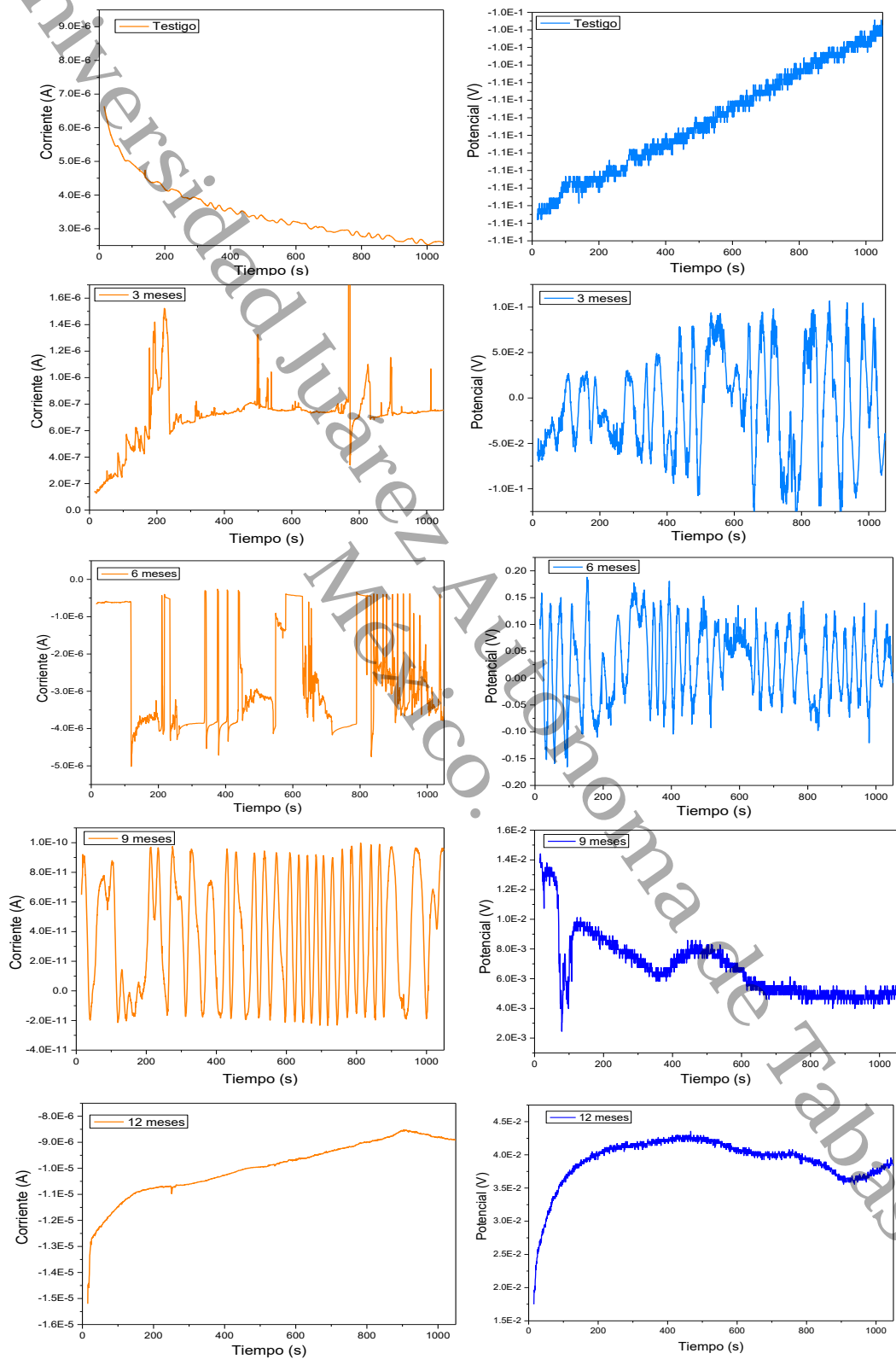
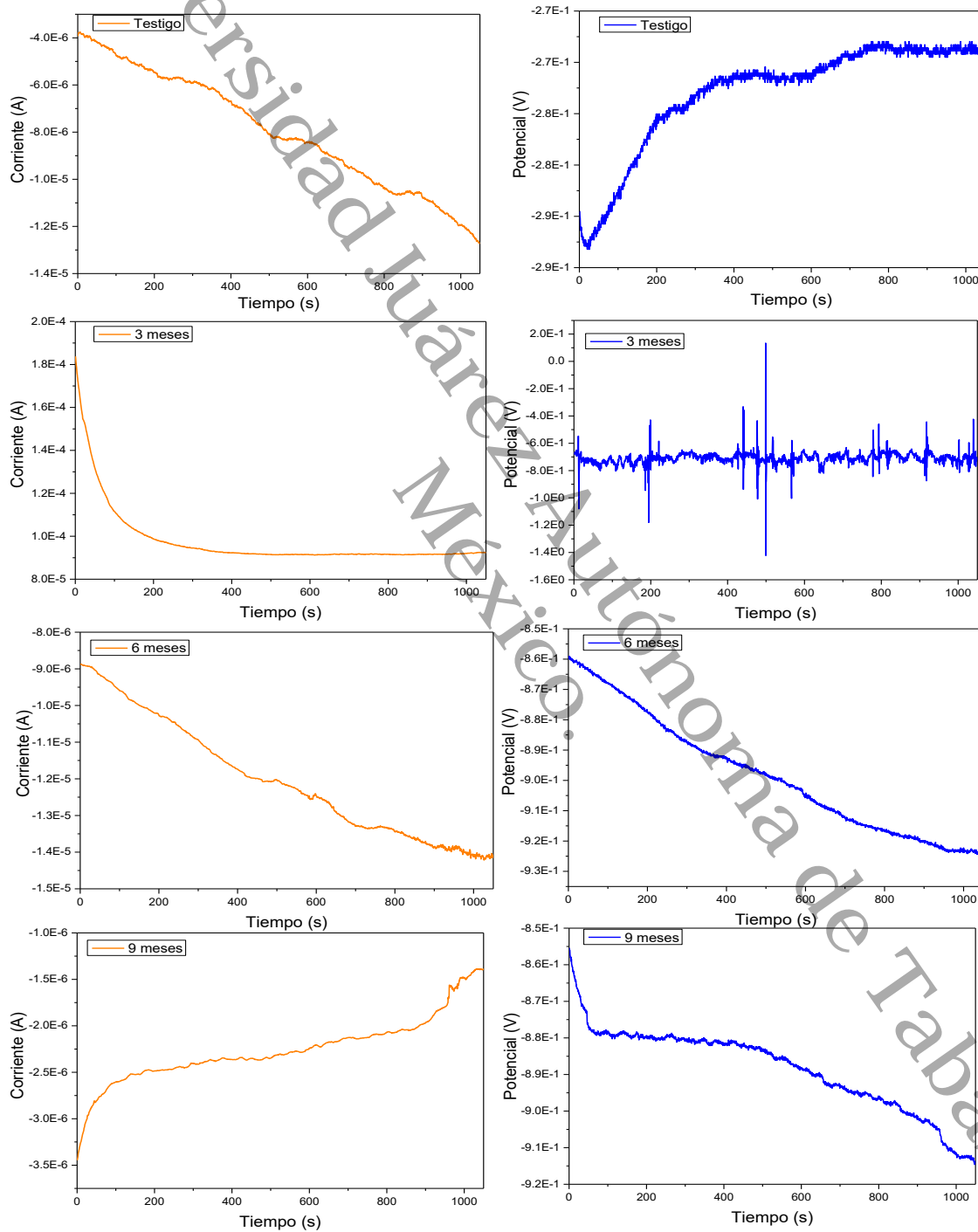


Figura 58. Espectros de potencial y corriente para el acero galvanizado



## 11. Mapeo Superficial de la distribución química de los elementos presentes en las probetas metálicas antes de ser expuestas

Figura 60. Mapeo Superficial del acero al carbón antes de ser expuesto a la atmósfera

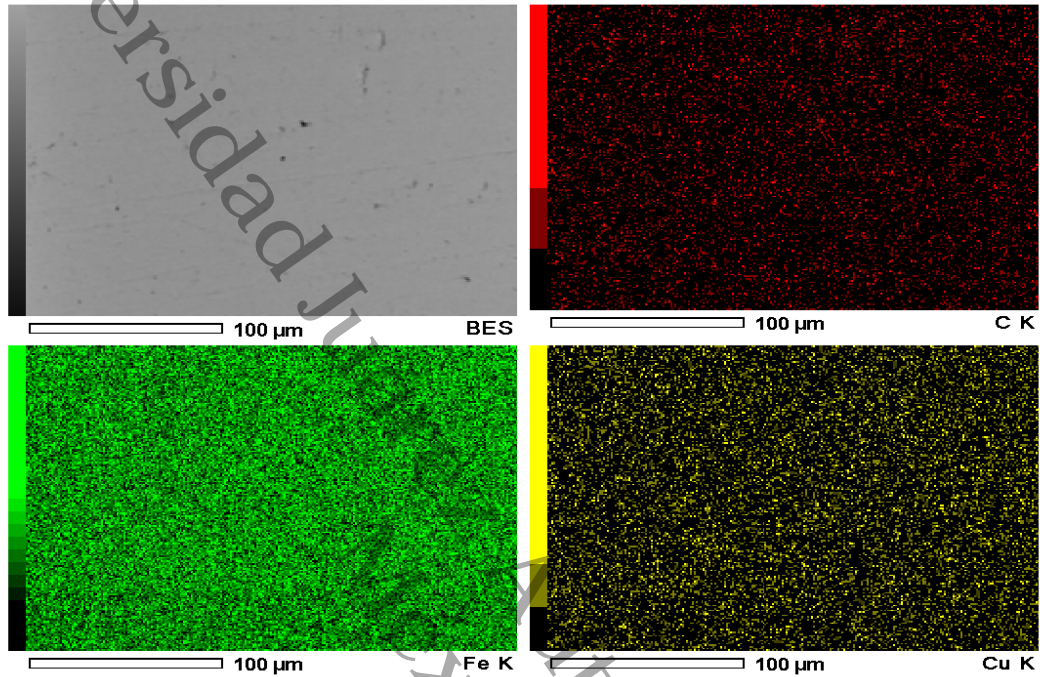


Figura 59. Mapeo Superficial del acero galvanizado antes de ser expuesto a la atmósfera

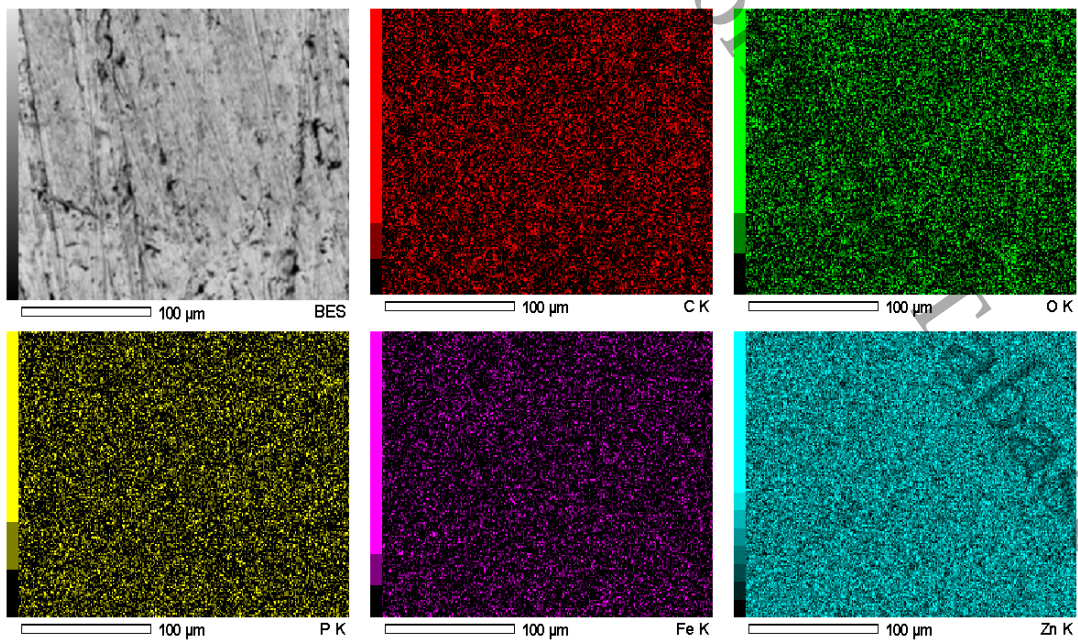


Figura 61. Mapeo Superficial del cobre antes de ser expuesto a la atmósfera

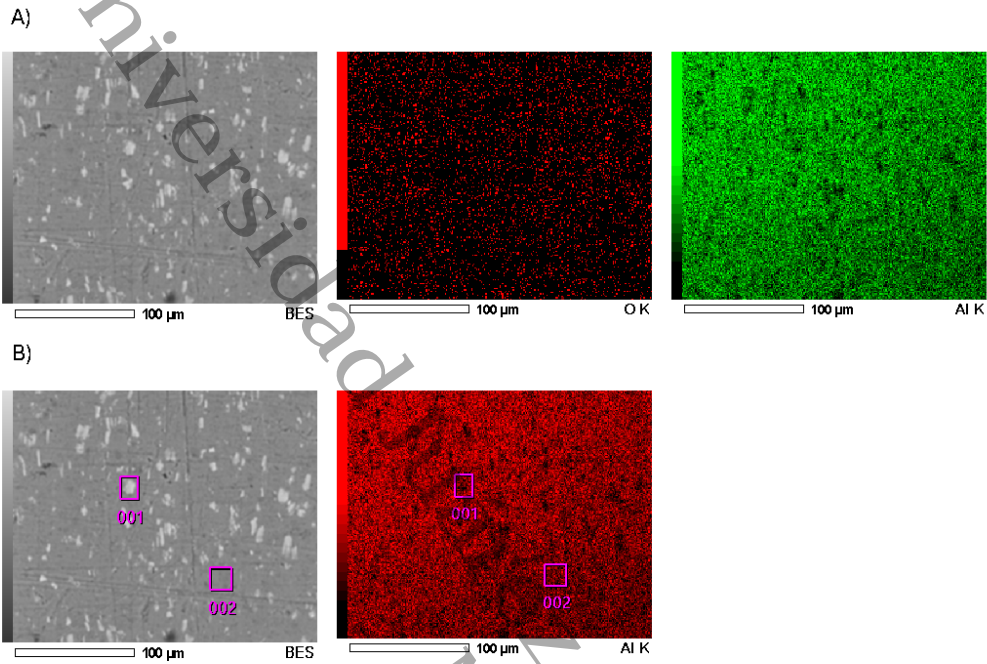


Figura 62. Mapeo Superficial del aluminio antes de ser expuesto a la atmósfera

