



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA ACCIÓN EN LA FE”

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



**“CORROSIÓN INTERIOR Y EXTERIOR DE METALES EN  
ATMÓSFERAS COSTERO-RURALES”**

**TRABAJO RECEPCIONAL BAJO LA MODALIDAD DE:**

**TESIS**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y PROTECCIÓN AMBIENTAL**

**PRESENTA:**

**ING. NANCY ELENA HERNANDEZ MORALES**

**DIRECTORA DE TESIS:**

**DRA. EBELIA DEL ANGEL MERAZ**

**CODIRECTOR DE TESIS:**

**DR. RAUL GERMAN BAUTISTA MARGULIS**

**VILLAHERMOSA, TABASCO.**

**ENERO 2016**



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN



NOVIEMBRE, 30 DE 2015

**C. NANCY ELANA HERNÁNDEZ MORALES**  
**PAS. DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y PROTECCIÓN AMBIENTAL**  
**P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Maestría en Ingeniería y Protección Ambiental titulado: **“CORROSIÓN INTERIOR Y EXTERIOR DE METALES EN ATMÓSFERAS COSTERA-RURALES”**, asesorado por Dra. Ebelia del Ángel Meraz sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado está integrado por el Dr. Arturo Valdés Manzanilla, Dr. Raúl German Bautista Margulis, Dra. Ebelia del Ángel Meraz, MIPA. Roció López Vidal y Dr. José Roberto Hernández Barajas.

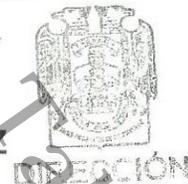
Por lo cual puede proceder a concluir con los trámites finales para fijar la fecha de examen.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE**

**M. EN C. ROSA MARTHA PADRON LOPEZ**  
**DIRECTORA**

UJAT  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



C.c.p.- Expediente del Alumno.  
C.c.p.- Archivo

## CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **“CORROSIÓN INTERIOR Y EXTERIOR DE METALES EN ATMÓSFERAS COSTERARURALES”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad, tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 25 de Noviembre de 2015.

AUTORIZO



---

NANCY ELENA HERNÁNDEZ MORALES

## AGRADECIMIENTOS

A **DIOS** por su inmensa misericordia...

A mi esposo José Andrés por apoyarme en todo momento, Te amo.

A mis hijos Andrés y Emiliano porque aún en su corta edad entendieron mi ausencia y me dieron el aliento que tantas veces necesite.

A Doña Ofelia, Tía Canda, Ileana, María del Carmen, y Juliana, por apoyarme en sus respectivos momentos con el cuidado de mis hijos. Su cariño, amor y entrega son invaluable.

A mis abuelos paternos y mi madre con los que ya no puedo compartir este logro, pero que dejaron una huella profunda en mi corazón.

A la Dra. Ebelia del Ángel Meraz por su paciencia, su valioso tiempo, su sabiduría y su amistad. Sin su guía este trabajo no hubiese sido posible.

A todos los profesores del posgrado de MIPA, que me apoyaron en mi formación profesional., Al Dr. Raúl Germán Bautista Margulís y el Dr. Arturo Váldez Manzanilla por ser parte del comité tutorial.

**Gracias...**

## RESUMEN

El clima tropical-húmedo del estado de Tabasco es propicio para que los niveles de corrosividad se encuentren en los máximos establecidos en ISO 9223, sin embargo esta agresividad aumenta por el efecto del dióxido de azufre y los iones cloruros en la película acuosa formada en los materiales. Bajo estas condiciones las pérdidas de material son significativas y se requieren tomar adecuadas medidas de prevención. En este trabajo se presentan los resultados de la influencia de contaminantes  $\text{SO}_2$ , Cl<sup>-</sup> y parámetros ambientales de temperatura y humedad relativa, sobre la velocidad de corrosión del acero al carbono 1036 y aluminio comercial en atmósferas costeras y rurales del estado de Tabasco. Los sitios de ensayo seleccionados fueron la atmósfera rural de Parrilla, Centro y la atmósfera costera de Miramar, Centla. El periodo del ensayo fue de diciembre 2012 a diciembre 2013. Se determinó el Complejo Temperatura-Humedad Relativa utilizando los datos de las estaciones de monitoreo de la CONAGUA. El Tiempo de Humectación (TOW) para las zonas de monitoreo fue de 5098 horas para la atmósfera Rural y 5122 horas para la atmósfera Costera. Los resultados de velocidad de corrosión indicaron que el aluminio comercial expuesto en la atmósfera costera de Miramar, Centla tiene una categoría de  $C_x$ , considerada como extremadamente agresiva. Para la atmósfera rural de Parrilla, Centro se obtuvo categoría  $C_5$ . Las placas expuestas de acero al carbono 1036 indicaron que la categoría en ambientes exteriores fue de  $C_x$  considerada como extremadamente agresiva. Las placas dentro de las cabinas de simulación (interiores) obtuvieron categoría máxima de  $C_5$  considerada como muy alta. Las pérdidas de masa en relación al TOW presentan una tendencia lineal. Los análisis de microscopía electrónica de barrido realizados a las placas antes y después de su exposición demuestran presencia de cloro, azufre y oxígeno. Así como formación de capas de óxido, grietas y ampollas en la superficie del metal.

## INDICE

## PÁGINA

Agradecimientos	
Resumen	
índice	
Lista de Tablas	
Lista de Figuras	
Introducción	i
Justificación	iii
Antecedentes	iv
Hipótesis	ix
Objetivo general	x
Objetivos específicos	x

## CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Fundamentos de corrosión	1
1.1.1 Corrosión electroquímica	2
1.1.2 Oxidación y Reducción	4
1.1.3 Potenciales estándar de óxido-reducción	5

1.1.4	Diagrama de Pourbaix	6
1.2	Corrosión de materiales metálicos	7
1.3	Corrosión atmosférica	8
1.3.1	Tipos de atmósferas	11
1.4	Diseño de racks y cabinas de simulación para exposición de probetas de corrosividad atmosférica	12
1.5	Contaminantes atmosféricos	13
1.5.1	Influencia del NaCl en el deterioro de metales	14
1.5.2	Influencia del SO <sub>2</sub> en el deterioro de metales	16
1.6	Factores meteorológicos	17
1.7	Climatología del estado de Tabasco	19
1.8	Microscopia electrónica de barrido (SEM)	20

## **CAPÍTULO II. METODOLOGÍA**

2.1	Procedimiento experimental	21
2.2	Selección del sitio de monitoreo	22
2.3	Preparación de bastidores, cabinas de simulación y captadores de contaminantes	23
2.3.1	Preparación de Bastidores	24
2.3.2	Preparación de cabinas de simulación	25

2.3.3 Preparación de placas	25
2.3.4 Preparación de captadores de contaminantes	27
2.4 Instalación de placas y captadores de contaminantes en sitios de monitoreo	28
2.5 Recolección, limpieza de placas y análisis de captadores de contaminantes	30
2.5.1 Limpieza química de metales	30
2.5.2 Análisis químico de los platos de sulfatación	32
2.5.3 Determinación de cloruros	32
2.6 Microscopia electrónica de barrido (SEM)	33

### **CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

3.1 Contaminantes atmosféricos	34
3.1.1 Concentración de iones cloruros en atmósfera interior y exterior de las estaciones de monitoreo	35
3.1.2 Concentración de dióxido de azufre en atmósfera interior y exterior de las estaciones de monitoreo	37
3.2 Análisis de temperatura y humedad relativa	41
3.2.1 Determinación del tiempo de humectación (TOW)	42
3.3 Caracterización de la velocidad de corrosión	45

3.3.1 Velocidad de corrosión del acero al carbono 1036 en atmósfera rural y costera	45
3.3.2 Velocidad de corrosión del aluminio comercial en atmósfera rural y costera	46
3.4 Complejo temperatura-humedad relativa sobre la velocidad de corrosión	47
3.5 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	52
3.5.1 Análisis SEM para probetas de acero al carbono 1036 en atmósfera costera	53
3.5.2 Análisis SEM para probetas de acero al carbono 1036 en atmósfera rural	55
3.5.3 Análisis SEM para probetas de aluminio comercial en atmósfera costera	57
3.5.4 Análisis SEM para probetas de aluminio comercial en atmósfera rural	59
Conclusiones	62
Referencias Bibliográficas	64
Anexos	69

#### **Lista de Tablas**

<b>1</b>	Periodos de exposición	30
<b>2</b>	Categorías de contaminantes de acuerdo a la norma ISO 9223	40
<b>3</b>	Velocidades de corrosión para el acero al carbono 1036 de acuerdo a la Norma ISO 9223:2012	46
<b>4</b>	Velocidades de corrosión para el aluminio comercial de acuerdo a la Norma ISO 9223:2012	47
<b>5</b>	Temperaturas obtenidas de las estaciones de monitoreo de la CONAGUA	73

6	Humedad Relativa obtenidas de las estaciones de monitoreo de la CONAGUA	73
7	Categorías de acuerdo a ISO 9223 del contaminante SO <sub>2</sub> y NaCl	75
8	Categorías de acuerdo a ISO 9223 de la velocidad de corrosión de acuerdo al tipo de material expuesto	75
9	Sustancias químicas propuestas por ISO 8407, para realizar la limpieza química de los materiales	76

### Lista de Figuras

1	Reacción electroquímica	3
2	Potenciales estándar de metales	6
3	Diagrama de Pourbaix del hierro	7
4	Comportamiento del proceso de corrosión en materiales metálicos	8
5	Formación de productos de corrosión	10
6	Racks para ensayos exteriores	13
7	Cabinas de simulación para ensayos interiores	13
8	Formación de aerosoles marinos	15
9	Ciclo del azufre	17
10	Diagrama de las etapas realizadas durante el proyecto	21
11	Atmósfera Rural de Parrilla, Centro	22
12	Atmósfera Costera de Miramar, Centla	23
13	Atmósfera Costera de Miramar, Centla	24
14	Cabinas de simulación para exposición de probetas en ambientes interiores	25
15	Dimensiones de las placas preparadas para exposición	26
16	Secuencia de preparación de captadores de SO <sub>2</sub>	27
17	Secuencia de preparación de captadores de Cl <sup>-</sup>	28
18	Secuencia de instalación en exterior	29
19	Secuencia de instalación en interior	29

<b>20</b>	Secuencia de limpieza química realizada para el acero al carbono 1036 y aluminio comercial	31
<b>21</b>	Determinación de SO <sub>2</sub>	32
<b>22</b>	Análisis de Cl <sup>-</sup>	33
<b>23</b>	Velocidad de deposición de Cl <sup>-</sup> (mg/m <sup>2</sup> *día) en la estación de Parrilla, Centro (2012-2013)	36
<b>24</b>	Velocidad de deposición de Cl <sup>-</sup> (mg/m <sup>2</sup> *día) en la estación de Miramar, Centla	37
<b>25</b>	Velocidad de deposición de SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> *día) en las estaciones de monitoreo (2012-2013)	38
<b>26</b>	Velocidad de deposición de SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> *día) en las estaciones de monitoreo (2012-2013)	40
<b>27</b>	Comportamiento de los valores mensuales de la temperatura y humedad relativa del aire en las estaciones de Parrilla (a) y Miramar (b), durante el periodo de la investigación	42
<b>28</b>	Tiempos de humectación en horas (TOW), para el ambiente rural de Parrilla, Centro (a), y para el ambiente costero de Miramar, Centla (b)	44
<b>29</b>	Pérdida de masa en relación al TOW para el acero al carbono 1036 en atmósfera costera de Miramar, Centla	48
<b>30</b>	Pérdida de masa en relación al TOW para el acero al carbono 1036 en atmósfera rural de Parrilla, Centro	49
<b>31</b>	Pérdida de masa en relación al TOW para el aluminio comercial en atmósfera rural de Parrilla, Centro	50
<b>32</b>	Pérdida de masa en relación al TOW para el aluminio comercial en atmósfera costera de Miramar, Centla	51
<b>33</b>	Micrografía y análisis de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) de la muestra testigo de acero al carbono 1036	52
<b>34</b>	Micrografía y análisis de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) de la muestra testigo de aluminio comercial	53
<b>35</b>	Micrografía y análisis de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente exterior de Miramar, Centla	54

<b>36</b>	Micrografía y análisis de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente interior de Miramar, Centla	55
<b>37</b>	Micrografía y análisis de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente exterior de Parrilla, Centro	56
<b>38</b>	Micrografía y análisis de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente interior de Parrilla, Centro	57
<b>39</b>	Micrografía y análisis de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente exterior de Miramar, Centla	58
<b>40</b>	Micrografía y análisis de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente interior de Miramar, Centla	59
<b>41</b>	Micrografía y análisis de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente exterior de Parrilla, centro	60
<b>42</b>	Micrografía y análisis de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente interior de Parrilla, Centro	61
<b>43</b>	Comportamiento de la pérdida de masa, durante la limpieza química de las placas en el primer periodo de evaluación	67
<b>44</b>	Comportamiento de la pérdida de masa, durante la limpieza química de las placas en el segundo periodo de evaluación	68
<b>45</b>	Comportamiento de la pérdida de masa, durante la limpieza química de las placas en el tercer periodo de evaluación	69
<b>46</b>	Comportamiento de la pérdida de masa, durante la limpieza química de las placas en el cuarto periodo de evaluación	70
<b>47</b>	Comportamiento de la pérdida de masa, durante la limpieza química de las placas en el quinto periodo de evaluación	71
<b>48</b>	Comportamiento de la pérdida de masa, durante la limpieza química de las placas en el sexto periodo de evaluación	72

## INTRODUCCIÓN

La corrosividad atmosférica presenta efectos variables debido a las particularidades de cada zona geográfica. Este fenómeno es ocasionado por las altas temperaturas ambientales, la humedad y los agentes contaminantes agresivos de origen natural o antrópico del medio en el que están expuestos los materiales (Kucera y Matsson 1974 citado en Muñoz *et al.*, 2001).

Las condiciones ambientales presentes en zonas tropicales propician el acelerado deterioro de materiales metálicos; si aunado a esto consideramos la presencia de contaminantes atmosféricos producto de las actividades industriales, petroleras, agrícolas, y urbanas, la velocidad de corrosión en ambientes a la intemperie y cerrados aumenta considerablemente.

Condiciones de alta humedad conjuntamente con altas temperaturas suelen favorecer, notablemente, los procesos de deterioro de los materiales en la atmósfera. Por el contrario, a bajas temperaturas y en atmósferas secas, la corrosión metálica puede ser ignorada a efectos prácticos (Rivero *et al.*, 2007). Estudios de corrosividad atmosférica realizados en el estado de Tabasco en condiciones a la intemperie para el zinc y el acero galvanizado, revelan la agresividad de ambientes rurales, costeros y urbanos por la deposición de cloruros y sulfatos (Veleva *et al.*, 2009; Del Ángel *et al.*, 2008). Así mismo, estudios para el estado de Campeche referente a la corrosión atmosférica en ambientes cerrados, para materiales electrónicos como el estaño y níquel, determinan el impacto de contaminantes tales como cloruros, sulfatos y temperatura-humedad relativa del aire en ambientes costeros-urbanos (Veleva *et al.*, 2007).

Las mediciones de velocidades de corrosión en ambientes a la intemperie se han realizado utilizando racks de acuerdo a los procedimientos de las normas ISO 8565 y ASTM G 50 (Del Ángel *et al.*, 2008). Para mediciones de velocidades de corrosión

en ambientes interiores se han utilizado cabinas de simulación de acuerdo a lo establecido en el proyecto Tropicorr-Cyted (Álvarez *et al.*, 2005). En la industria electro-electrónica la corrosión comenzó a ser un factor relevante en años recientes por los sistemas extremadamente complejos que han sido desarrollados y el incremento en la demanda sobre su confiabilidad (Veleva *et al.*, 2007). No obstante la información que se tiene del comportamiento de la corrosión atmosférica en ambientes interiores y exteriores de metales electro-electrónicos es de investigaciones independientes, es decir, no se presentan como estudios simultáneos en alguna zona atmosférica.

Se decide realizar este estudio debido a que la mayoría de las tuberías y accesorios utilizados en la industria son de materiales metálicos como el acero al carbono 1036 y el aluminio comercial., Otra situación importante es el auge petrolero generado desde la década de los setenta, que ha permitido que en la zona de Tabasco existan cerca de 3 mil kilómetros de ductos hechos de acero y contando con accesorios de aluminio. Estos ductos se encuentran ubicados en los municipios de Teapa, Centro, Centla, Macuspana, Cárdenas, Comalcalco, Cunduacán, Paraíso, y Nacajuca, principalmente. Razón por la cual se seleccionaron como sitios de ensayo la zona rural de la comunidad de Parrilla II perteneciente al municipio de Centro; y la zona costera de Miramar perteneciente al municipio de Centla. En ambas zonas de ensayo no se reportan resultados de la corrosividad atmosférica de materiales como aluminio y acero 1036, por lo cual estos estudios pueden aportar información que permitan mejorar las condiciones de las instalaciones. Aunado a esto el aluminio es un material electro-electrónico de uso industrial y doméstico.

En este contexto la comparación de la corrosividad atmosférica del aluminio y acero al carbono 1036 expuestos a la intemperie y ambientes cerrados en dos sitios de exposición de atmósferas costero-rurales, durante un periodo de 12 meses desde Diciembre del 2012 hasta Diciembre del 2013, permitirá la obtención de datos que contribuyan a la categorización de la agresividad de estas atmósferas del estado de Tabasco, coadyuvando en la selección de metales utilizados en la industria.

## JUSTIFICACIÓN

Altas velocidades de corrosión son reportadas en atmósferas costeras de todo el mundo, pero particularmente en condiciones tropicales y subtropicales. Los niveles de corrosividad reportados se encuentran dentro de los máximos establecidos en la norma ISO 9223. En estas condiciones las pérdidas de material son significativas y deben tomarse medidas adecuadas de prevención. Los climas tropicales y subtropicales son típicos de la línea ecuatorial y están caracterizados por tener temperaturas y humedad relativa elevadas con precipitaciones durante gran parte del año (Corvo *et al.*, 2007).

Se ha demostrado que la humedad relativa (HR) ejerce un papel decisivo en la corrosión atmosférica, sin embargo, para que la velocidad de corrosión en cualquier metal sea realmente importante la atmósfera debe estar contaminada. Dos sustancias químicas que estimulan grandemente la corrosión son el cloruro sódico y el dióxido de azufre; las primeras incorporadas a la atmósfera desde el mar, y las segundas por humos industriales, residenciales y los originados con la quema de combustibles que contienen azufre (Rivero *et al.*, 2007).

Los contaminantes atmosféricos aceleran la corrosión a través de su acción sobre la conductividad eléctrica del proceso catódico y anódico (Flores *et al.*, 2003).

Las características atmosféricas de la región y el aumento de la actividad petrolera, hace necesario evaluar la corrosividad atmosférica en ambientes interiores y exteriores de materiales metales.

La información obtenida de atmósferas costeras y rurales en ambientes interiores y exteriores del estado de Tabasco, ambas con creciente actividad petrolera, permitirá cuantificar los contaminantes y las posibles causas que están generando el deterioro de metales como el aluminio y acero 1036 altamente empleados.

Así mismo se categorizará el nivel de agresividad de la corrosión atmosférica de estos metales de acuerdo a la norma ISO 9223. Otro de los beneficios permitirá aportaciones a los avances en la industria, para la selección de metales que permitan soportar condiciones atmosféricas como las que se encontrarán en esta investigación.

## ANTECEDENTES

La corrosión atmosférica es un fenómeno tan cotidiano como potencialmente destructivo, consumidor de recursos y tiempo. Es un laberinto de gran complejidad, esquiva a las generalizaciones y modelos. Esto, se debe, entre otras cosas, a la inestabilidad de las diferentes atmósferas, que cambian continuamente en el tiempo y el espacio, sujetas a una gran cantidad de variables. Otro factor que pesa bastante es que la corrosión atmosférica involucra procesos químicos, electroquímicos y físicos en tres estados de la materia (sólido, líquido y gaseoso) y dos interfaces (sólido/agua y agua/atmósfera) (Castaño *et al.*, 2007).

En los últimos años se han incrementado los estudios relacionados a la corrosividad atmosférica de diversos materiales ferrosos y no ferrosos, esto en gran medida, por la creciente industrialización en las que se han visto involucrados países de todo el mundo, principalmente los europeos; y los efectos agresivos que causan a estructuras metálicas, de los cuales se reportan importantes pérdidas económicas.

Tidblad (2012) realizó estudios de la predicción atmosférica de metales en Europa del 2010-2039 y del 2070-2099 en donde consideró que debido a las condiciones del cambio climático el futuro de la corrosión atmosférica de metales en Europa estará dominado por los efectos de la deposición de iones cloruro en áreas costeras y cercanas a la costa, este efecto será mayor si se considera el aumento de las temperaturas.

Investigaciones realizadas en ciudades con ambientes tropicales-húmedos reflejan mayor agresividad a los metales, principalmente por el efecto de contaminantes de iones cloruros y dióxido de azufre, así como la humedad relativa. Por lo que se considera que los iones cloruro presentes en el aerosol marino son los principales responsables de la magnitud de la corrosión atmosférica. Así mismo la corrosión atmosférica es mayor cuando la concentración de dióxido de azufre en la atmósfera es más elevada y la mayor deposición de compuestos de azufre corresponde a estaciones costeras e industriales (Echeverría *et al.*, 2008).

De acuerdo a estudios realizados por Corvo *et al.* (2007) ciudades costeras tropicales de la Península de Yucatán y Cuba, los rangos de corrosividad se encuentran en C<sub>3</sub> y C<sub>5</sub> con base a lo establecido en ISO 9223, sin embargo este valor depende de la dirección de los vientos, ya que en algunos sitios de monitoreo la corrosividad fue baja; en tanto que los valores más altos para estas mismas zonas son reportados en sitios con distancias menores a 150 m de la Costa.

Del Ángel *et al.* (2010) realizaron estudios de mediciones de velocidad de corrosión de placas de acero galvanizado expuestas durante 7 meses a la intemperie, en un ambiente con clima tropical húmedo del municipio de Cunduacán, Tabasco; los resultados presentados revelan una categoría de agresividad C<sub>3</sub> (media), según ISO 9223. Así mismo al realizar la medición de las velocidades de deposición de acuerdo con la norma ISO 9225, el contaminante dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), presentó categoría de agresividad corrosiva baja (Po) y el cloruro de sodio (NaCl), de categoría baja (S1).

Otro estudio realizado por un periodo de dos años en atmósferas Rurales y Urbanas de Cunduacán y Villahermosa, Tabasco para el zinc, indican que este metal presenta mayor resistencia a la agresividad de iones cloruro y es más sensible en presencia de dióxido de azufre (Veleza *et al.*, 2009).

Son amplios y detallados los estudios realizados en diversas ciudades del mundo, referente al comportamiento de los materiales al ser expuestos a condiciones a la intemperie. Sin embargo para condiciones en ambientes interiores la información disponible indica que los contaminantes actúan originando un proceso corrosivo significativo en estos.

Castaño *et al.* (2007) revisaron los resultados de investigaciones sobre el comportamiento de la corrosividad atmosférica del zinc en ambientes interiores y a la intemperie, logrando encontrar que debido a la complejidad del proceso corrosivo no es posible establecer mecanismos y modelos predictivos de comportamiento porque existen vacíos en el conocimiento en cuanto al papel sinérgico o antagónico de varios de los contaminantes que pueden tener incidencia en el fenómeno.

Para estudiar la corrosividad atmosférica en ambientes interiores del clima tropical húmedo marino-urbano del Golfo de México, Veleza *et al.* (2007) construyeron una cabina de simulación con medidas de 66x 32x 71 cm de lámina galvanizada y pintada con recubrimiento anticorrosivo, donde fueron adaptados medidores de temperatura y humedad relativa que registraron los valores durante el periodo de exposición. Dentro de ésta se colocaron probetas de estaño y níquel durante 12 meses. Los resultados encontrados determinaron que la agresividad de la caseta fue altamente corrosiva, basándose en el registro de velocidad de deposición de cloruros y dióxido de azufre, y temperatura-humedad relativa del aire. Así mismo se encontró que el incremento de masa anual del níquel es, aproximadamente, dos veces mayor que el valor de su pérdida de masa.

Corvo *et al.* (2008) realizaron una clasificación de la agresividad corrosiva interior en almacenes y armarios metálicos para el acero, encontrando esta entre los mayores niveles establecidos en ISO 11844. El grado de agresividad corrosiva en los almacenes estudiados fue siempre menor que en los armarios.

Los niveles de contaminación atmosférica en todo el mundo han aumentado considerablemente, estos efectos no solo han dañado estructuras metálicas sino que hoy en día se reportan investigaciones en metales utilizados en la industria electro-electrónica.

Álvarez *et al.* (2005) estudiaron la corrosión de diferentes materiales metálicos utilizados en la industria electro-electrónica en ambientes tropicales, tanto en condiciones a la intemperie, como ambientes interiores en el volcán Poas, Costa Rica. Los materiales expuestos fueron cobre, acero, níquel y estaño, utilizando la metodología establecida en ISO 85653 para las probetas expuestas en paneles y el procedimiento establecido en el proyecto iberoamericano Tropicorr-Cyted, haciendo uso de casetas, para las probetas en interiores. Los resultados obtenidos indican que en ambos ambientes la velocidad de corrosión es de C5, siendo la más alta en la categoría de la norma ISO 9223.

Flores *et al.* (2003) determinaron que los problemas de corrosión en componentes y equipos electrónicos en la industria electrónica de Mexicali, son ocasionados por la interacción de los factores climáticos y ambientales con los componentes electrónicos presentes en el interior de las plantas industriales. Para realizar el estudio se diseñó y construyó una cabina siguiendo los lineamientos establecidos en el proyecto Tropicorr-Cyted, que permitiera simular las condiciones del interior de la planta y monitorear el comportamiento de metales utilizados en la fabricación de componentes electrónicos, tales como, plata, cobre, acero al carbono, estaño y níquel. Las dimensiones de la cabina que fue construida de aluminio de 1/8 de pulgada fueron 650 mm x 450 mm x 1050 mm. El diseño del sistema fue en base a lo consultado en las normas de la European Telecommunication Standard ETS300 019-1-0, 1-3.

Las investigaciones realizadas hasta la fecha de la corrosividad atmosférica de los metales van acompañadas de captadores de contaminantes entre los que destacan iones cloruro y dióxido de azufre principalmente. Así mismo el tiempo de

humectación y la temperatura son parámetros que inciden en el proceso corrosivo y que se han considerado para estos efectos.

El cloruro sódico se incorpora a la atmósfera desde el mar, siendo sus efectos muy acusados cerca de la orilla, donde el aire transporta grandes cantidades de sal, pudiéndose llegar a producir una continua pulverización de agua. El dióxido de azufre se encuentra en las atmósferas que están impurificadas por humos industriales y residenciales y se origina al quemar combustibles que contienen azufre. Estas dos sustancias químicas estimulan grandemente la corrosión de las superficies metálicas humedecidas, ya que aumentan la actividad de la película acuosa. Así, la corrosión atmosférica en puntos cercanos a la orilla del mar puede exceder considerablemente a lo previsible en el caso de una atmósfera pura. Igual sucede en los complejos industriales, grandes urbes (atmósferas contaminadas por  $\text{SO}_2$ ), en cuyos entornos los procesos corrosivos se aceleran notablemente (Rivero *et al.*, 2007).

Echeverría *et al.* (2009) mencionan que existen varios métodos para medir la velocidad de deposición de iones cloruro y compuestos de azufre. Sin embargo el más utilizado probablemente por su fácil operación para medir la salinidad, es el establecido en la norma ISO 9225 conocido como método de la vela húmeda (iones cloruro) y platos de sulfatación ( $\text{SO}_2$ ).

Rivero *et al.* (2007) mencionan que se ha demostrado que la humedad relativa (HR) ejerce un papel decisivo en la corrosión atmosférica. Por debajo de un determinado nivel de HR la corrosión es insignificante, pues no existe película apreciable de electrolito sobre el metal. Generalmente, la corrosión del hierro y otros metales es despreciable a humedades relativas por debajo del 60-80%, dependiendo del metal. Aun cuando la HR exceda de este nivel, para que la velocidad de corrosión sea realmente importante, la atmósfera debe estar, además, contaminada.

Del Ángel *et al.* (2009) estudiaron la temperatura y los tiempos de humectación en atmósferas de Paraíso y Villahermosa, Tabasco. El tiempo de humectación, calculado a base del CT-HR, revela que su valor anual en el ambiente marino-costero de Paraíso ha sido de 7470 a 8391 horas durante el período de estos años, por lo que se puede asignar a su atmósfera la categoría de agresividad C<sub>5</sub> (“muy agresiva”), de acuerdo a la norma ISO 9223. Sin embargo, el ambiente urbano de Villahermosa es menos agresivo, con categoría C<sub>4</sub>, ya que el tiempo anual de humectación está en el rango de 4603 - 5741 horas.

El tiempo de humectación está considerado como el tiempo real (efectivo) para los procesos de corrosión de metales, ya que estos se desarrollan solamente en la presencia de una capa húmeda, formada en la superficie metálica. Por lo tanto, debe esperarse que el deterioro de estructuras metálicas sea mucho mayor en el ambiente marino. Además, la presencia de salinidad (iones cloruro) en las atmósferas marinas, acelera más el proceso de corrosión.

## **HIPOTESIS GENERAL**

El grado de deterioro de los materiales metálicos aumentará de acuerdo a las condiciones meteorológicas y la exposición de ciertos contaminantes atmosféricos como el dióxido de azufre y los iones cloruros.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Determinar el efecto de los contaminantes atmosféricos y los factores meteorológicos en el grado de deterioro de probetas de aluminio y acero 1036 de zonas costero-rurales de Tabasco, expuestas al ambiente y en interiores.

### Objetivos específicos

- Diseñar y construir el rack para la instalación de probetas de aluminio y acero 1036.
- Evaluar la categoría de corrosión del aluminio y acero expuestos a la intemperie y ambientes cerrados de atmósferas costero-rurales durante un periodo de 12 meses, con la Norma ISO 9223.
- Determinar el tiempo de humectación (TOW) en base al complejo T-HR, en cada zona de estudio para calcular las horas en las que está expuesto el metal.
- Caracterizar la superficie de las probetas utilizando el Microscopio Electrónico de Barrido.
- Correlacionar los contaminantes y factores meteorológicos para determinar las ecuaciones de predicción en cada zona de estudio.

# CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

## 1.1 Fundamentos de corrosión

La corrosión es el ataque destructivo que sufre un material, generalmente metálico, por reacción química o electroquímica con su medio ambiente. Comúnmente este término se refiere al ataque de los metales. Existen materiales no metálicos como los cerámicos y poliméricos que también pueden ser deteriorados por ataque químico directo, para cuyos casos el término adecuado es degradación. En términos económicos se estima que aproximadamente el 5% del producto interno bruto de un país industrializado, se gasta directa e indirectamente en prevenir y corregir problemas relacionados con la corrosión metálica.

La naturaleza química del entorno y la concentración efectiva de las especies reactivas, determinan las reacciones que producen el fenómeno de corrosión. El efecto de la corrosión es una alteración de los materiales afectados. Dicha situación hace necesario proteger a los materiales con la finalidad de alargar su vida útil. Así mismo se requiere obtener información a través de diversos ensayos que permitan conocer las características del proceso.

En los materiales metálicos el proceso de corrosión es normalmente electroquímico, es decir una reacción química en la cual hay una transferencia de electrones de una especie a otra (Hijes y Lorente, 2004).

### 1.1.1 Corrosión electroquímica

La mayoría de los metales se encuentran en estado natural formando minerales como: óxidos, carbonatos, sulfuros, entre otros. El proceso de extracción de los metales en estado puro se realiza a través de minerales, requiriéndose gran aporte de energía para su obtención. Esta situación genera la tendencia de los metales de volver a su estado natural de óxido metálico, la cual varía de acuerdo a la cantidad de energía que se requirió para su transformación.

La energía de un determinado sistema puede medirse en términos de lo que se llama energía libre de Gibbs (G). De acuerdo a Mariaca y Genescá (1999) Se pueden presentar 3 casos:

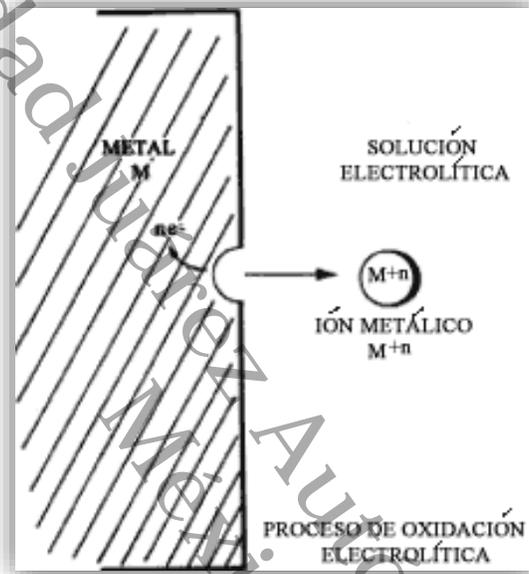
- El cambio positivo de energía libre ( $\Delta G$ ), el metal es activo y puede haber corrosión.
- Si el cambio de  $\Delta G > 0$ , el metal en lugar de presentar corrosión, permanece aparentemente sin ser atacado. Se dice que el metal está pasivado.
- El cambio negativo de energía libre ( $\Delta G$ ), el metal es indiferente a los agentes agresivos habituales, no siendo posible ninguna reacción de corrosión. Es el caso de los metales nobles.

Ante tal situación, se entiende por corrosión la reacción de un metal o aleación con ambientes reactivos, teniendo como consecuencia el deterioro o destrucción del material., Esta situación genera que los metales pierdan su estado elemental y regresen a su estado combinado de origen (óxidos, sulfuros, etc.).

Una reacción de corrosión es del tipo electroquímica y puede expresarse parcialmente por la ionización de un metal., Un átomo metálico pierde electrones y queda cargado con un exceso de cargas positivas, proporcionales a las cargas negativas de los electrones que se pierden. De tal manera que:



Donde M es un metal de valencia n,  $M^{n+}$  su forma iónica y en el número de electrones (Figura 1). Una reacción electroquímica está compuesta de reacciones de oxidación y reducción simultáneas involucrando especies eléctricas en un medio electrolito en equilibrio termodinámico. La corrosión es un proceso espontáneo irreversible de reacciones electroquímicas (Mariaca y Genescá, 1999).



**Figura 1.** Reacción electroquímica.

La corrosión electroquímica, es la forma más común del ataque de los metales. Conforme se consume gradualmente el metal, se forma un subproducto de este proceso. La corrosión electroquímica ocurre con mayor frecuencia en un medio acuoso, donde estén presentes iones en el agua o en el aire húmedo. En este proceso se crea un circuito eléctrico y el sistema se conoce como una celda electroquímica. Los principales componentes de una celda electroquímica son cuatro:

- El ánodo que cede los electrones al circuito y se corroe.
- El cátodo que recibe los electrones del circuito mediante una reacción química o catódica. Los iones al combinarse con los electrones producen en el cátodo un subproducto.

- El ánodo y el cátodo deben estar conectados eléctricamente, para permitir el flujo de electrones del ánodo al cátodo y que la reacción continúe.
- Electrólito líquido en contacto con el ánodo y el cátodo. Es un conductor que cierra el circuito eléctrico, y permite la transferencia de electrones del ánodo al cátodo.

### 1.1.2 Oxidación y Reducción

Los términos oxidación y reducción se refieren a fenómenos directamente relacionados con el equilibrio eléctrico en los átomos, ya sea en los elementos puros o en el seno de una molécula independientemente de su estructura. La oxidación es un fenómeno fisicoquímico en el que se manifiesta una pérdida de electrones por parte de alguna o algunas de las sustancias involucradas. La reducción es el fenómeno donde existe una captación o aceptación de electrones. Ambos fenómenos son simultáneos para que exista equilibrio.

Por ejemplo, si se introduce un trozo de alambre de Cu limpio en una solución de  $\text{AgNO}_3$ , inmediatamente se realizan y se observan ambos fenómenos. La solución se comienza a colorear de azul como consecuencia de la oxidación del cobre (pérdida de electrones).



En tanto que la plata se reduce en la superficie del cobre, donde los iones plata reciben los electrones que necesitan para su reducción (ganancia de electrones).



A cada una de las dos reacciones referidas se les denomina semi reacción. Es importante hacer notar que las reacciones de óxido-reducción no siempre se llevan

a cabo en donde el flujo de electrones se realiza en el interior del sistema, sino que en muchas ocasiones los electrones circulan por el exterior (Villarreal y Bello, 1975).

### **1.1.3 Potenciales estándar de óxido-reducción**

La concepción física de un sistema de óxido-reducción es la definición de una pila o celda. Está formada por dos electrodos o media celdas en contacto, en una hay oxidación y en la otra reducción. Externamente entre ambos electrodos se genera una diferencia de potencial denominada fuerza electromotriz (Villarreal y Bello, 1975).

A la lista de metales en equilibrio con sus propios iones junto con sus potenciales estándares se les llama serie de fuerza electromotriz (Figura 2). Constituye una clasificación de las actividades relativas de los diferentes metales y aleaciones comercial es en un medio dado, habitualmente agua de mar. Dados dos metales diferentes en un determinado medio, su serie electroquímica permite predecir cuál de ellos tendrá una actuación anódica y, por tanto sufrirá corrosión (Ávila y Genescá, 1995).

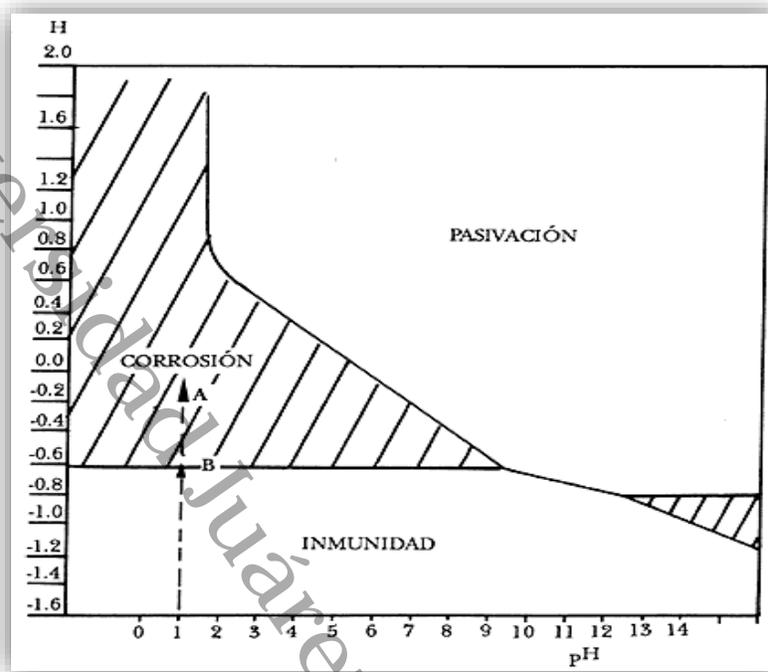
Elemento	Reacción de electrodos	Potencial de reducción E°, en volts
Li	$\text{Li}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Li}$	- 3,045
K	$\text{K}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{K}$	- 2,925
Ca	$\text{Ca}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Ca}$	- 2,870
Na	$\text{Na}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Na}$	- 2,714
Mg	$\text{Mg}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Mg}$	- 2,370
Al	$\text{Al}^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Al}$	- 1,660
Zn	$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Zn}$	- 0,763
Cr	$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Cr}$	- 0,740
Fe	$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Fe}$	- 0,440
Cd	$\text{Cd}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Cd}$	- 0,403
Ni	$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Ni}$	- 0,250
Sn	$\text{Sn}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Sn}$	- 0,140
Pb	$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Pb}$	- 0,126
H <sub>2</sub>	$2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	0,000
Cu	$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	+ 0,337
I <sub>2</sub>	$\text{I}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{I}^-$	+ 0,535
Hg	$\text{Hg}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Hg}$	+ 0,789
Ag	$\text{Ag}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Ag}$	+ 0,799
Br <sub>2</sub>	$\text{Br}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{Br}^-$	+ 1,080
Cl <sub>2</sub>	$\text{Cl}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	+ 1,360
Au	$\text{Au}^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Au}$	+ 1,500
F <sub>2</sub>	$\text{F}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{F}^-$	+ 2,870

**Figura 2.** Potenciales estándar de metales.

#### 1.1.4 Diagrama de Pourbaix

La serie de fuerza electromotriz posee severas limitaciones, debido a que no considera el efecto que tiene una película de óxido presente en la superficie de un metal, en el potencial de equilibrio de ese sistema. El investigador Belga Marcel Pourbaix realizó la representación gráfica de los equilibrios termodinámicos, como función del potencial y del pH. Delimitó zonas termodinámicamente estables.

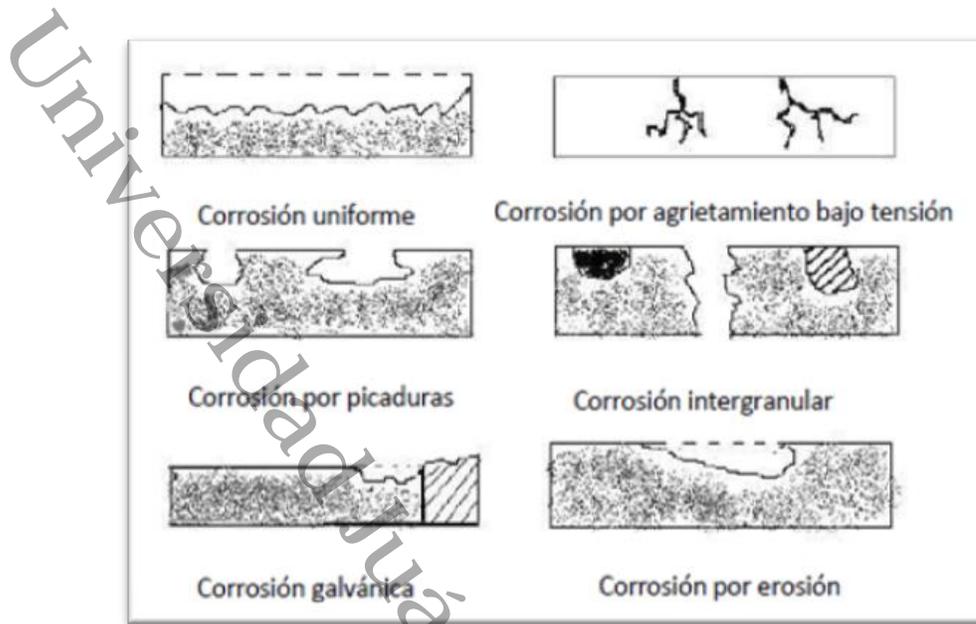
La Figura 3 muestra el diagrama de Pourbaix para el hierro en contacto con agua, clasificándose de acuerdo a su conducta corrosiva en: pasividad, corrosión e inmunidad. La zona de pasividad se aplica para cuando el metal posee películas oxidadas o de hidróxidos sobre su superficie que inhiben la corrosión. En la zona de corrosión el metal se disuelve activamente, siendo los productos de corrosión solubles. Finalmente en la zona de inmunidad el metal se encuentra perfectamente preservado y estable bajo condiciones especiales de potencial y pH.



**Figura 3.** Diagrama de Pourbaix del Hierro.

## 1.2 Corrosión de materiales metálicos

La degradación de materiales metálicos tiene efectos visibles en sus propiedades mecánicas y físicas. En ocasiones dichos cambios no son tan aparentes por lo que es posible que se generen súbitos colapsos de estructuras. La Figura 4 muestra los tipos de corrosión más comunes, generados por el medio que rodea al metal y sus aleaciones (Góngora, 2010).



**Figura 4.** Comportamiento del proceso de corrosión en materiales metálicos.

Otra clasificación del proceso de corrosión es de acuerdo a: su morfología, que puede ser uniforme, localizado, e intergranular. Por el medio atacante, que pueden ser ácidos, contaminantes aerobios y corrosión atmosférica. Por las acciones físicas, debido a tensión, fatiga, cavitación y por corrientes vagabundas. Finalmente por los mecanismos de reacción debida a una oxidación directa o corrosión electroquímica. Los metales poseen tendencias diferentes a corroerse en un medio dado. Entre más difícil sea el proceso de extracción del metal de su forma natural, mayor será la tendencia a regresar a esa forma por medio de la corrosión, pero la velocidad a la que esto ocurra dependerá del medio con el que interactúe.

### 1.3 Corrosión atmosférica

La corrosión atmosférica es un proceso de naturaleza electroquímica. El proceso de corrosión atmosférica es suma de los procesos parciales de corrosión que tienen lugar cada vez que se forma la capa de electrolito sobre el metal., El electrolito puede estar constituido por una película de humedad delgada o por una película

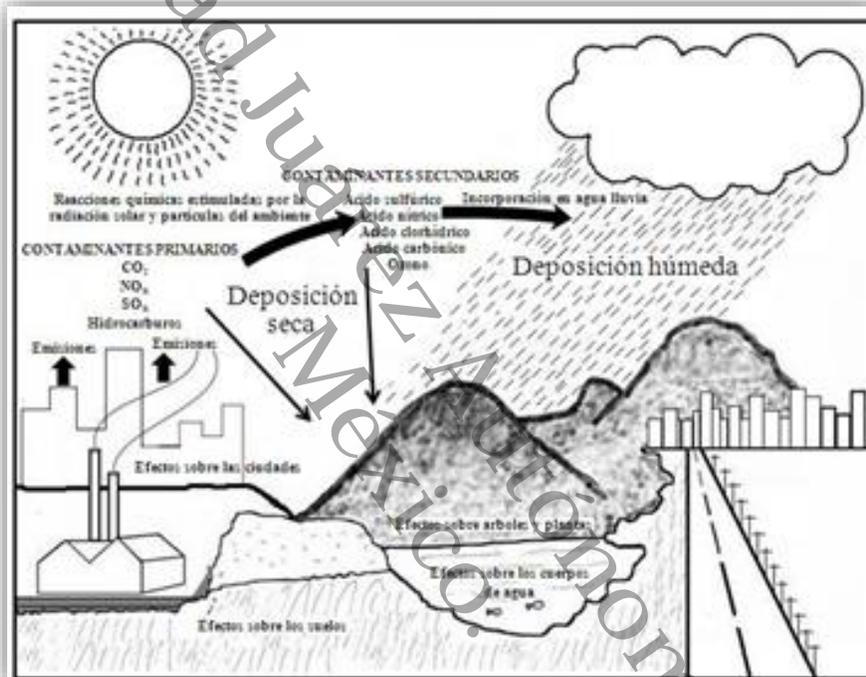
acuosa. Las precipitaciones acuosas y la condensación de humedad por cambios de temperaturas, conjuntamente con la presencia de partículas depositadas en la superficie metálica, son, sin duda los principales promotores de la corrosión en la atmósfera (Rivero *et al.*, 2007).

Se puede considerar a la corrosión atmosférica como una forma o un tipo de corrosión que resulta de la interacción de una atmósfera natural y un material expuesto en la misma. Por atmósfera natural debe entenderse tanto la exterior como la interior de lugares de abrigo. Las características físicas más importantes de una atmósfera natural son la temperatura y la humedad relativa. Por lo tanto los factores que afectan principalmente a los materiales desde el punto de vista de su exposición a la atmósfera son climáticos y químicos. Se considera que la corrosión atmosférica es ocasionada por las altas temperaturas ambientales, la humedad y los agentes contaminantes de origen natural o antrópico del medio en el que están expuestos los materiales (Muñoz y Uruchurtu, 2002).

La corrosión atmosférica puede ser clasificada en seca, húmeda y categorías muy húmedas. La corrosión seca tiene lugar en metales que tiene una energía libre negativa de la formación de óxidos. Sin embargo las de mayor interés son la húmeda y muy húmeda, debido a que están representativamente asociadas con la corrosión en presencia de películas electrolíticas microscópicas o herrumbre y capas electrolíticas visibles sobre la superficie. Las películas de humedad se crean a un cierto nivel de humedad crítica, mientras que las películas muy húmedas están asociadas con el rocío, rocío de mar, agua de lluvia y otras formas de salpicaduras de agua (Roldán, 2011).

Cuando se genera un proceso de corrosión atmosférica existe la formación de productos de corrosión. Estos productos pueden ser solubles o insolubles. Normalmente los productos de corrosión insolubles reducen el rango de corrosión aislando el sustrato del ambiente corrosivo. Con menor frecuencia ellos pueden estimular la corrosión ofreciendo protección física pequeña mientras retienen la humedad en contacto con la superficie del metal por largos periodos. Los productos solubles pueden incrementar los rangos de corrosión (Badea *et al.*, 2011).

La solubilidad de estos productos en la superficie electrolítica y la formación de películas pasivas, afectan la disolución anódica del metal., Por lo cual el ataque corrosivo atmosférico sobre una superficie protegida por una capa pasiva, tiende a ser de naturaleza localizada. La Figura 5 muestra un esquema de este fenómeno de corrosión (Roldán, 2011).



**Figura 5.** Formación de productos de corrosión.

### 1.3.1 Tipos de atmósferas

La severidad de la corrosión atmosférica depende del tipo de ambiente, que puede ser: rural, urbano, industrial, marino o combinado (Padilla, 2010).

- **Atmósfera rural:** generalmente es la menos corrosiva y normalmente no contiene contaminantes químicos, pero contiene partículas orgánicas e inorgánicas. Los principales agentes corrosivos son la humedad, oxígeno y dióxido de carbono.

- **Atmósfera urbana:** es similar a la tipo rural, en esta hay una pequeña actividad industrial que agrega contaminantes como dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, producto de las emisiones de los motores de los vehículos y aceites domésticos.
- **Atmósfera industrial:** está asociada con procesos industriales pesados que facilitan y que pueden contener dióxido de azufre, iones cloruros, fosfatos y nitratos. Sin embargo su principal característica son los compuestos de azufre, que provienen de la quema del carbón, petróleo y otros combustibles, el cual es atrapado por la humedad en las partículas de polvo como ácido sulfuroso. Éste a su vez es oxidado por un proceso catalítico en las partículas de polvo.
- **Atmósfera marina:** es altamente corrosiva, tiene la presencia de cloruros. Tiende a ser altamente corrosiva dependiendo de la dirección del viento, de la velocidad del viento y de la distancia de la costa. La cantidad de sal decrece rápidamente con la distancia del océano hacia el interior del continente. Dentro de la mezcla atmosférica se da el caso de la atmósfera marino-industrial y atmósfera marino-rural.,

La norma ISO 8565 recomienda evitar zonas en donde existan edificios, árboles, estructuras y ciertas condiciones geográficas como presencia de lagos, ríos, volcanes, que pudieran interferir en los resultados obtenidos. A menos que estas condiciones geográficas sean consideradas para los ensayos que se realizarán.

#### **1.4 Diseño de racks y cabinas de simulación para exposición de probetas de corrosividad atmosférica**

Para los ensayos en ambientes a la intemperie se deben utilizar racks. Estos mantienen las placas seguras en una posición que permita el deterioro de los materiales, sin influir por la formación de pares galvánicos que puedan afectar los

resultados. Los ángulos de inclinación que presenten deben ser de 30° a 45°, dependiendo de las condiciones de latitud de la zona geográfica (Figura 6). La Norma ASTM G50 recomienda su construcción con materiales resistentes que permanezcan intactos durante todo el periodo de exposición. Algunos de estos materiales pueden ser tubos galvanizados, aceros inoxidable y aluminio, para atmósferas marinas.

El cobre también ha sido aplicado dando resultados satisfactorios en las distintas atmósferas estudiadas. Para sujetar las placas a los racks se deben utilizar materiales aisladores que eviten la formación de pares galvánicos que influyan en los resultados. El suelo debajo de los racks debe mantenerse libre de hierbas, arbustos y escombros, por lo general se recomienda una altura del rack de 95 cm.

La Norma ISO 8565 propone el diseño de las cabinas de simulación para evaluar la corrosión en ambientes interiores, estas deben ser similares a las cabinas meteorológicas, para garantizar la protección contra la contaminación atmosférica, precipitación, radiación solar, y el viento. Estas deberán tener persianas tipo celosía para permitir el intercambio del aire del interior al exterior (Figura 7). Para la construcción de estas cabinas se recomienda utilizar los mismos materiales que recomienda la ASTM G50 para los racks. La selección de las dimensiones será de acuerdo al número de placas que se utilizan para los ensayos.

El diseño de los racks y cabinas de simulación deben garantizar la circulación libre de aire entre las placas y evitar la formación de condiciones microclimáticas. Cuando hay más de una cabina o rack en el sitio de prueba, se recomienda guardar una distancia de por lo menos dos veces la altura del rack o cabina. Pueden utilizarse materiales de madera para la construcción de los racks y cobertizos, pero es importante aplicar un esmalte adecuado y dar mantenimiento constante. Lo mismo sucede con materiales metálicos usados en condiciones extremas en donde es necesario aplicar recubrimientos que permitan garantizar la durabilidad del material.,



**Figura 6.** Racks para ensayos exteriores.



**Figura 7.** Cabinas de simulación para ensayos interiores.

### 1.5 Contaminantes atmosféricos

Los contaminantes atmosféricos son sustancias extrañas, en estado gaseoso, sólido o la combinación de ambas, en cantidades y durante un tiempo de permanencia que puede provocar efectos nocivos a la salud humana y el deterioro de los bienes de uso y del paisaje (Genescá, 1995).

El origen de los contaminantes presentes en la atmósfera se derivan de dos fuentes emisores bien diferenciados: naturales y antropogénicas. Las primeras se deben a causas de procesos naturales como la actividad volcánica, incendios forestales, y la descomposición de la materia orgánica en el suelo y en los océanos. Las antropogénicas tienen su origen en las actividades humanas, clasificándose en:

- Focos fijos: son aquellos derivados de las actividades industriales y domésticas.

- Focos móviles: son aquellos generados de vehículos, aeronaves y buques.
- Focos compuestos: los derivados de aglomeraciones industriales y áreas urbanas.

Los contaminantes atmosféricos de mayor importancia son: partículas suspendidas totales, ozono, monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno. Sin embargo el cloruro de Sodio (NaCl) y el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) son los principales contaminantes corrosivos de la atmósfera. Los iones cloruros presentes en el aerosol marino son los principales responsables de la magnitud de la corrosión atmosférica. Así mismo la corrosión atmosférica es mayor cuando la concentración de dióxido de azufre en la atmósfera es más elevada. La mayor deposición de compuestos de azufre corresponde a estaciones costeras e industriales (Echeverría *et al.*, 2009).

### **1.5.1 Influencia del NaCl en el deterioro de metales**

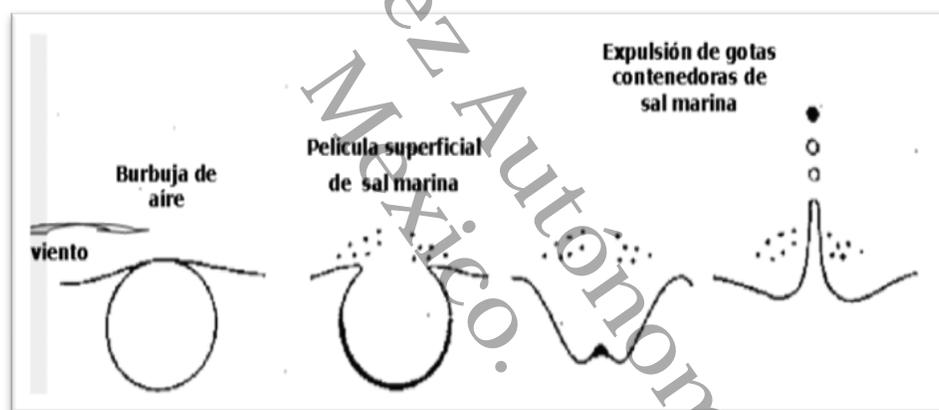
El NaCl es un contaminante natural que casi nunca se detecta en las redes de seguimiento de la calidad del aire, debido a que no se relaciona directamente con problemas de salud. Sin embargo desde el punto de vista de materiales resulta ser el principal agente involucrado en el deterioro de los metales, debido a que es un fuerte catalizador de los procesos de corrosión (Villaseñor, 2009).

El NaCl al igual que otros iones, incrementa la conductividad eléctrica del agua de forma que facilita el flujo de reacciones de corrosión. Reduce la efectividad de las películas protectoras naturales, las cuales pueden ser permeables a los iones pequeños.

El NaCl se incorpora a la atmósfera desde el mar (Figura 8). Sus efectos son muy acusados cerca de la orilla, donde el aire transporta grandes cantidades de sal y se produce una continua pulverización del agua. Esta formación de aerosoles de agua marina y su arrastre por los vientos, hace que los cloruros estén presentes a

distancias considerables de la costa. Al combinarse el  $\text{Na}^+$  con el  $\text{Cl}^-$ , para formar  $\text{NaCl}$ , existe una ionización o una formación de una molécula, cada átomo de sodio cede un electrón a un átomo de cloro, dando como resultado un ión sodio con carga positiva y un ión cloro con carga negativa.

En un cristal de cloruro de sodio la fuerte atracción electrostática entre iones de cargas opuestas mantiene firmemente los iones en su sitio, estableciéndose un enlace iónico. Cuando el cloruro de sodio se funde, los iones tienden a disociarse a causa de su movimiento térmico y pueden moverse libremente. Si se colocan dos electrodos en cloruro de sodio fundido y se le aplica una diferencia de potencial eléctrico, los iones sodio emigran al electrodo negativo y los iones cloro lo hacen al electrodo positivo, produciendo una corriente eléctrica (Rueda de León, 2009).



### 1.5.2 Influencia del $\text{SO}_2$ en el deterioro de metales

El dióxido de azufre es un gas incoloro de olor característico, constituido por un átomo de azufre y dos átomos de oxígeno en su estructura molecular.

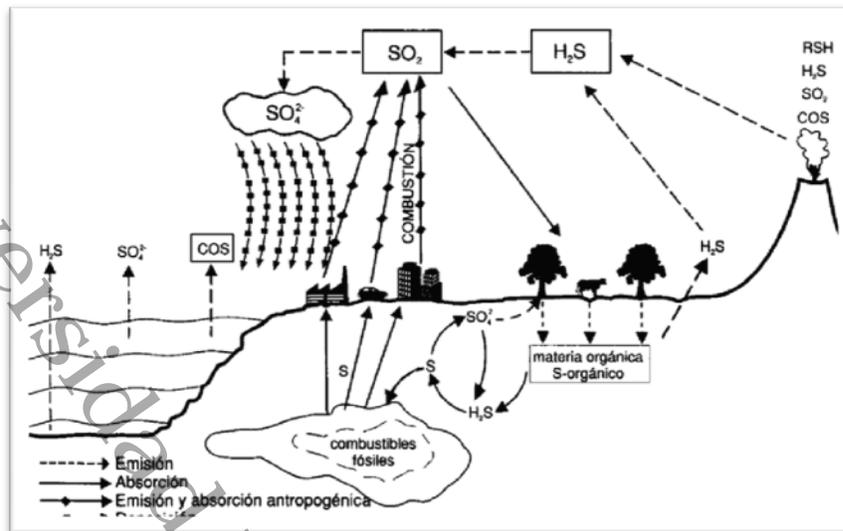
Las fuentes más importantes de  $\text{SO}_2$  atmosférico son antropogénicas, sobre todo por la combustión de carbón que contiene azufre. Durante este proceso el azufre orgánico en el carbón se oxida a dióxido de azufre. Muchos factores como

temperatura, humedad, intensidad de la luz, transporte atmosférico y características superficiales de la materia particulada, pueden influir en las reacciones químicas atmosféricas del dióxido de azufre. Como muchos otros contaminantes gaseoso el dióxido de azufre reacciona para formar materia particulada que luego sedimenta o es barrida de la atmósfera por la lluvia u otros procesos. La presencia de  $\text{SO}_2$  en la superficie de los materiales acelera la corrosión al formar primero ácido sulfúrico, el cual también puede formarse en la atmósfera.

Los compuestos que contienen azufre también se encuentra presentes en la atmósfera de forma natural (Figura 9). Estos compuestos provienen de la descomposición bacteriana de la materia orgánica, de los gases volcánicos, pantanos y manglares. Sin embargo, su contribución en el balance total de  $\text{SO}_2$  resulta muy pequeña en comparación con el producido en los centros urbanos e industriales como resultado de las actividades humanas (Villaseñor, 2009).

Dependiendo de las características y de los tiempos de exposición del metal, se han observado para atmosferas urbanas tasas de corrosión de 1 y media a 5 veces las obtenidas en ambientes rurales (Tiblad, 2012).

Los mayores niveles de deposición de  $\text{SO}_2$  se registran en áreas industriales y en ciudades altamente urbanizadas. A veces, dentro de un radio de 10 a 15 km, la concentración de este contaminante puede variar grandemente entre una zona y otra (Góngora, 2010).



**Figura 9.** Ciclo del azufre (Villaseñor 2009).

### 1.6 Factores meteorológicos

En un clima tropical-húmedo, las fuertes variaciones de los parámetros climáticos, tales como la humedad relativa, la temperatura, la velocidad del viento, las precipitaciones pluviales, la radiación solar, entre otros, afectan de una manera relevante muchos procesos físicos, químicos y biológicos (Del Ángel *et al.*, 2009). Estos parámetros influyen considerablemente en el proceso de corrosión de materiales metálicos. Corvo *et al.* (2008) mencionan que los parámetros ambientales que determinan las características de la corrosión atmosférica difieren sustancialmente para las condiciones interiores.

Las precipitaciones acuosas (lluvia, nieve o niebla) y la condensación de humedad por cambios de temperaturas (rocío) conjuntamente con la presencia de partículas depositadas en la superficie metálica son los principales promotores de la corrosión en la atmósfera (Rivero *et al.*, 2007).

Es difícil precisar cuál de los fenómenos (lluvia, rocío o niebla), es más perjudicial desde el punto de vista de la corrosión. La lluvia, aunque sea el que de modo más

manifiesto moja la superficie metálica, puede no ser el de peores consecuencias al limpiarla de polvo y contaminantes. Por esta razón, las gotas de rocío y las minúsculas de niebla que no “lavan” la superficie metálica pueden ejercer a veces, un papel más importante que la propia lluvia, siempre, claro está, que los períodos de humectación sean del mismo orden, pues no parece probable que unas horas de rocío tengan mayor acción que un día lluvioso (Mariaca *et al.*, 1999).

Algunos de los factores meteorológicos estudiados para comprender este proceso son:

**Tiempo de humectación:** El proceso de corrosión atmosférica depende del tiempo durante el cual permanece una capa de humedad sobre la superficie de un metal., Por lo cual se considere a este uno de los parámetros determinantes en el proceso de corrosión. El tiempo de humectación de la superficie metálica es igual al número de horas al año cuya humedad relativa es igual o mayor a 80% y a una temperatura igual o mayor a 0 °C que es a la que ocurre la corrosión de manera significativa. Por lo tanto los factores climáticos juegan un papel fundamental en la corrosión atmosférica. El tiempo de humectación incluye factores como: precipitación pluvial, temperatura ambiente, viento, humedad relativa, etc. (Muñoz y Uruchurtu, 2002).

**Temperatura:** La temperatura del aire ocasiona efectos antagónicos en la corrosión atmosférica. El aumento de la temperatura acelera las velocidades de los diversos procesos físicos y químicos involucrados en la corrosión metálica. Sin embargo un aumento de la temperatura reduce la solubilidad de los gases en la película de humedad y por tanto el contenido de oxígeno disuelto fundamental para el desarrollos del proceso catódico en el mecanismo de corrosión electroquímica. El efecto resultante de un aumento de la temperatura suele ser un incremento de la velocidad de corrosión bajo condiciones de humectación permanente de la superficie metálica. Sin embargo, bajo condiciones de humectación variable, la velocidad de corrosión aumenta con la temperatura hasta un cierto valor máximo y posteriormente decrece (Muñoz y Uruchurtu, 2002).

Como se ha mencionado anteriormente las precipitaciones pluviales y la condensación de humedad por cambios de temperatura son, sin duda, los principales promotores de la corrosión atmosférica. Existen tres métodos principales para determinar el tiempo durante el cual la superficie de un metal permanece húmeda. Un primer método es su determinación directa por medio de equipos especiales que detectan la presencia de la capa de humedad sobre la superficie metálica. Esta sirve como electrolito para generar un potencial en una celda galvánica consistente en dos electrodos colocados alternativamente y separados por láminas aislantes. Otra posibilidad estriba en sumar los periodos en que ha habido precipitación por lluvia, rocío o niebla, incrementando el resultado con los periodos de secado de las superficies mojadas. Este método presenta el inconveniente de que el único tiempo que podría conocerse fácilmente, es el delluvia. El tercer método establece indirectamente el tiempo de humectación a través de las relaciones empíricas existentes en la bibliografía, sirviéndose de la humedad relativa media o del número de horas en que la humedad relativa supera un determinado valor (Mariaca *et al.*, 1999).

### **1.7 Climatología del estado de Tabasco**

El estado de Tabasco se encuentra localizado en el sureste de la república mexicana, el estado se encuentra entre los 17°15'0" y 18°40'0" de latitud norte, y los 91°0'0" de longitud oeste. Limita al norte con el Golfo de México y el estado de Campeche, al este con la república de Guatemala, al sur con Chiapas y al suroeste y oeste con Veracruz.

Por estar situado cerca del trópico, Tabasco tiene durante casi todo el año un clima cálido y húmedo, con temperaturas media anual de 26°C y una precipitación pluvial de 2000 mm en la zona planas (centro y cerca del mar), y de 5000 mm en las altas (hacia el sur). En los meses de julio a diciembre se presentan ocasionales ciclones tropicales, producidos por los vientos alisios de las Antillas, y los nortes que

ocasionan los vientos de ese cuadrante, en pleno invierno tropical (Mariaca *et al.*, 1999).

### **1.8 Microscopia electrónica de barrido (SEM)**

SEM del inglés "Scanning Electron Microscopy". Los electrones secundarios de baja energía (<50 eV) emitidos de la superficie de la muestra se puede utilizar para dar un tipo de imagen. Para facilitar esta emisión de electrones se metaliza la muestra que es recubierta de una pequeña capa de un metal conductor como el Au.

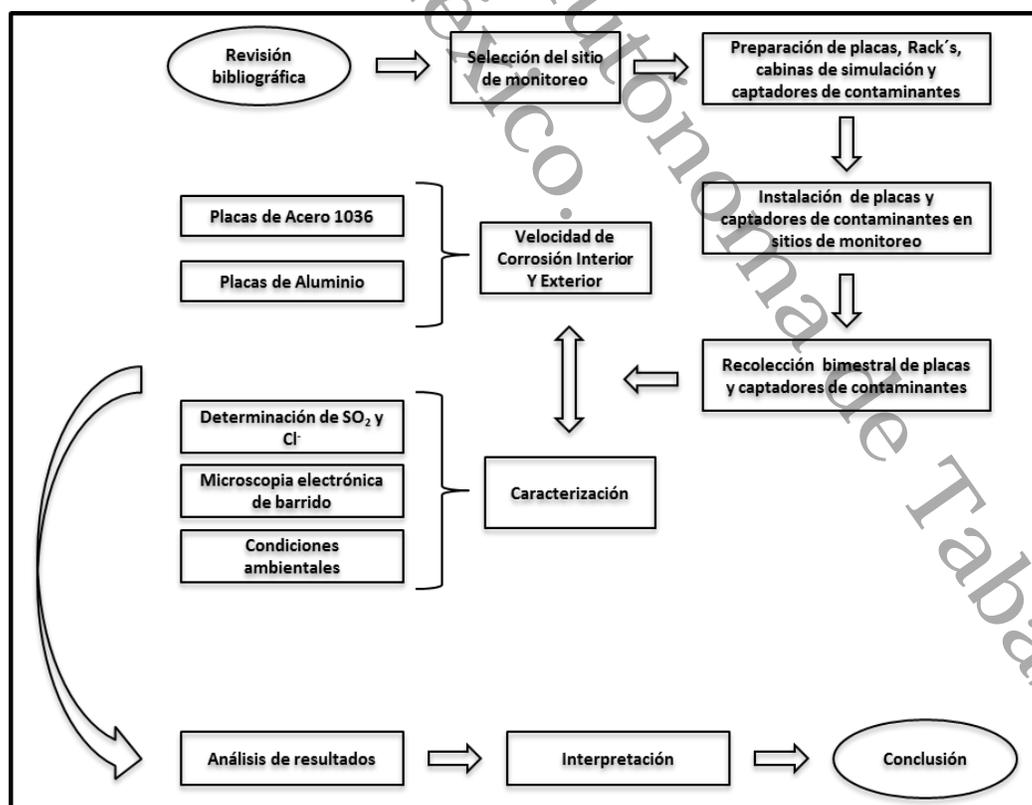
El haz de e- se puede concentrar en una zona diminuta (~20 Å) que puede barrer la superficie del espécimen al ser deflectado por bobinas adecuadas. Los electrones secundarios se detectan por encima del espécimen y la imagen muestra la intensidad de los electrones secundarios emitidos por las diferentes partes de la muestra. La análisis SEM es muy útil para estudiar la morfología de las estructuras cristalinas que presentan los materiales.

## CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

En este Capítulo se describen los procedimientos experimentales, técnicas y normas utilizadas para la evaluación de los materiales que fueron expuestos al ambiente y en la cabina de simulación.

### 2.1 Procedimiento experimental

La Figura 10 muestra el diagrama de la metodología realizada en cada una de las etapas de investigación, la cual inicia con la revisión bibliográfica que incluye normas, artículos, y libros, principalmente. La selección del sitio de monitoreo, construcción de bastidores y cabinas de simulación, preparación de captadores de SO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, instalación de placas de acero al carbono 1036 y aluminio comercial, recolección bimestral de muestras de ensayo y análisis en laboratorio. El análisis de resultados para realizar la categorización de los dos ambientes, con base a lo propuesto por ISO 9223.



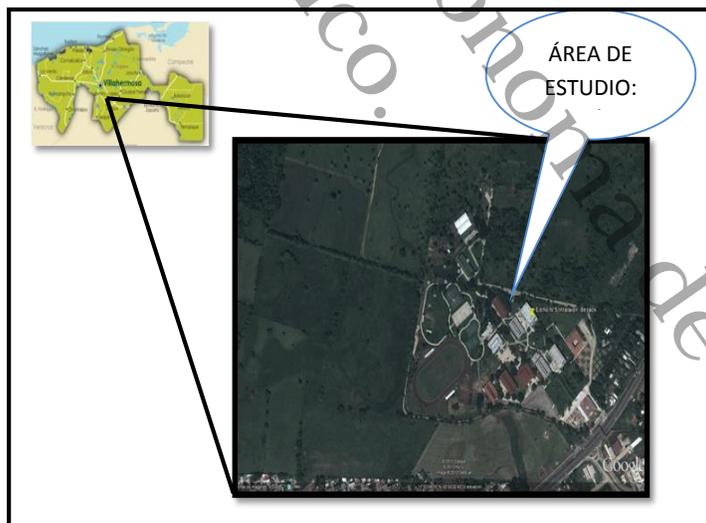
**Figura 10.** Diagrama de las etapas realizadas durante el proyecto.

## 2.2 Selección del sitio de monitoreo

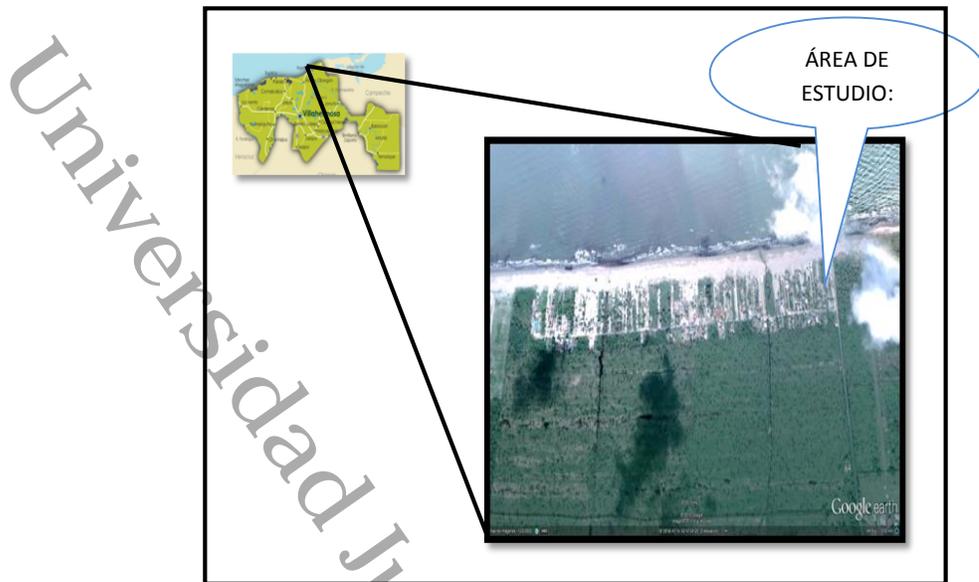
Los sitios seleccionados para realizar el monitoreo de la corrosión atmosférica fueron los que se muestran en la Figura 11 y 12, correspondientes a una atmósfera rural y costera, respectivamente. La atmósfera rural se encuentra ubicada en la carretera Villahermosa-Teapa, Km 14.6, Fraccionamiento Parrilla II; cuyas coordenadas son al norte  $17^{\circ}53'04,33''$ , al oeste  $92^{\circ}55'30,49''$  y elevación de 13m.

Para la atmósfera costera se seleccionó el municipio de Centla, Tabasco, en la zona de Miramar, cuya coordenada es al norte  $18^{\circ}29'33,51''$  y al oeste  $92^{\circ}47'00,91''$ , elevación de 7m.

La selección de dos puntos de monitoreo fue con base a lo propuesto por la norma ASTM G1, que establece que para realizar un ensayo de corrosividad es necesario evaluar como mínimo dos atmósferas. Además se consideró la actividad petrolera que se realiza en ambas zonas del Estado.



**Figura 11.** *Atmósfera rural de Parrilla, Centro.*



**Figura 12.** *Atmósfera Costera de Miramar, Centla.*

### **2.3 Preparación de bastidores, cabinas de simulación y captadores de contaminantes**

Para los ensayos de corrosividad atmosférica pueden considerarse dos categorías de localización de acuerdo al estándar internacional ISO 8565. Estos pueden ser como exposición al aire libre, es decir directamente expuesto a las condiciones atmosféricas y a los contaminantes presentes. O bien como exposiciones en ambientes protegidos de precipitaciones y radiación solar. Estos últimos han sido utilizados para ensayar materiales de la industria electrónica. Los ensayos en ambientes expuestos al aire libre han sido para materiales como aceros, cobre, aluminio, zinc, principalmente, por ser los que mayor aplicación presentan en la industria de la construcción. Debido a que alrededor del 80% de todas las degradaciones sufridas por la corrosión en construcciones metálicas se deben a la corrosión atmosférica (Badea *et al.*, 2011).

Para los ambientes de exposición al aire libre se requiere el uso de bastidores, de acuerdo a la Norma ASTM G50. Para los ambientes protegidos es necesario utilizar cabinas de simulación que permitan la exposición de los materiales a ensayar.

### 2.3.1 Preparación de bastidores

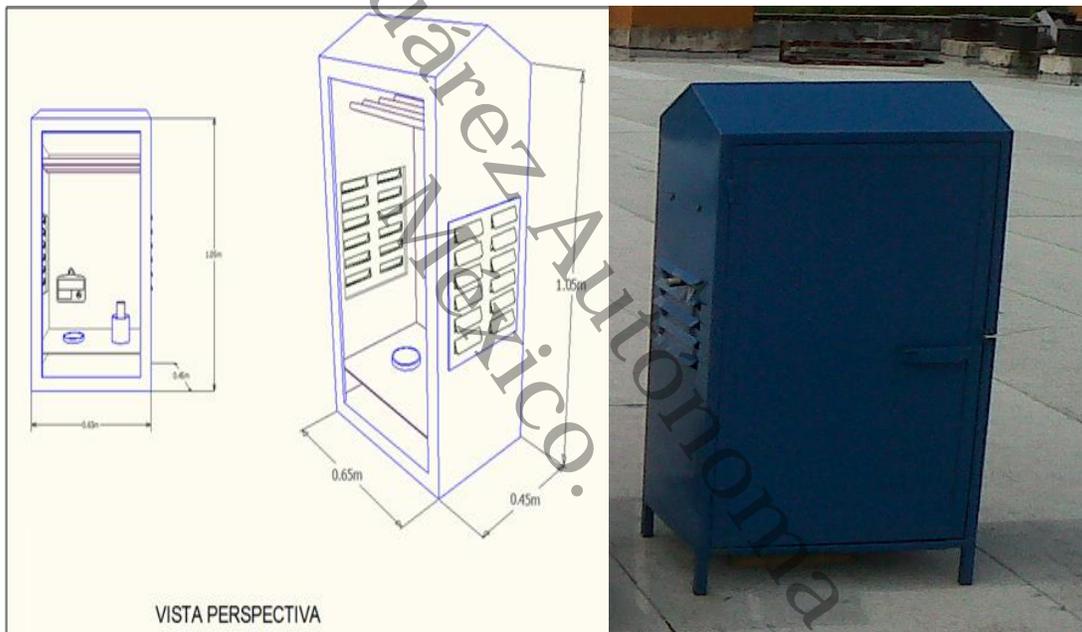
El ángulo de inclinación que se utilizó para los bastidores fue de 30°. Fueron contruidos de aluminio y acero galvanizado, de acuerdo a la Norma ASTM G50, que recomienda su construcción con materiales resistentes que permanezcan intactos durante todo el periodo de exposición. Para sujetar las placas a los bastidores se utilizaron materiales aisladores de carbopropileno, con la finalidad que eviten la formación de pares galvánicos que influyan en los resultados. Los bastidores fueron instalados a una altura aproximada de 3.20 m. En la Figura 13 se muestran el diseño de los bastidores utilizados para la exposición de las placas de acero al carbono 1036 y aluminio, en las dos atmósferas expuestas.



**Figura 13.** Bastidores para exposición de probetas en ambientes exteriores.

### 2.3.2 Preparación de cabinas de simulación

Para el estudio de la corrosión en ambientes cerrados se utilizaron casetas siguiendo las especificaciones establecidos en el proyecto Iberoamericano Tropicorr-Cyted. En este proyecto se establece que las medidas de las casetas pueden variar de acuerdo a las características específicas de cada atmosfera a evaluar. La Figura 14, muestra dimensiones en vista perspectiva y frontal de las casetas que se utilizaron para la medición de la velocidad de corrosión en ambientes interiores.



**Figura 14.** Cabinas de simulación para exposición de probetas en ambientes interiores.

### 2.3.3 Preparación de placas

Las placas utilizadas para los ensayos de corrosividad atmosférica son, por lo general de forma rectangular. De acuerdo a lo recomendado por la Norma ASTM G50 las dimensiones de las placas utilizadas para acero al carbono 1036 en

exteriores fueron de 150 mm x 100 mm, y espesor de 1 mm. Para el aluminio comercial utilizado, el espesor fue de 3 mm (Figura 15).

Para ambientes interiores las dimensiones de las placas de acero al carbono 1036, fueron de 35 mm x 10 mm y espesor de 1 mm. Para el aluminio comercial utilizado, el espesor fue de 3 mm.

La limpieza de la superficie de las placas se realizó utilizando lija de agua No. 80 y 220. Una vez removido los productos de corrosión se aplicó acetona en la superficie de los materiales, y se procedió a preservar las placas en un desecador. Esta limpieza se realiza con la finalidad de evitar agentes que permitan la deposición de contaminantes y aceleren la velocidad de corrosión durante el tiempo de prueba.

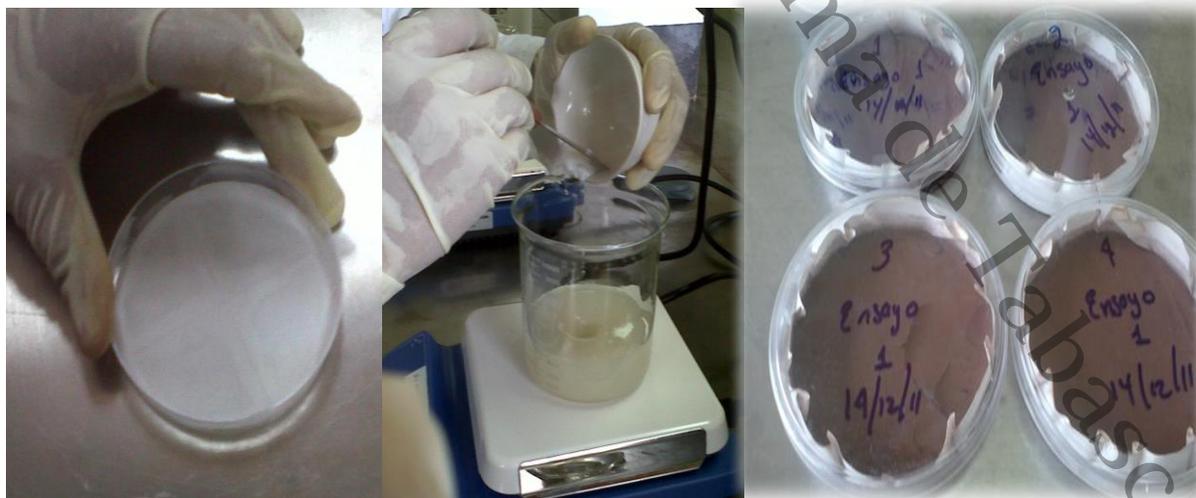


**Figura 15.** Dimensiones de las placas preparadas para exposición.

### 2.3.4 Preparación de captadores de contaminantes

Los contaminantes que se determinan para este tipo de ensayos son el dióxido de azufre y los iones cloruros. Para la medición del  $\text{SO}_2$  atmosférico, se empleó el método denominado “platos de sulfatación”. Los platos de sulfatación se prepararon, utilizando cajas de Petri de 90 mm de diámetro. Fueron recubiertas con papel filtro No. 2 impregnado de acetona. A cada caja de petri se le agregó 40 ml de emulsión, que se preparó utilizando dióxido de plomo, goma de tragacanto, y papel filtro No. 2 triturado. Finalmente, se colocaron en un horno a  $45\text{ }^\circ\text{C}$  durante un periodo de 48 horas para su secado (Figura 16). Las placas son preservadas hasta su exposición.

Para la determinación de la velocidad de deposición de cloruros, se empleó el método denominado “vela húmeda”. Para su preparación se utilizaron tubos de ensayo de  $25 \times 150\text{ mm}$ , estos fueron recubiertos con gasa quirúrgica, se colocaron dentro de un frasco de poliuretano que contenía 250 ml de solución fijadora. La solución fijadora se preparó con glicerina, agua destilada y ácido benzoico (Figura 16).



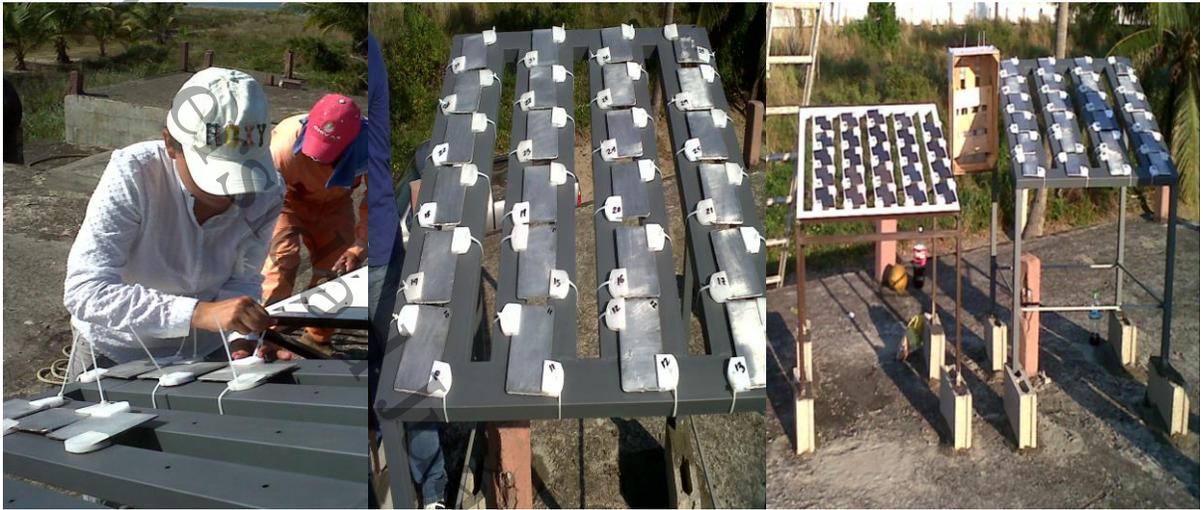
**Figura 16.** Secuencia de preparación de captadores de  $\text{SO}_2$ .



**Figura 17.** Secuencia de preparación de captadores de Cl<sup>-</sup>.

#### **2.4 Instalación de placas y captadores de contaminantes en sitios de monitoreo**

La instalación de las placas y los captadores de contaminantes se realizó el día 18 de Diciembre del 2012 en la atmósfera rural., La instalación en la atmosfera costera se realizó el día 19 de Diciembre de 2012. La duración total del ensayo fue de 1 año, para los dos sitios de monitoreo. En la Figura 18 se observa la secuencia de la instalación en los bastidores para ensayos a la intemperie (exterior). En la Figura 19 se observa la secuencia de la instalación en las cabinas de simulación para ensayos en ambientes cerrados (interior).



**Figura 18.** *Secuencia de instalación en exterior.*



**Figura 19.** *Secuencia de instalación en interior.*

## 2.5 Recolección, limpieza de placas y análisis de captadores de contaminantes

La recolección de las muestras se realizó bimestral, en ambos sitios de monitoreo. En la Tabla 1 se muestran los periodos de exposición y retiro de las placas de acero al carbono 1036 y aluminio comercial, iniciando el retiro el 21 de febrero de 2013 y terminando el 12 de diciembre de 2013, con un tiempo de exposición total de 354 días.

**Tabla 1.** *Periodos de exposición.*

ZONA RURAL		ZONA COSTERA	
Fecha de Retiro	Tiempo de exposición (Días)	Fecha de Retiro	Tiempo de exposición (Días)
21-Febrero- 2013	65	25-Febrero-2013	69
22-Abril-2013	125	25-Abril-2013	128
17-Junio-2013	181	18-Junio-2013	182
20-Agosto-2013	245	25-Agosto-2013	250
15-October-2013	301	23-October-2013	309
09-Diciembre-2013	351	12-Diciembre-2013	354

### 2.5.1 Limpieza química de metales

Para la limpieza química realizada al acero al carbono 1036 y aluminio comercial, se prepararon las soluciones recomendadas en el estándar ISO 8407. La solución para limpiar el acero fue 1000 ml de ácido clorhídrico, 20 g. de trióxido de antimonio y 50 g. de cloruro estañoso; con un tiempo de inmersión de 10 min, a temperatura ambiente. Para limpiar el aluminio comercial, se requirió 50 ml de ácido fosfórico,

20 g de trióxido de cromo, y 1000 ml de agua destilada; el tiempo de inmersión para cada placa fue de 5 min, a 80 °C.

Antes de realizar la limpieza química, las placas fueron pesadas, posteriormente fueron inmersas en las soluciones respectivas. Una vez pasado el tiempo de inmersión fueron limpiadas con agua destilada y secadas con aire caliente. Se pesaron para conocer la pérdida de masa del material., Este proceso se repitió hasta lograr la estabilidad del peso de los materiales (Figura 20).



**Figura 20.** Secuencia de limpieza química realizada para el acero al carbono 1036 y aluminio comercial.

### 2.5.2 Análisis químico de los platos de sulfatación

Para realizar la determinación del dióxido de azufre se utilizó la técnica recomendada en ISO 9225. Fue necesario extraer la mayor cantidad posible del dióxido de plomo, contenido en los platos expuestos. El polvo obtenido se colocó en un vaso de precipitado conteniendo carbonato de sodio, se agitó y dejó reposar durante 3 horas. Posteriormente la muestra se introdujo al horno de calentamiento durante 30 min a 60°C, se dejó enfriar la muestra y se filtró. Se acondicionó la muestra con solución reforzadora para alcanzar un rango de pH de 2.5 a 4. La muestra acondicionada se aforó a 50 ml y se tomó una alícuota de 5 ml, que se depositó en un tubo de ensaye conteniendo cloruro de bario. La muestra preparada se analizó en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 450 nm (Figura 21).



**Figura 21.** Determinación de  $\text{SO}_2$ .

### 3.5.3 Determinación de Cloruros

Para realizar la determinación de los iones cloruros, se utilizó la técnica recomendada en ISO 9225, denominada “candela húmeda”.

La gasa que recubre al tubo de ensaye se retiró y se colocó en el interior del frasco que contenía la solución fijadora. Se realizó la medición del total de la muestra recuperada al final del tiempo de exposición y se tomaron 20 ml. Se ajustó el pH a un valor de 2.5, utilizando ácido nítrico. Se agregó difenil-carbazona/azul de bromofenol como indicador y se procedió a realizar la titulación de la alícuota con nitrato mercúrico (Figura 22).



**Figura 22.** Análisis de Cl<sup>-</sup>.

## 2.6 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

Para analizar la morfología de los productos de corrosión depositados durante el periodo de exposición de las placas de acero al carbono 1036 y aluminio, se utilizó el microscopio electrónico de barrido (MEB), modelo JSM6010LA, marca JEOL. El equipo tiene detector de espectroscopia de energía dispersa (EDS) y procesador de imágenes con el software vacioltouch scope, versión 1.03 A 2011.

Para realizar la medición fue necesario que el equipo estuviera en condiciones de vacío, a 24 °C. Las muestras de estudio fueron colocadas en el porta muestra, sobre la platina del equipo, totalmente seca, la cual se recubrió previamente con cinta de carbón, con la finalidad de obtener óptimas condiciones de conductividad eléctrica.

## CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este Capítulo se muestran los resultados correspondientes a la corrosión atmosférica de las placas de acero al carbono 1036 y aluminio comercial, expuestas a la acción de la atmósfera del municipio de Centla y Centro durante el período Diciembre de 2012 – Diciembre de 2013. Los productos de corrosión de las placas se eliminaron mediante inmersiones sucesivas, en una solución de ácido fosfórico-trióxido de cromo y ácido clorhídrico-trióxido de antimonio-cloruro estañoso, durante los doce meses de este estudio, de acuerdo a la norma ISO 8407. En el Anexo A se muestran las gráficas del comportamiento obtenido durante los periodos de limpieza de cada material.,

La preparación y determinación de contaminantes  $\text{SO}_2$  y  $\text{Cl}^-$ , se realizó de acuerdo a la Norma ISO 9225, los resultados obtenidos presentes en ambas atmósferas son mostrados en Tablas 1 y 2.

### 3.1 Contaminantes atmosféricos

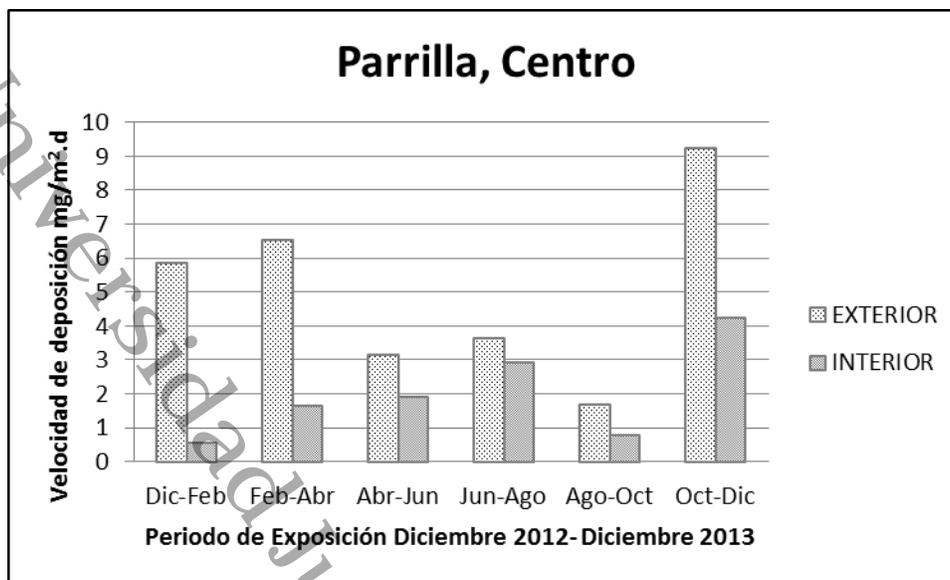
Durante el período de ensayo se realizó un registro bimestral de las velocidades de deposición de dióxido de azufre y cloruros (Fig. 23-26), como principales agentes corrosivos, siguiendo la metodología descrita en la norma ISO 9225:12. Para la captación de los contaminantes se utilizaron las técnicas de plato de sulfatación ( $\text{SO}_2$ ) y candela húmeda ( $\text{Cl}^-$ ). Se determinaron los cloruros y el dióxido de azufre en las estaciones de ensayo de Miramar, Centla (atmósfera costera) y Parrilla, Centro (atmósfera rural), en una cabina de simulación de interiores y expuestas al medio ambiente, de acuerdo a las normas ASTM G50 e ISO 8565:2012.

### 3.1.1 Concentración de Iones cloruros en atmósfera interior y exterior de las estaciones de monitoreo

De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 23, se encontró que para la estación de Parrilla, Centro el rango del comportamiento en la atmósfera exterior fue de  $1.67 - 9.23 \pm 2.75$  mg/m<sup>2</sup>.d., y en la cabina de simulación de interiores el rango del comportamiento fue de  $0.79 - 4.24 \pm 1.29$  mg/m<sup>2</sup>.d. El periodo que mayor velocidad de deposición presentó fue Octubre-Diciembre, con valores de 9.2334 y 4.2403 mg/m<sup>2</sup>.d, en ambientes exteriores y ambientes interiores respectivamente.

Este comportamiento es similar a los obtenidos en otros estudios (Echeverría *et al.* 2000), y es debido a la atenuación de la influencia salina por el efecto de la distancia con la costa y la influencia de los sures. Álvarez & Pridybailo (2008) realizaron estudios para ambientes interiores y exteriores en atmósferas rurales de Limón Costa Rica, y obtuvieron que dentro de las cabinas de simulación (interior) la cantidad de cloruros es mucho menor, que en los bastidores (exterior) por lo tanto el efecto de contaminación disminuye notablemente

De acuerdo a Del ángel *et al.* (2009), estas variaciones pueden deberse a los vientos predominantes, ya que en la zona rural de Cunduacán, Tabasco tienen dirección Norte Noroeste (NW), Norte Este (NE) y Norte (N), provocando que las partículas de Cl<sup>-</sup> provenientes del Golfo de México registren diferentes velocidades de deposición. De esta manera, según la clasificación propuesta por ISO 9223:12, la agresividad corrosiva fue de S<sub>0</sub> (interior) y S<sub>1</sub> (exterior), en la estación de Parrilla, Centro.



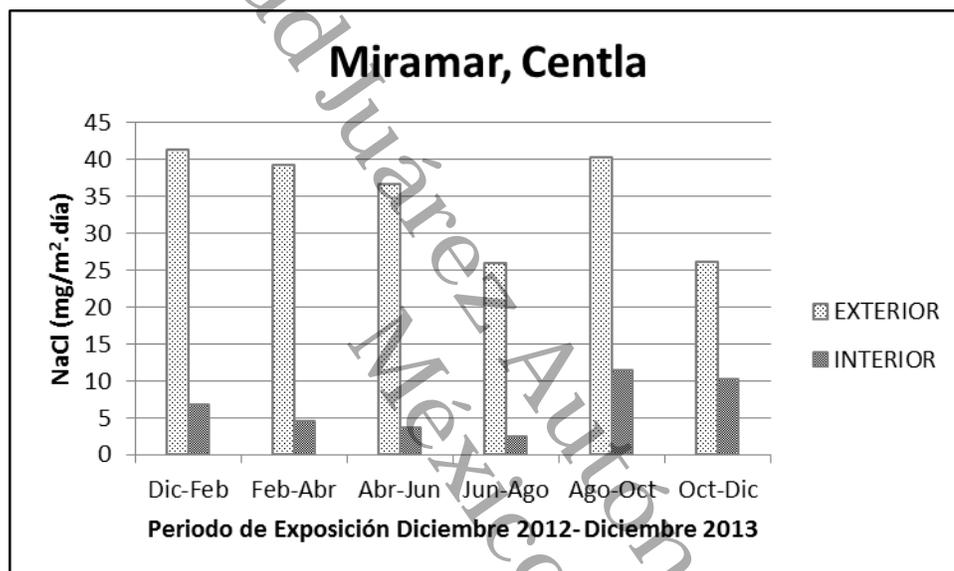
**Figura 23.** Velocidad de deposición de Cl<sup>-</sup> (mg/m<sup>2</sup>día) en la estación de Parrilla, Centro (2012-2013).

En la Figura 24 se muestran los resultados de la estación de monitoreo ubicada en Centla, presentan un rango de comportamiento para la atmósfera exterior de 5.508 – 41.33 ± 13.77 mg/m<sup>2</sup>d y para la cabina de simulación de interiores el rango del comportamiento fue de 2.48 – 11.53 ± 3.68 mg/m<sup>2</sup>d. El periodo que mayor velocidad de deposición presentó fue Agosto - Octubre, con valores de 40.2501 y 11.5340 mg/m<sup>2</sup>día en ambientes exteriores y ambientes interiores respectivamente. Esta estación se ubicó en la franja costera del estado de Tabasco y recibe de manera directa el impacto de los aerosoles marinos provenientes del Golfo de México, por lo que los resultados son los más altos de los obtenidos en ambas estaciones de monitoreo.

De acuerdo a estudio realizado por Álvarez & Pridybailo (2008) para ambientes interiores y exteriores en atmósferas costeras de Limón en Costa Rica, se obtuvieron que dentro de las cabinas de simulación (interior) la cantidad de cloruros es mucho menor, que en los bastidores (exterior) por lo tanto el efecto de contaminación disminuye notablemente. Echeverría *et al.* (2009), establece que la elevada presencia de cloruros en atmósferas costeras contribuye notablemente en el deterioro de los diversos materiales expuestos, que la presentada en atmósferas rurales. La salinidad atmosférica en las regiones costeras genera un notable

aumento en la velocidad de corrosión atmosférica en comparación con ambientes limpios, esto debido a que los cloruros disueltos en la capa de humedad elevan considerablemente la conductividad de la película del electrolito en el metal y tienden a destruir las películas pasivantes (Alcántara *et al.* 2015).

Para la estación de Miramar, Centla los resultados obtenidos determinaron una categoría S<sub>1</sub> (interior) y S<sub>2</sub> (exterior).



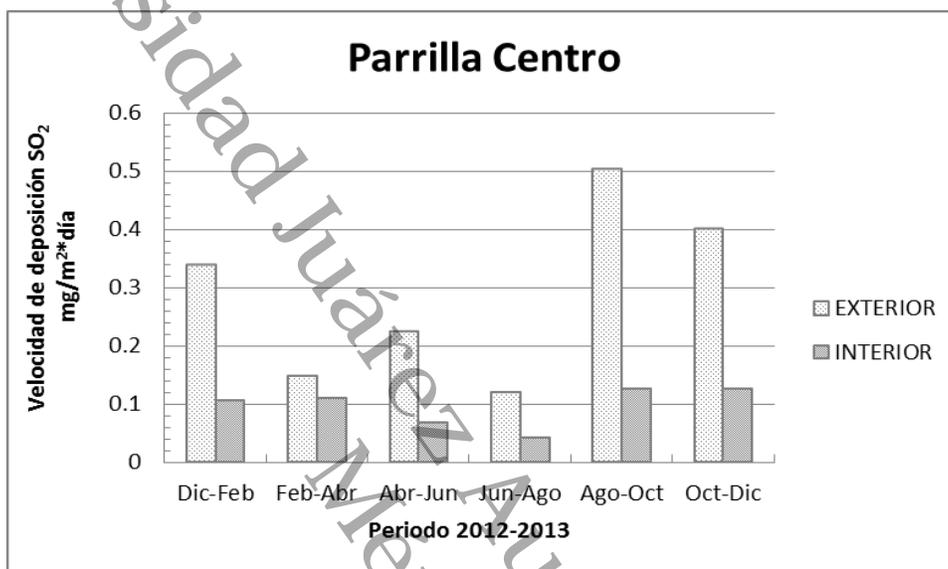
**Figura 24.** Velocidad de deposición de Cl<sup>-</sup> (mg/m<sup>2</sup>día) en la estación de Miramar, Centla.

### 3.1.2 Concentración de Dióxido de Azufre en atmósfera interior y exterior de las estaciones de monitoreo

Los resultados obtenidos indican que en la estación de Parrilla, Centro el rango del comportamiento de la velocidad de deposición de SO<sub>2</sub> en la atmósfera exterior fue de 0.11 – 0.50 ± 0.15 mg/m<sup>2</sup>d, y para la atmósfera interior el rango del comportamiento fue de 0.04 – 0.14 ± 0.04 mg/m<sup>2</sup>d.

En la Figura 25 se observa que las máximas velocidades de deposición en la atmósfera exterior se presentaron en los bimestres de Diciembre-Febrero 2012, Agosto-October y Octubre-Diciembre 2013, con valores entre 0.50 y 1.56

mg/m<sup>2</sup>\*día. Para la atmósfera interior los valores máximos de velocidad de deposición fueron entre 0.12 y 0.48 mg/m<sup>2</sup>día, para los bimestres de Agosto- Octubre y Octubre-Diciembre 2013. Estos resultados coinciden con las épocas de mayor precipitación pluvial en el estado de Tabasco.



**Figura 25.** Velocidad de deposición de SO<sub>2</sub> (mg/m<sup>2</sup>día) en las estaciones de monitoreo (2012-2013)

En la Figura 26 se presentan los resultados de la segunda estación de monitoreo ubicada en Miramar, Centla con un rango de comportamiento para la atmósfera exterior de 0.02 – 0.54 ± 0.54 mg/m<sup>2</sup>d. La atmósfera interior presentó un comportamiento de 0.05 – 0.48 ± 0.16 mg/m<sup>2</sup>d. Siendo los bimestres de Junio-Agosto y Agosto-October 2013 los que presentaron mayores velocidades de deposición del contaminante.

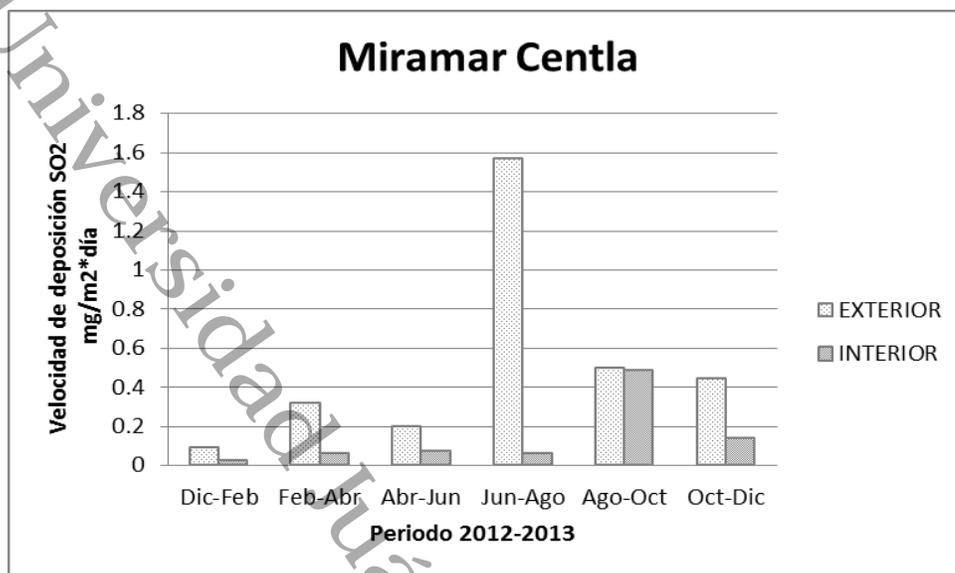
De acuerdo a lo reportado por López & Echeverría (2002), la acción de los compuestos sulfurados ocurre a través de la interacción con los iones cloruros en la película de humedad, que se forma con mayor facilidad en las épocas de lluvias. Así mismo la presencia de iones sulfatos corresponde al aerosol marino.

De acuerdo a las categorías propuestas por la ISO 9223:12, los resultados obtenidos en ambas estaciones de monitoreo, se encuentran en P<sub>0</sub> considerado la más baja. Los resultados se deben a que en ambos sitios las emisiones a la atmósfera, por concepto de actividad industrial o quema de combustibles fósiles es mínima.

Los resultados obtenidos en este estudio son similares a los reportados por Del Ángel *et al.* (2009), en el estado de Tabasco, indicando que las velocidades de deposición fueron en un rango de 0.054 – 0.38 mg/m<sup>2</sup>día, considerándose como categorías de agresividad corrosiva bajas (P<sub>0</sub>), debido a los cambios climáticos; entre ellos los vientos predominantes y la precipitación pluvial, afirmando que son factores que influyen en la disminución de la velocidad de deposición del contaminante.

Góngora (2010), reportó que para la ciudad de San Francisco de Campeche se obtuvo un promedio anual de 1.47 mg/m<sup>2</sup>día de SO<sub>2</sub> (P<sub>0</sub>), disminuyendo notablemente en las zonas rurales, donde los valores más altos fueron atribuibles a la quema de biomasa.

López *et al.* (2002) señalaron que la concentración del SO<sub>2</sub> en la atmósfera varía dentro de amplios límites, de acuerdo con el carácter de las industrias, las fuentes de energía de la región, y épocas del año. Así mismo reportan que las atmósferas que mayor velocidad de deposición muestran son las industrializadas, si se comparan con otras atmósferas. El ataque al acero y otros metales se acelera considerablemente cuando la concentración de SO<sub>2</sub> supera los 0.1 mg/m<sup>3</sup>día.



**Figura 26.** Velocidad de deposición de SO<sub>2</sub> (mg/m<sup>2</sup>día) en las estaciones de monitoreo (2012-2013).

En la tabla 4 se presentan las categorías alcanzadas para los ambientes interiores y exteriores de la atmósfera de Parrilla, Centro y Miramar, Centla, en el estado de Tabasco. Para iones cloruros se obtuvo la categoría de S<sub>2</sub> en la costa y S<sub>1</sub> en la atmósfera rural., La máxima categoría alcanzada para el contaminante SO<sub>2</sub> fue P<sub>0</sub> para las dos atmósferas estudiadas. Estos comportamientos son similares a los encontrados por Tejero *et al.* (2014).

**Tabla 2.** Categorías de contaminantes de acuerdo a la norma ISO 9223.

PERIODOS DE EXPOSICION	IONES CLORURO (mg/m <sup>2</sup> *día)				DIÓXIDO DE AZUFRE (mg/m <sup>2</sup> *día)			
	EXTERIOR		INTERIOR		EXTERIOR		INTERIOR	
	RURAL	COSTA	RURAL	COSTA	RURAL	COSTA	RURAL	COSTA
Dic-Feb	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>
Feb-Abr	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>
Abr-Jun	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>
Jun-Ago	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>
Ago-Oct	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>
Oct-Dic	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>

### 3.2 Análisis de la temperatura y humedad relativa

En las Figuras 27 (a y b) se presentan los comportamientos de las variaciones en los valores mensuales de la temperatura (T) y de la humedad relativa (HR) del aire, durante el periodo de la investigación de Diciembre 2012 a Diciembre 2013, en un ambiente rural (Parrilla, Centro) y costero (Miramar, Centla).

Los resultados graficados de temperatura y humedad relativa fueron proporcionados por la CONAGUA, se clasificaron y tabularon de acuerdo al complejo Temperatura-Humedad Relativa (CT\_HR).

En la estación de Parrilla (Figura 27a), Centro se encontró que el promedio de la temperatura mínima fue de 20.73°C y temperatura máxima de 33.75°C. La temperatura promedio en esta estación fue de 27.27 °C. En el caso de la HR se alcanzan valores de 88.83% durante la noche (20:00 – 06:00 hrs) y 77.37% durante el día (07:00 – 19:00 hrs). El mes que presentó el mayor tiempo de humectación fue Abril.

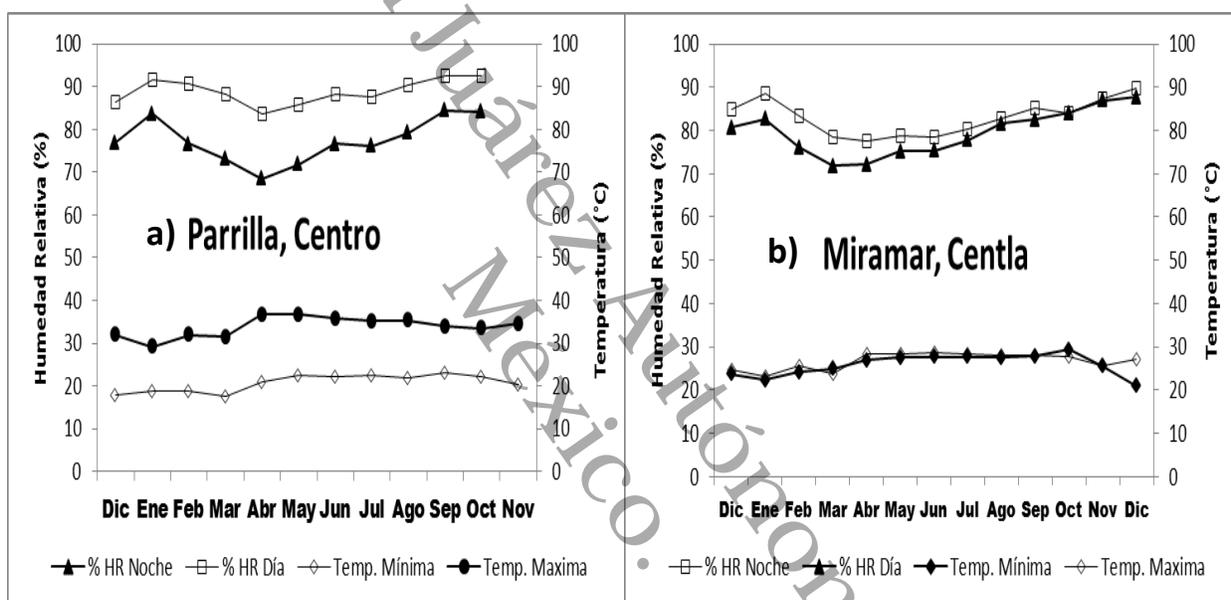
En la estación de Miramar (Figura 27b), se encontró que el promedio de la temperatura mínima fue de 20.02°C y temperatura máxima de 26.94°C. La temperatura promedio en esta estación fue de 26.48 °C. En el caso de la HR se alcanzan valores de 83.02% durante la noche (20:00 – 06:00 hrs) y 79.60% durante el día (07:00 – 19:00 hrs). Los meses que presentaron los mayores tiempos de humectación fueron Marzo y Abril.

Los valores de humedad relativa obtenidas en la noche se encuentran por arriba del 80%, por lo que materiales como el acero y aluminio, experimentan un súbito y notable incremento en la velocidad de corrosión. Esta situación se agudiza con atmósferas contaminadas de SO<sub>2</sub> y Cl.

De acuerdo a López & Echeverría (2002) las horas de humectación es un factor meteorológico importante, debido a que la mayor influencia corrosiva de los contaminantes en materiales como el acero se alcanza cuando las temperaturas

son menores a 25°C (presencia de rocío), que cuando está por encima de éste (mayor evaporación).

En el caso de la interacción de los contaminantes en metales no férricos como el Aluminio, el tiempo de lluvias es más significativo que el tiempo de humedad en atmósferas exteriores, debido a que los compuestos de cloruros y sulfatos son menos solubles que los del acero. El nivel crítico de humedad para el acero dulce, con 0.3% de SO<sub>2</sub>, es entre el 60 - 80%, y para el aluminio es del 80% de HR.



**Figura 27.** Comportamiento de los valores mensuales de la temperatura y humedad relativa del aire en las estaciones de Parrilla (a) y Miramar (b), durante el periodo de la investigación.

### 3.2.1 Determinación del tiempo de humectación (TOW)

A partir del CT-HR se determinó el tiempo de humectación anual (Time of Wetness, TOW), para cada estación de monitoreo (Figura 28 a, b), según la norma ISO 9223:12. Como valor crítico de la HR del aire para los cálculos del tiempo de

humectación de las superficies de los materiales metálicos, se tomó el 80%, cuando la temperatura del aire está en el intervalo de  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \geq T \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Del Ángel *et al* 2009).

Los valores de TOW más altos calculados de acuerdo a los datos proporcionados por la CONAGUA, para la estación rural de Parrilla, Centro (Figura 28 a), fueron en los meses de Diciembre 2012 y Enero 2013 (535-593 h). Los valores menores de TOW ( $\approx 352$  h), fueron en el mes de Marzo.

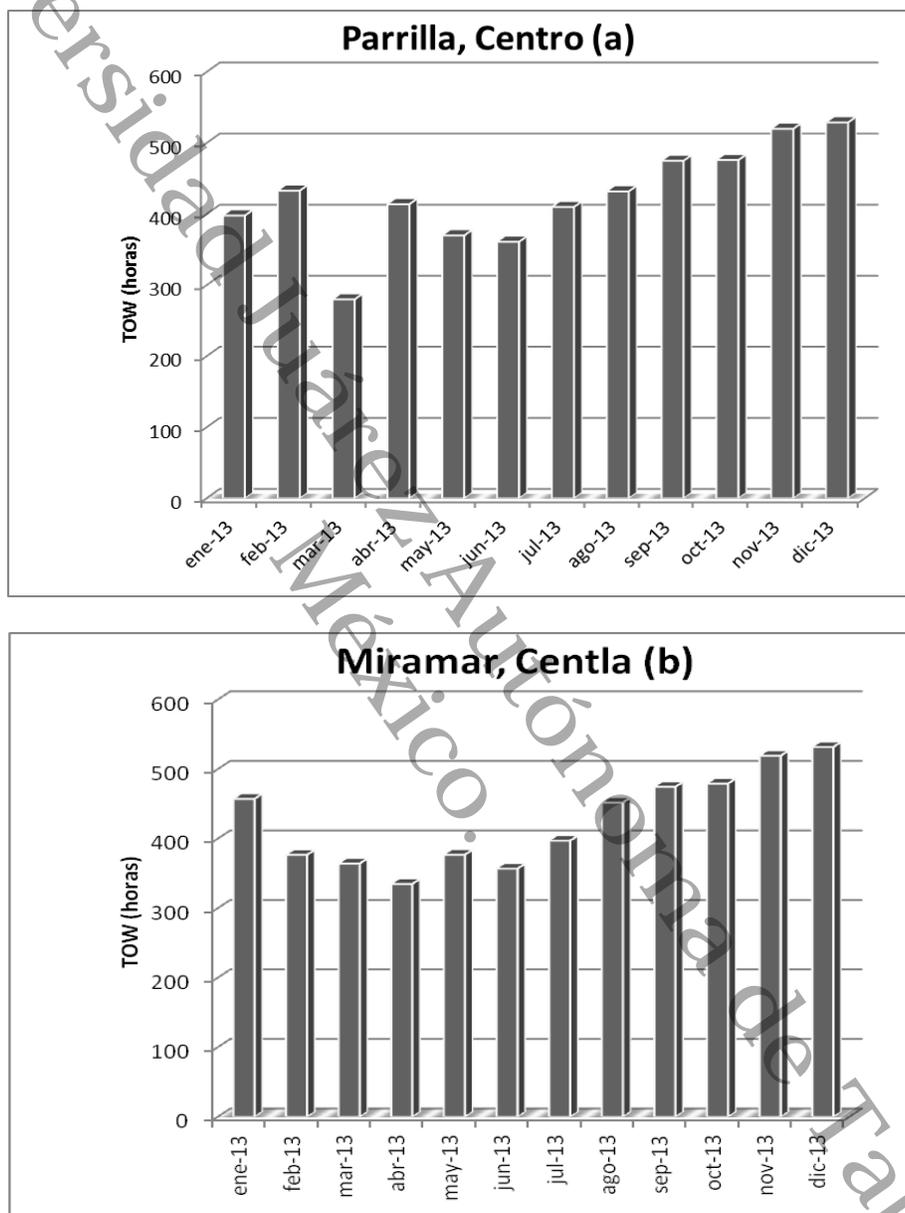
En el ambiente costero de Miramar, Centla, (Figura 28 b) los valores más altos de TOW fueron en los meses de Diciembre y Noviembre de 2013 (519 - 531 h). Los valores menores de TOW ( $\approx 335$  h), fueron en el mes de Abril.

De esta manera los valores anuales del tiempo de humectación para el ambiente rural (Parrilla, Centro), fueron de 5098 h. Para el ambiente costero (Miramar, Centla), fueron de 5122 h. Para los dos ambientes se obtuvo la categoría  $T_4$ , de acuerdo a la clasificación establecida del tiempo de humectación en ISO 9223:2012. Considerada por la misma norma como una categoría típica de un clima cálido-húmedo. Esta categoría se presenta principalmente en el rango de temperaturas en 20-25  $^{\circ}\text{C}$ .

De acuerdo a estudio realizado por Del Ángel *et al*, (2009), sobre la agresividad atmosférica basada en el tiempo de humectación, regiones con un clima tropical húmedo de Tabasco (Villahermosa y Paraíso), presentan valores promedio de CT-HR en un rango de 4603-5741 h año<sup>-1</sup> ( $T_4$ ) para la atmósfera urbana de Villahermosa, y 7470-8391 h año<sup>-1</sup> ( $T_5$ ) para la atmósfera costera de Paraíso. Estos valores se consideran agresivos y muy agresivos, respectivamente, generando un acelerado deterioro de los metales.

Gil *et al* (2010), determinó que en zonas cercanas al mar, cuando se producen pulverizaciones y brumas marinas, la humedad de la atmósfera puede ser considerablemente mayor que la humedad normal tierra adentro. Este incremento en la zona costera es debido a los frentes fríos provenientes del norte que cruzan el Golfo de México. Así mismo menciona que el TOW es más significativo para ambientes exteriores, que en ambientes interiores. Debido a que se calcula

considerando factores climáticos, que están directamente relacionados con ensayos al exterior.



**Figura 28.** *Tiempos de humectación en horas (TOW), para el ambiente rural de Parrilla, Centro (a), y para el ambiente costero de Miramar, Centla (b).*

### 3.3 Caracterización de la velocidad de corrosión

Para la evaluación de la velocidad de corrosión se empleó la técnica gravimétrica, de acuerdo a lo propuesto por ISO 8565:2012 y ASTM G-50. El cálculo de velocidad de corrosión en  $\text{g/m}^2\cdot\text{año}$  se realizó de acuerdo a lo propuesto por ISO 9226:2012.

#### 3.3.1 Velocidad de corrosión del acero al carbono 1036 en atmósfera rural y costera

La Tabla 4 muestra los resultados de velocidad de corrosión obtenidos para la atmósfera costera de Miramar, Centla, en ambientes interiores y exteriores. Las placas expuestas de Acero al carbono 1036 indicaron que la categoría en ambientes exteriores fue de  $C_x$  considerada como extremadamente agresiva. Para las placas dentro de las cabinas de simulación (interiores) la categoría máxima alcanzada fue  $C_5$  considerada como muy alta. Para el punto de monitoreo de Parrilla, Centro, los resultados se encuentran en la categoría de  $C_5$ , en ambientes exteriores considerada como altamente agresiva. Para las placas en interiores la categoría fue  $C_4$  considerada como alta.

Al comparar los resultados en los sitios de ensayo se observa que en el caso de ambientes exteriores, el proceso de corrosión es más acelerado en la atmósfera costera que en la rural., La misma tendencia se presenta para los ambientes interiores. Estos resultados son similares a lo expuesto por López *et al.*, 2002, y son debido a que la capa de óxido que se forma en ambientes interiores es mucho más delgada que la que se forma en exteriores, como resultado de la interacción directa de los contaminantes y la formación de productos de corrosión.

Corvo *et al.*, 2008, encontró que la disminución de la velocidad de corrosión para el acero en ambientes interiores se debe en gran medida a que la formación de la película corrosiva es más lenta que la que se da en ambientes exteriores, debido a que los cambios de temperatura y humedad son menos bruscos.

**Tabla 3.** Velocidades de corrosión para el acero al carbono 1036 de acuerdo a la Norma ISO 9223:2012.

<b>VELOCIDAD DE CORROSIÓN ACERO 1036</b>				
<b>( g/m<sup>2</sup>*a)</b>				
<b>Periodos de Exposición</b>	<b>Miramar, Centla</b>		<b>Parrilla, Centro</b>	
	<b>Interior</b>	<b>Exterior</b>	<b>Interior</b>	<b>Exterior</b>
Dic-Feb	1327.26	3186.14	743.14	1155.55
Feb-Abr	858.17	3163.15	651.07	649.61
Abr-Jun	814.55	2766.82	501.13	886.47
Jun-Ago	649.74	2454.97	399.73	305.75
Ago-Oct	554.09	1801.77	358.37	400.20
Oct-Dic	1002.65	2392.28	348.96	440.14

### 3.3.2 Velocidad de corrosión del aluminio comercial en atmósfera rural y costera

En la Tabla 5 se presentan los resultados de velocidad de corrosión obtenidos en ambientes interiores y exteriores, para Miramar, Centla y Parrilla, Centro. Para la atmósfera costera de Miramar, Centla los resultados indicaron que la categoría en ambos ambientes fue de C<sub>x</sub> considerada como extremadamente agresiva. Para la atmósfera rural de Parrilla, Centro se obtuvo categoría C<sub>5</sub>.

Al comparar los resultados en los sitios de ensayo se observa que son mayores las categorías para las atmósferas interiores que para las exteriores. Y de acuerdo a lo argumentado por Mendoza & Corvo 1999, la disminución de la velocidad de corrosión para el Aluminio en ambientes exteriores es debida a la interacción directa de las condiciones ambientales para la formación de la película pasiva, que forman los iones disueltos en el agua de mar. Así mismo los vientos generan un efecto de lavado de la superficie evitando la permanencia de la película pasiva del Aluminio.

Las atmósferas interiores presentan velocidades de corrosión altas debido a que la película formada en la superficie metálica no interactúan directamente con los condiciones ambientales, permitiendo que en este entorno los iones cloruro se vuelvan muy corrosivos debido a que el ion sodio apoya el desarrollo de pH altos en

las zonas catódicas, dando como resultado la disolución alcalina de la alúmina pasiva y una rápida corrosión generalizada (Blücher *et al.* 2005).

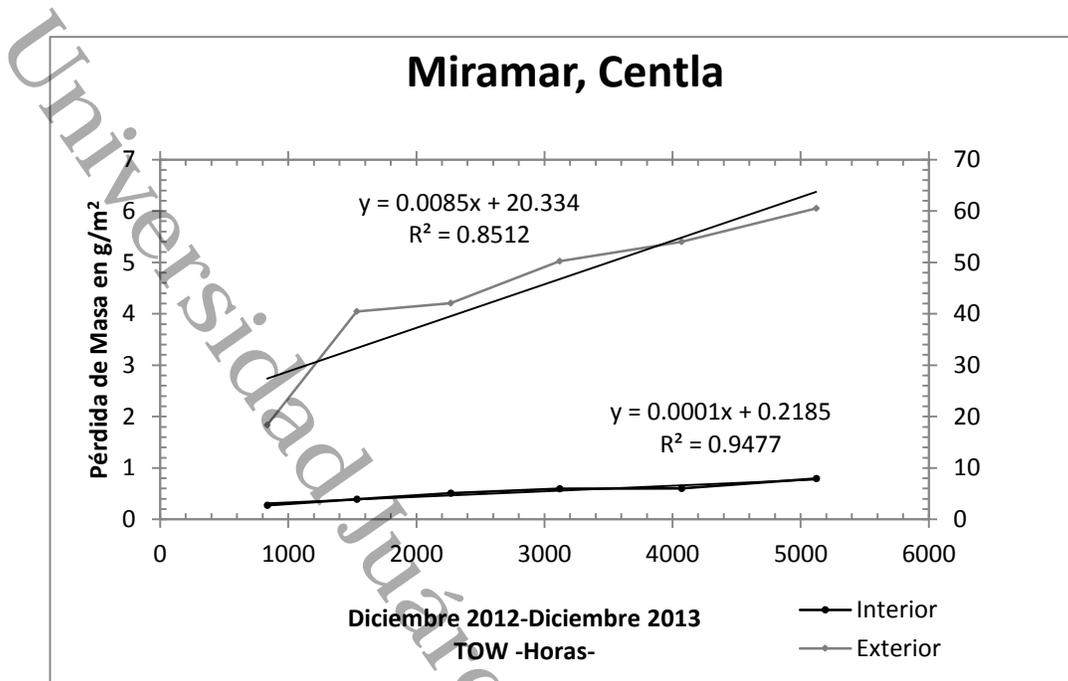
**Tabla 4.** Velocidades de corrosión para el aluminio comercial de acuerdo a la Norma ISO 9223:2012.

<b>VELOCIDAD DE CORROSIÓN ALUMINIO COMERCIAL</b>				
<b>( g/m<sup>2</sup>*a)</b>				
<b>Periodos de Exposición</b>	<b>Miramar, Centla</b>		<b>Parrilla, Centro</b>	
	<b>Interior</b>	<b>Exterior</b>	<b>Interior</b>	<b>Exterior</b>
Dic-Feb	16.44	3.40	9.55	2.23
Feb-Abr	46.44	7.17	21.63	1.45
Abr-Jun	29.44	20.93	17.54	6.35
Jun-Ago	44.00	6.08	52.34	2.68
Ago-Oct	22.97	12.27	16.40	18.99
Oct-Dic	145.97	62.61	14.39	7.26

### 3.4 Complejo temperatura-humedad relativa sobre la velocidad de corrosión

En la Figura 29 se compara el avance del proceso de corrosión (pérdida de masa) de las muestras de acero al carbono 1036, como función del tiempo de humectación (TOW), que recibieron las superficies de los metales expuestos durante el año del ensayo, en la atmósfera costera de Miramar, Centla. Los datos de pérdida de masa presentaron un coeficiente de correlación  $R=0.8512$  para el ambiente exterior.

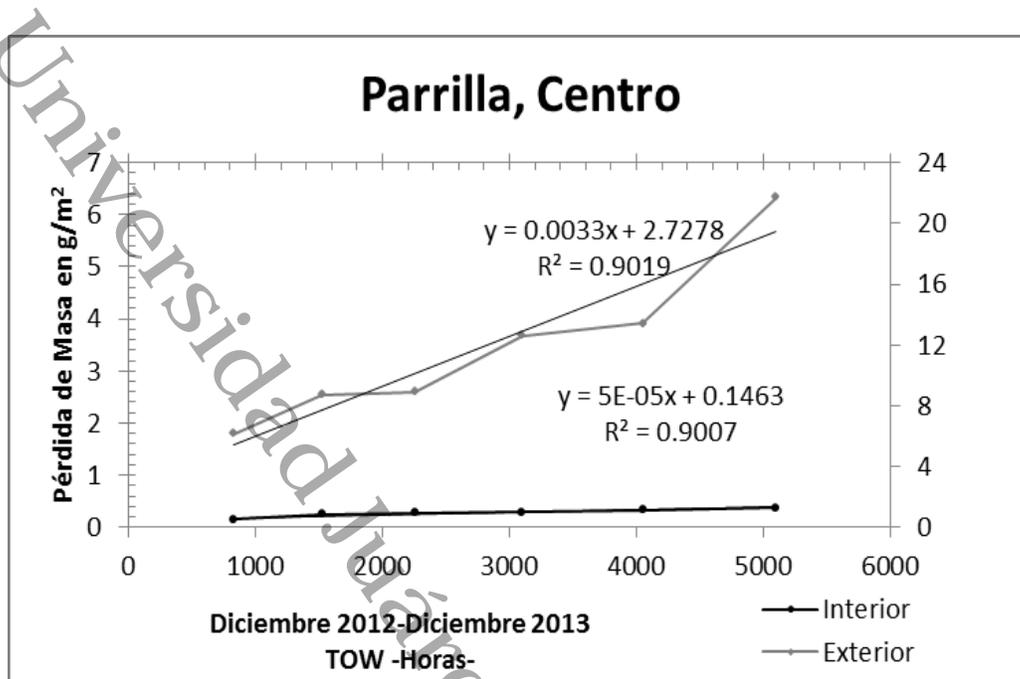
Para el ambiente interior el coeficiente de correlación fue de  $R= 0.9477$ . Al inicio de la exposición de las muestras del material en ambientes exteriores, la pérdida de masa fue de  $18.37 \text{ g/m}^2$  con TOW de 834.16 horas. Al finalizar el año de ensayo se alcanzaron pérdidas de masa por  $60.53 \text{ g/m}^2$  con TOW de 5122 horas. Para el ambiente interior la pérdida de masa al inicio fue de  $0.27 \text{ g/m}^2$  y al final se alcanzaron pérdidas por  $0.79 \text{ g/m}^2$ .



**Figura 29.** Pérdida de masa en relación al TOW para el acero al carbono 1036 en atmósfera Costera de Miramar, Centla.

Se muestran en la Figura 30, las pérdidas de masa de las muestras de acero al carbono 1036, con relación al tiempo de humectación (TOW) que recibieron las superficies de los metales expuestos, en la atmósfera rural de Parrilla, Centro.

Los datos de pérdida de masa presentaron un coeficiente de correlación  $R=0.9019$  para el ambiente exterior. El coeficiente de correlación para el ambiente interior fue de  $R= 0.9007$ . Al inicio de la exposición de las muestras del material en ambientes exteriores, la pérdida de masa fue de  $6.14 \text{ g/m}^2$  con TOW de 831 horas. Al finalizar el año de ensayo se alcanzaron pérdidas de masa por  $21.72 \text{ g/m}^2$  con TOW de 5098 horas. Para el ambiente interior la pérdida de masa al inicio fue de  $0.14 \text{ g/m}^2$  y al final se alcanzaron pérdidas por  $0.37 \text{ g/m}^2$ .



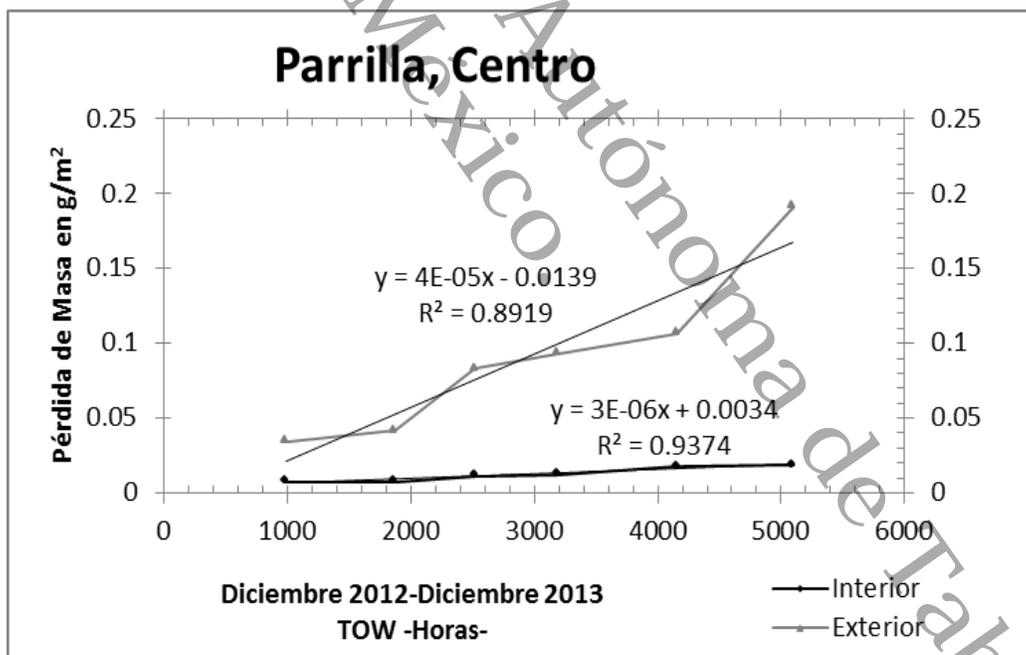
**Figura 30.** Pérdida de masa en relación al TOW para el acero al carbono 1036 en atmósfera Rural de Parrilla, Centro.

Con estos resultados se observó que existe una relación directa entre el tiempo de humectación y la pérdida de masa de los materiales expuestos a la intemperie y en ambientes cerrados. De los dos ambientes monitoreados se observó que el ambiente costero de Miramar, Centla alcanzó las mayores pérdidas de masa, con TOW más altos, comparados con la atmósfera rural de Parrilla, Centro.

Del Ángel *et al.* (2009), menciona que en ambientes contaminados, el acero exhibe una relación lineal en el primer año de exposición. Esta relación indica que la velocidad de formación de la capa protectora (óxidos/hidróxidos), y su interacción con el medio ambiente sufre modificaciones transformándose en una película no protectora, disolviéndose parcialmente con el tiempo, y originando aumento en la pérdida de material.

En la Figura 31 se compara el avance del proceso de corrosión (pérdida de masa) de las muestras de aluminio comercial, como función del tiempo de humectación (TOW), que recibieron las superficies de los metales expuestos durante el año del ensayo, en la atmósfera rural de Parrilla, Centro.

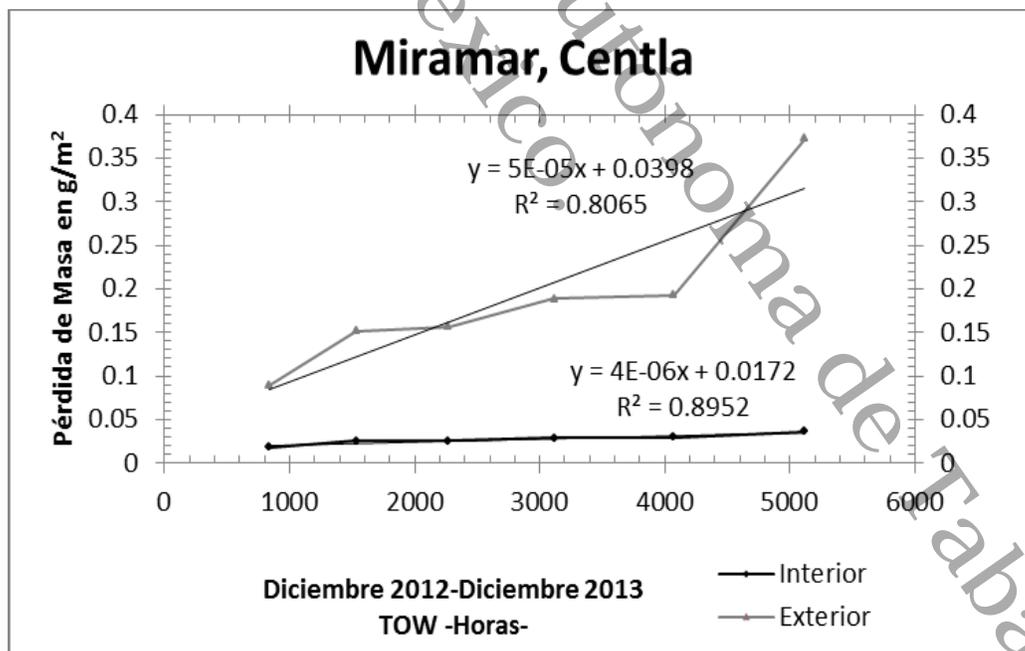
Los datos de pérdida de masa siguen una tendencia lineal con un coeficiente de correlación  $R=0.8919$  para el ambiente exterior. La misma tendencia lineal con coeficiente de correlación  $R= 0.9374$  para el ambiente interior. Al inicio de la exposición de las muestras del material en ambientes exteriores, la pérdida de masa fue de  $0.034 \text{ g/m}^2$  con TOW de 990 horas. Al finalizar el año de ensayo se alcanzaron pérdidas de masa por  $0.191 \text{ g/m}^2$  con TOW de 5098 horas. Para el ambiente interior la pérdida de masa al inicio fue de  $0.007 \text{ g/m}^2$  y al final se alcanzaron pérdidas por  $0.018 \text{ g/m}^2$ .



**Figura 31.** Pérdida de masa en relación al TOW para el aluminio comercial en atmósfera Rural de Parrilla, Centro.

En la Figura 32 se compara el avance del proceso de corrosión (pérdida de masa) de las muestras de acero al carbono 1036, como función del tiempo de humectación (TOW), que recibieron las superficies de los metales expuestos durante el año del ensayo, en la atmósfera costera de Miramar, Centla.

Los datos de pérdida de masa siguen una tendencia lineal con un coeficiente de correlación  $R=0.8065$  para el ambiente exterior. La misma tendencia lineal con coeficiente de correlación  $R= 0.8952$  para el ambiente interior. Al inicio de la exposición de las muestras del material en ambientes exteriores, la pérdida de masa fue de  $0.089 \text{ g/m}^2$  con TOW de 834.16 horas. Al finalizar el año de ensayo se alcanzaron pérdidas de masa por  $0.373 \text{ g/m}^2$  con TOW de 5121.81 horas. Para el ambiente interior la pérdida de masa al inicio fue de  $0.018 \text{ g/m}^2$  y al final se alcanzaron pérdidas por  $0.036 \text{ g/m}^2$ .



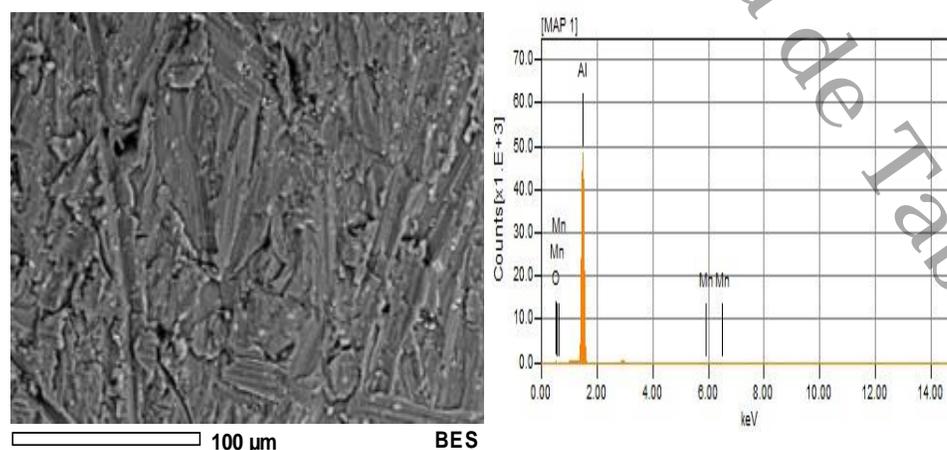
**Figura 32.** Pérdida de masa en relación al TOW para el aluminio comercial en atmósfera Costera de Miramar, Centla.

Las pérdidas de masa que se alcanzaron para el aluminio comercial fueron pequeñas, con relación a otros materiales. La capa pasiva que se forma de la alúmina permite que las pérdidas del material sean menos significativas que otros materiales. Para placas expuestas de aluminio comercial se considera que los contaminantes desempeñan un factor fundamental en el deterioro de estos, debido a que si la atmósfera no se encuentra contaminada, la humedad no genera variaciones en su proceso de corrosión (Sakaira *et al.*, 2014).

### 3.5 Microscopia electrónica de barrido

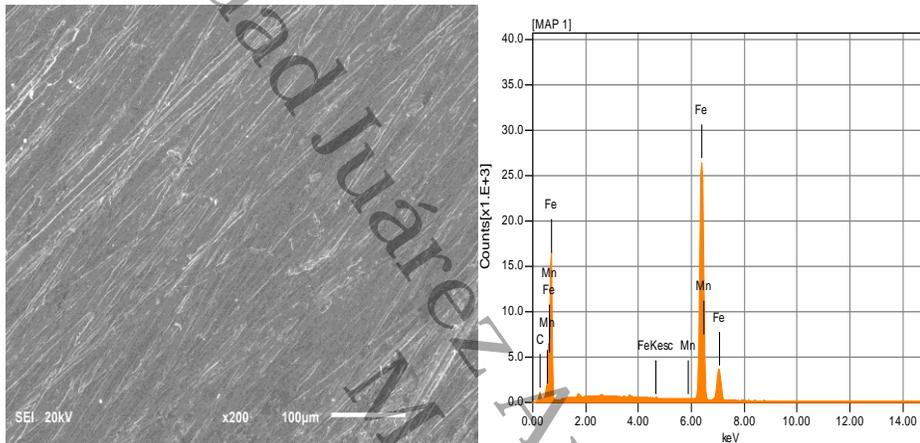
El estudio de la caracterización morfológica superficial de las muestras de aluminio y acero al carbono 1036, se realizó con el microscopio electrónico de barrido JEOL (SEM) de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la UJAT. De las muestras analizadas se obtuvo una micrografía, a partir de la cual se realizó la identificación de los productos de corrosión formados en el aluminio comercial y acero al carbono 1036.

En la Figura 33 se observa la micrografía de la muestra testigo del acero al carbono 1036, se encontró presencia de carbono en un 6.40%, hierro 93.38% y manganeso 0.22%. El testigo se observa limpio, libre de productos de corrosión generados por contaminantes como el  $\text{Cl}^-$  y  $\text{S}^+$ .



**Figura 33.** Micrografía y análisis EDS de la muestra testigo de acero al carbono 1036.

En la Figura 34 se presenta la micrografía de la muestra testigo del aluminio comercial, se observa en el análisis EDS que el 96.51% de la composición total corresponde al aluminio, 1.13% a manganeso y 2.36% de oxígeno. El testigo se observa limpio, libre de productos de corrosión generados por contaminantes como el cloro y azufre.

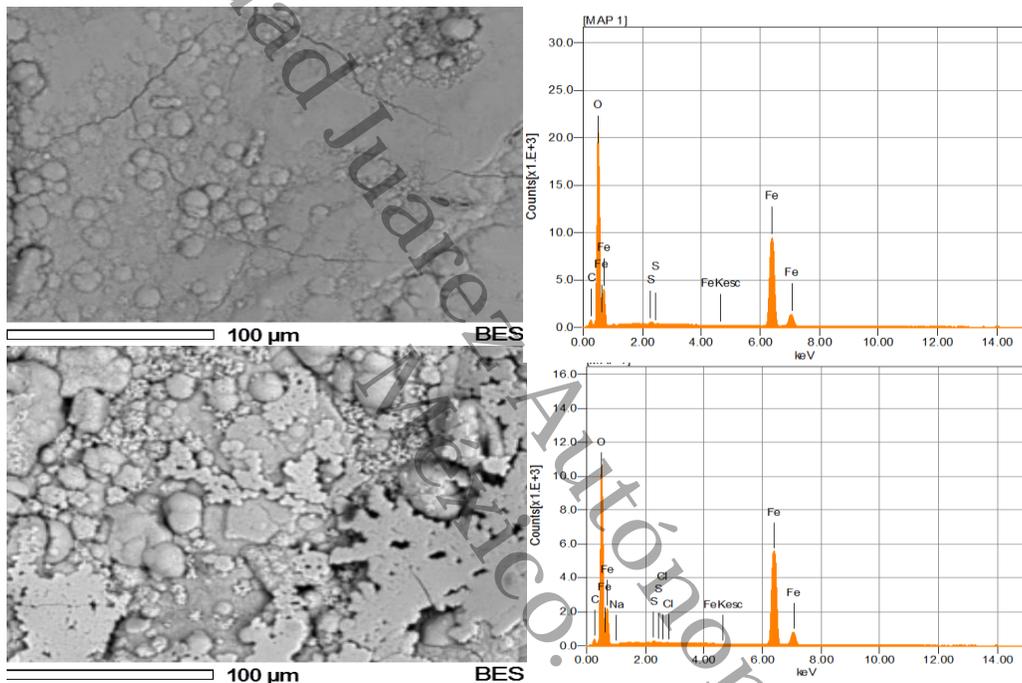


**Figura 34.** Micrografía y análisis EDS de la muestra testigo de aluminio.

### 3.5.1 Análisis SEM para probetas de acero al carbono 1036 en atmósfera costera

Las micrografías presentadas en la Figura 35 corresponden a los periodos de exposición Diciembre 2012-Febrero 2013 y Octubre-Diciembre 2013, del ambiente exterior de Miramar, Centla. Se observa la morfología de los productos de corrosión formados en una zona de la superficie del material., De acuerdo al análisis EDS se observó, durante todo el periodo de exposición presencia progresiva de Oxígeno alcanzando porcentajes máximos de 37.33%, cloro 3.09%, azufre 0.26%, y sodio 0.13%. La presencia de cloro es mayor que el azufre, generándose grietas, y ampollas en la superficie del material., Las morfologías de las superficies pueden variar considerablemente entre los diferentes sitios de exposición. La presencia de oxígeno de acuerdo al análisis EDS y la morfología de las muestras en las diferentes micrografías presentadas proveen la formación de óxidos, (FeO). Las grietas de la

capa de óxido observadas en las microfotografías, se considera típico debido a la agresividad del ambiente, permitiendo el fácil acceso de las especies corrosivas al sustrato metálico, y con ello el acelerado deterioro del material. Las capas de óxido compactas favorecen la protección del sustrato metálico (De la Fuente *et al.*, 2010).

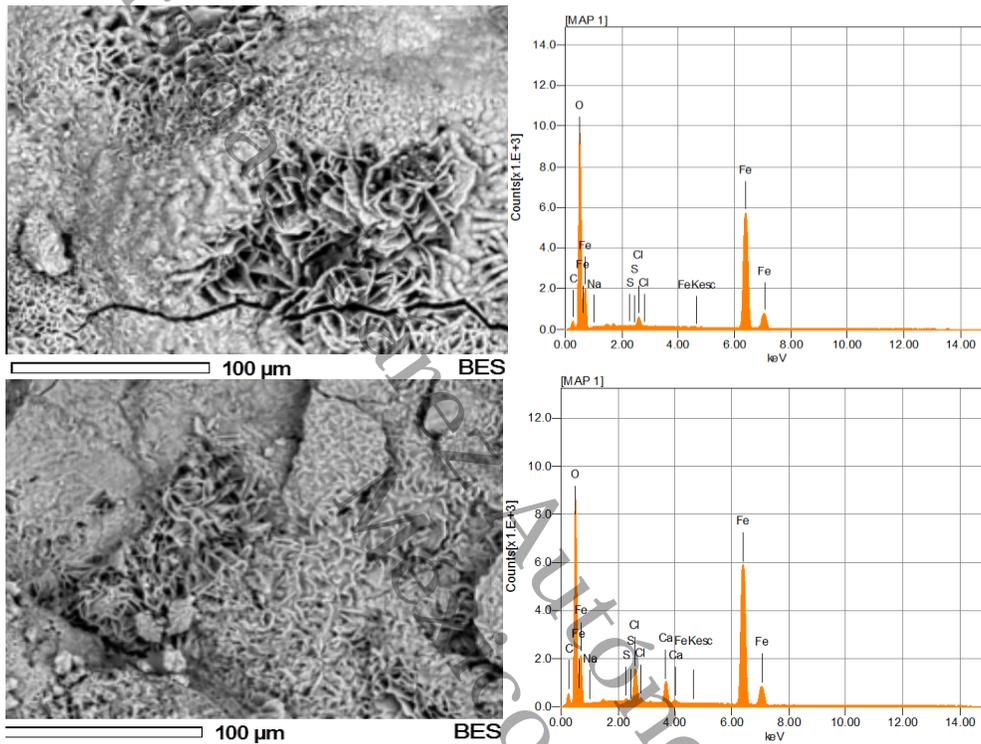


**Figura 35.** Micrografía y análisis EDS en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente exterior de Miramar, Centla.

En la Figura 36 se observan las microfotografías del ambiente interior de Miramar, Centla para el 1<sup>er</sup> y 6<sup>to</sup> periodo de exposición. De acuerdo al análisis EDS se observó, presencia progresiva de oxígeno alcanzando porcentajes máximos de 34.38%, cloro 0.99%, azufre 0.22%, y sodio 0.27%.

La mayor concentración continua siendo la de hierro en 52.11 %. La morfología de los productos de corrosión observados son pequeños glóbulos cristalinos o placas que con base a lo analizado por De la Fuente *et al.* (2010) en aceros de baja aleación estas estructuras corresponden a lepidrocita. De igual forma se observa

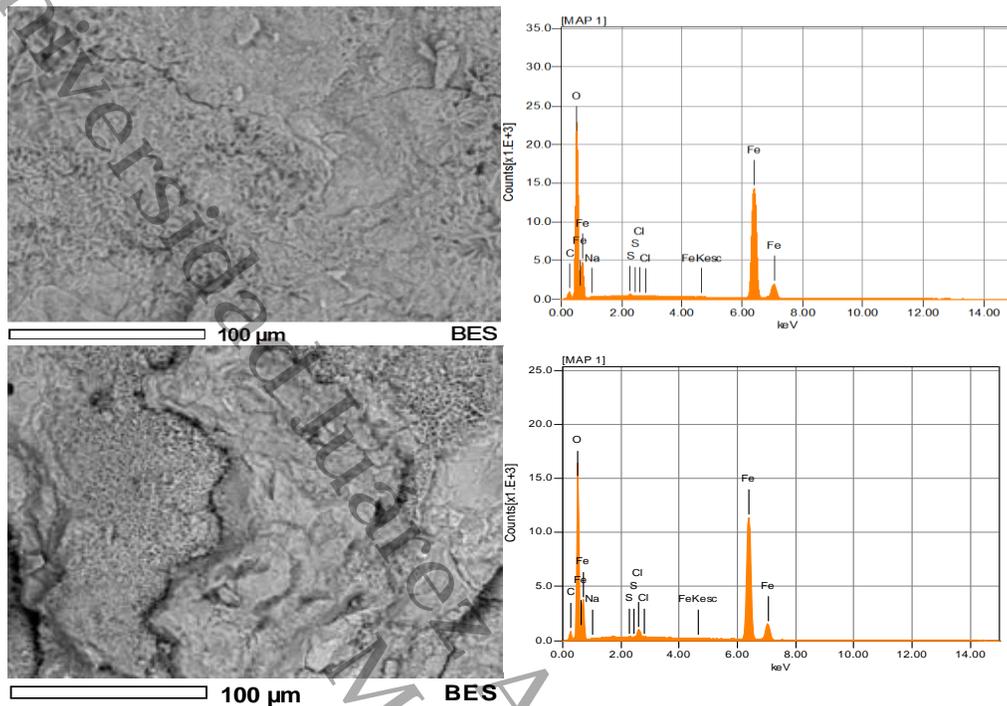
grietas en la superficie. La formación de escamas, es debida a la deposición de iones cloruro que se presenta en esa atmosfera.



**Figura 36.** Micrografía y análisis EDS en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente interior de Miramar, Centla.

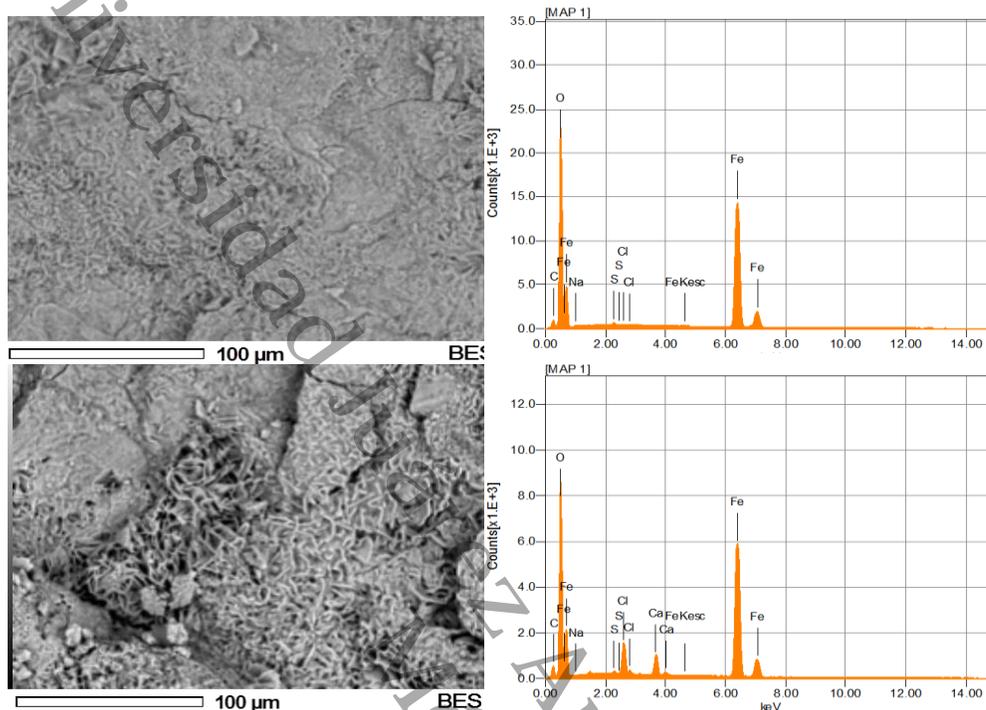
### 3.5.2 Análisis SEM para probetas de acero al carbono 1036 en atmósfera rural

La atmósfera rural de Parrilla, Centro en ambiente exterior presentó de acuerdo a las micrografías de la Figura 37, formación de ampollas en la superficie observada del material., de acuerdo al análisis EDS durante el periodo de exposición 40.66% oxígeno, interactuó con el acero al carbono 1036, lo que dio lugar a la formación de óxidos ferrosos, como producto del proceso de corrosión. Se observó la interacción de otros elementos tales como, 1.16% cloro y 0.23% azufre.



**Figura 37.** Micrografía y análisis EDS en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente exterior de Parrilla, Centro.

Para el ambiente interior de la estación de monitoreo ubicada en Parrilla, Centro se presentan las micrografías de la Figura 38. Se observan pequeñas grietas y escamas en la superficie del material analizado. De acuerdo al análisis EDS se observó, durante todo el periodo de exposición presencia progresiva de oxígeno alcanzando porcentajes máximos de 40.66%, cloro 1.16%, azufre 0.23%. La fase de hierro continúa siendo la mayoritaria.

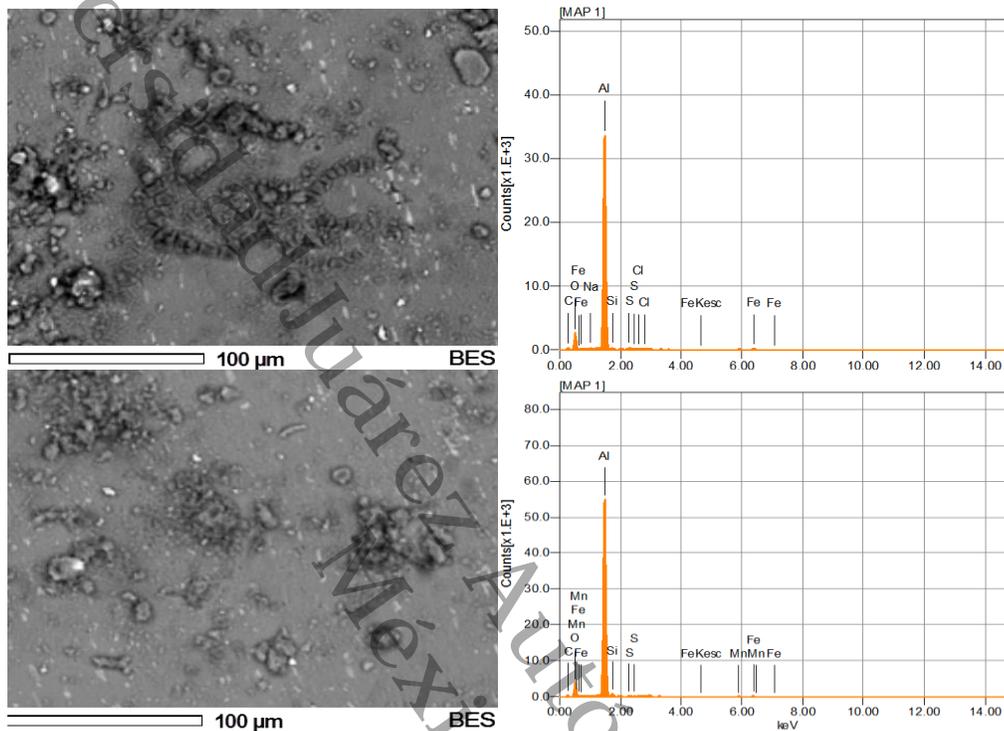


**Figura 38.** Micrografía y análisis EDS en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente interior de Parrilla, Centro.

### 3.5.3 Análisis SEM para probetas de aluminio comercial en atmósfera costera

En la Figura 39 se observan las micrografías SEM que presentan las muestras de aluminio comercial en sus primeras etapas de corrosión en la atmósfera costera de Miramar, Centla para ambientes exteriores. Las micrografías corresponden a los periodos de exposición Diciembre 2012-Febrero 2013 y Octubre-Diciembre 2013. De acuerdo al análisis EDS se observó, durante todo el periodo de exposición presencia progresiva de oxígeno alcanzando porcentajes máximos de 21.51%, cloro 0.11%, azufre 0.74%, y menor porcentaje elementos como el sodio, silicio y calcio, debido a las partículas de sal que se depositaron sobre la superficie del metal.

Si se considera el contenido de varios iones y la solubilidad de las sales para la formación de cationes (CaCl<sub>2</sub> y NaCl), se establece que estos jugaron un rol importante en los procesos de corrosión del aluminio comercial.



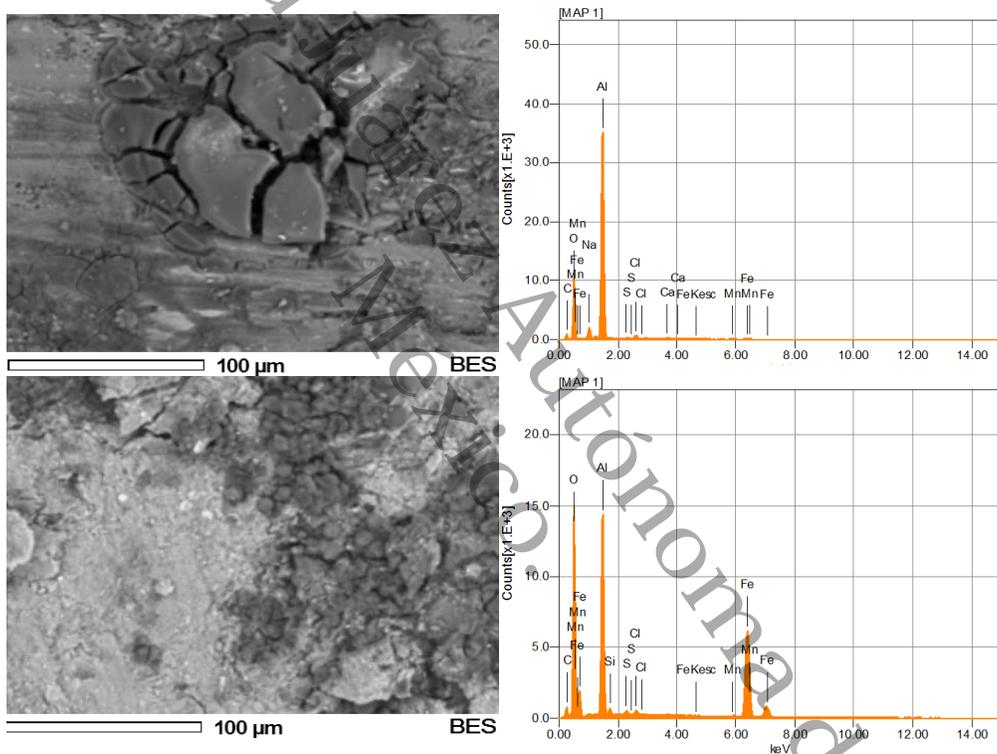
**Figura 39.** Micrografía y análisis EDS en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente exterior de Miramar, Centla.

Las micrografías que se muestran en la Figura 40 corresponden al aluminio comercial en el ambiente interior de Miramar, Centla. Se observa que en sus primeras etapas de corrosión se formaron ampollas por la interacción del oxígeno. Así mismo las zonas más claras que se presentan, corresponde a la presencia de cloro y potasio. De acuerdo al análisis EDS se observó, durante todo el periodo de exposición presencia progresiva de oxígeno alcanzando porcentajes máximos de 38.49%, y elementos como cloro, azufre, potasio, silicio y calcio.

La corrosión atmosférica del aluminio es generalmente localizada, con picaduras iniciales en la superficie del material, dejando áreas intactas en medio del metal.

Estas picaduras son debidas a la presencia de cloro. Cuando la atmósfera está contaminada de  $\text{SO}_2$  se forma sulfato de aluminio, precipitando en la superficie de metal. En las micrografías se observan la formación de productos de corrosión. (De la Fuente *et al.* 2010).

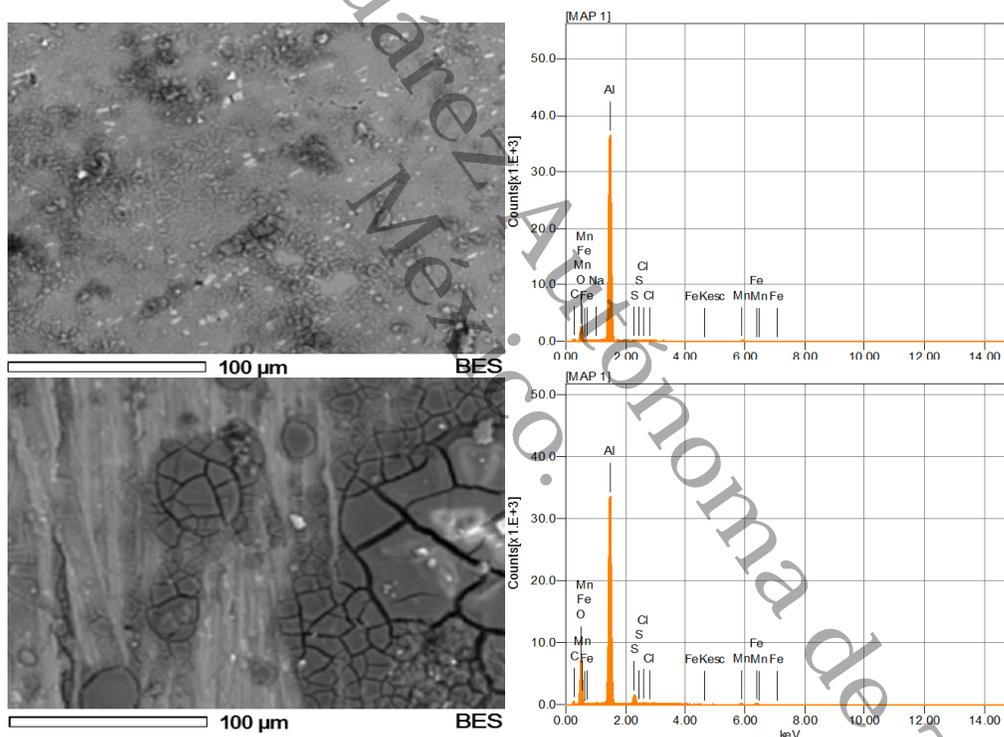
El comportamiento presentado por el aluminio en presencia de iones cloruros origina la formación de picaduras debido a que la película pasiva sufre rotura, provocando la disolución del material (Vera *et al.* 1998).



**Figura 40.** Micrografía y análisis EDS en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente interior de Miramar, Centla.

### 3.5.4 Análisis SEM para probetas de aluminio comercial en atmósfera Rural

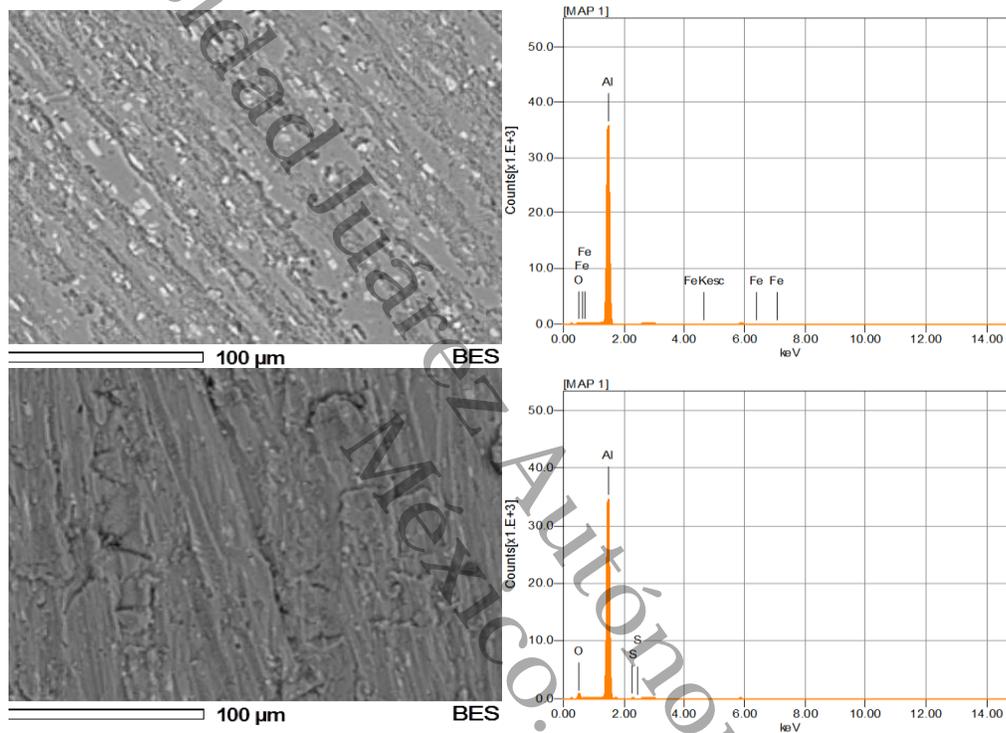
Las micrografías que se muestran en la Figura 41 corresponden al aluminio comercial en el ambiente exterior de Parrilla, Centro. En la superficie del material se observan ampollas como productos de corrosión. De acuerdo al análisis EDS se observó, durante el periodo de exposición presencia de oxígeno alcanzando porcentajes máximos de 36.46%, otros elementos encontrados fueron el azufre, cloro y potasio en pequeñas cantidades.



**Figura 41.** Micrografía y análisis EDS en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente exterior de Parrilla, centro.

Las micrografías que se muestran en la Figura 42 corresponden al aluminio comercial en el ambiente interior de Parrilla, Centro. En la superficie del material se observa la formación de la película pasiva de alúmina, la cual no presenta formación

de ampollas o productos de corrosión característicos de ambientes salinos, ya que el ambiente se encuentra con menor concentración de dichas sales. De acuerdo al análisis EDS se observó, durante el periodo de exposición presencia de oxígeno alcanzando porcentajes máximos de 10.25%, otro elemento encontrado en pequeñas concentraciones fue el azufre (0.39%).



**Figura 42.** Micrografía y análisis EDS en el primero y sexto periodo de exposición en ambiente interior de Parrilla, Centro.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de las condiciones ambientales, en las que fueron expuestos el acero al carbono 1036 y el aluminio comercial en dos atmósferas del estado de Tabasco, permiten establecer las siguientes conclusiones:

- La atmósfera costera de Miramar, Centla presentó la mayor categoría de contaminación por iones cloruros ( $S_2$ ), dentro de los dos puntos de monitoreo de esta investigación. Este comportamiento se debe principalmente a la presencia del aerosol marino que influye notablemente en el incremento de los valores. Los ambientes interiores presentaron menor velocidad de deposición del contaminante ( $S_1$ ).
- El  $SO_2$  captado en ambas estaciones de ensayo durante el tiempo de estudio, presentó una categoría de agresividad de  $P_0$  para ambientes interiores y exteriores.
- Los valores de humedad relativa promedio obtenidos en la noche fueron de 88.83% para la atmósfera rural de Parrilla, Centro y de 83.02% para Miramar, Centla. Por arriba del valor crítico de 80%, por lo que materiales como el acero al carbono 1036 y aluminio comercial, experimentan un súbito y notable incremento en la velocidad de corrosión. Esta situación se agudiza con atmósferas contaminadas de  $SO_2$  y  $Cl^-$ .
- El análisis del complejo Temperatura-Humedad Relativa indicó que para la atmósfera de Parrilla, Centro, 5098 horas fue el tiempo en el cual los materiales se mantuvieron con una película de humedad, lo que propicia su deterioro. Para la atmósfera de Miramar, Centla fue de 5122 horas.
- El acero al carbono 1036 tuvo mayor desgaste en el ambiente exterior de la atmósfera costera de Miramar, Centla, alcanzando velocidades de corrosión

de 3186.14 g/m<sup>2</sup>a y categoría C<sub>x</sub> considerada como extremadamente agresiva de acuerdo a la norma ISO 9223.

- El aluminio comercial tuvo mayores velocidades de corrosión en el ambiente interior de Miramar, Centla, alcanzando una categoría de C<sub>x</sub> considerada altamente agresiva. Este comportamiento se debió a que los iones cloruro permanecen durante mayor tiempo en la película pasiva que se forma en el metal, generando formación de picaduras que propician la disolución alcalina de la alúmina pasiva y una rápida corrosión generalizada.
- El análisis SEM para las placas de acero al carbono 1036, y aluminio comercial demostró para la atmósfera costera y rural presencia progresiva de contaminantes cloro y azufre, así como capas de óxido compactas en forma de escamas, ampollas y grietas características del ataque de los iones cloruro.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcántara J., Chico B., Díaz I., De la Fuente D., Morcillo M. 2015. Airbone Chloride deposit and its effect on marine atmospheric corrosión of mild Steel. Corrosion Science (2015). Artículo en impresión.

Alvarez J, F. y Pridybailo G. 2008. Corrosión atmosférica en ambientes abrigados en Limón, Costa Rica, en el marco del proyecto TROPICORR. Tecnología en Marcha. Vol 21-3, Págs 84-91.

Badea G, E., Cret P., Lolea M., Setel. A. 2011. Studies of carbon steel corrosion in atmospheric conditions. Acta Technica Corviniensis. Tome IV:25-28.

Blücher B, D., Svensson J, E., Johansson L, G. 2006. The influence of CO<sub>2</sub>, AlCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O, MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O, NaSO<sub>4</sub> and NaCl on the atmospheric corrosion of aluminum. Corrosion Science 48 (2006) 1484-1866.

Castaño J, G., Botero C., Peñaranda S. 2007. Corrosión atmosférica del zinc en ambientes exteriores e interiores. Revista de metalurgia, 43 (2): 133-145.

Corvo F., Pérez T., Dzib L., Castañeda A., González E., Pérez. J. 2007. Outdoor–indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres. Corrosion Science 50 (2008) 220–230.

Corvo F., Torrens A., Martín Y., González E., Pérez J., Valdés. C., Castañeda A., Portilla C. 2008. Corrosión atmosférica del acero en interiores: Sus particularidades en el clima tropical de Cuba. Revista de metalurgia, 44 (2): 129-137.

Del Ángel E., Frías D., Falconi R., López F., Rueda de León J. 2008. Corrosión atmosférica del acero galvanizado en Cunduacán, Tabasco. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Semana de Divulgación y videos Científico, 731-736.

Del Ángel E., Veleva L., Acosta A. 2009. Agresividad atmosférica basada en el tiempo de humectación del clima tropical húmedo del estado de Tabasco. Universidad y Ciencia: Trópico Húmedo 5(2):111-120.

De la Fuente D., Díaz I., Simancas J., Chico B., Morcillo M. 2011. Long-term atmospheric corrosion of mild Steel. Corrosion Science. 53:604-617.

Echeverría A., Jacomino C., González S. 2000. Influencia de la corrosión atmosférica en la industria azucarera cubana. Centro Azúcar. Págs 83-86.

Echeverría B., Echeverría A., Boán M., Echeverría C., Benavides S., Petersson M., Bentancourt S. 2009. Determinación de iones cloruro y sulfato en un mismo captador en investigaciones de corrosión atmosférica. Revista CENIC Ciencias Químicas, Vol. 40, No. 1:11-16.

Flores J., Valdez B., Schorr M. 2003. Cabina de investigación de corrosión para la industria electrónica en interiores. Revista de Ingeniería. Vol Vi, No. 21. Pags 33-37.

Gil H., Calderón J., A., Buitrago C., P., Echavarría A., Echeverría F. 2010. Indoor atmospheric corrosion of electronic materials in tropical-mountain environments. Corrosion Science 52 (2010) 327-337.

Góngora A. 2010. Tesis de maestría. Influencia de parámetros ambientales en la degradación de materiales de interés histórico e industrial en tres microclimas del estado de Campeche. Facultad de Ciencias Químico Biológicas.

International Standard 8565. Metals and alloys - Atmospheric corrosion testing - General requirements for field tests.

International Standard 9223. Corrosion of metals, and alloys - Corrosivity of atmospheres – Classification.

International Standard 9226. Corrosion of metals, and alloys - Corrosivity of atmospheres – Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity.

López A., Echeverría L. 2010. Corrosión atmosférica en obras de alta protección en Matanzas. CD de Monografías. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”.

Leygraf C., Graedel T. 2000. Atmospheric Corrosion. The Electrochemical Society, INC. Pennington, New Jersey. 347 pp.

Muñoz R. y Uruchurtu J. 2001. Caracterización de la agresividad atmosférica sobre los materiales metálicos estructurales en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Rev. Int. Contam. Ambient. 18 (1): 27-32.

Rivero S., Chico B., De la Fuente D., Morcillo M. 2007. Corrosión atmosférica del acero bajo en carbono en un ambiente marino polar: Estudio del efecto del régimen de vientos. Revista de metalurgia, 43 (5): 370-383.

Roldan A. 2011. Tesis de licenciatura. Determinación de la corrosividad en puntos de alta contaminación atmosférica de la ciudad de Quito. Facultad de Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Nacional.

Sakaira M., Sasaki R., Kaneko A., Seki Y., Nagasawa D. 2014. Evaluation of metal cation effects on galvanic corrosion behavior of the A5052 aluminum alloy in low chloride ion containing solutions by electrochemical noise impedance. Corrosion Science 131 (2014) 123-129.

Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals. ASTM International G-50.

Tejero M., Del Ángel E., Bautista R., Hernández N. 2014. Corrosividad atmosférica del cobre y del acero en dos localidades de Villahermosa, Tabasco. Ingenierías Investigación y Tecnología. Volumen XVI (Número 2) 197-206.

Tidblad J. 2012. Atmospheric corrosion of metals in 2010-2039 and 2070-2099. Elsevier. Atmospheric Environment 55: 1-6.

Veleva L., Acosta M., Meraz E. 2009. Atmospheric corrosion of zinc induced by runoff. Corrosion Science 51: 2055-2062.

Veleva L. y Valdez B., 2008. Atmospheric corrosion of electro-electronics metals in urban desert simulated indoor environment. Corrosion Engineering, Science and Technology vol 43, No 2:149-155.

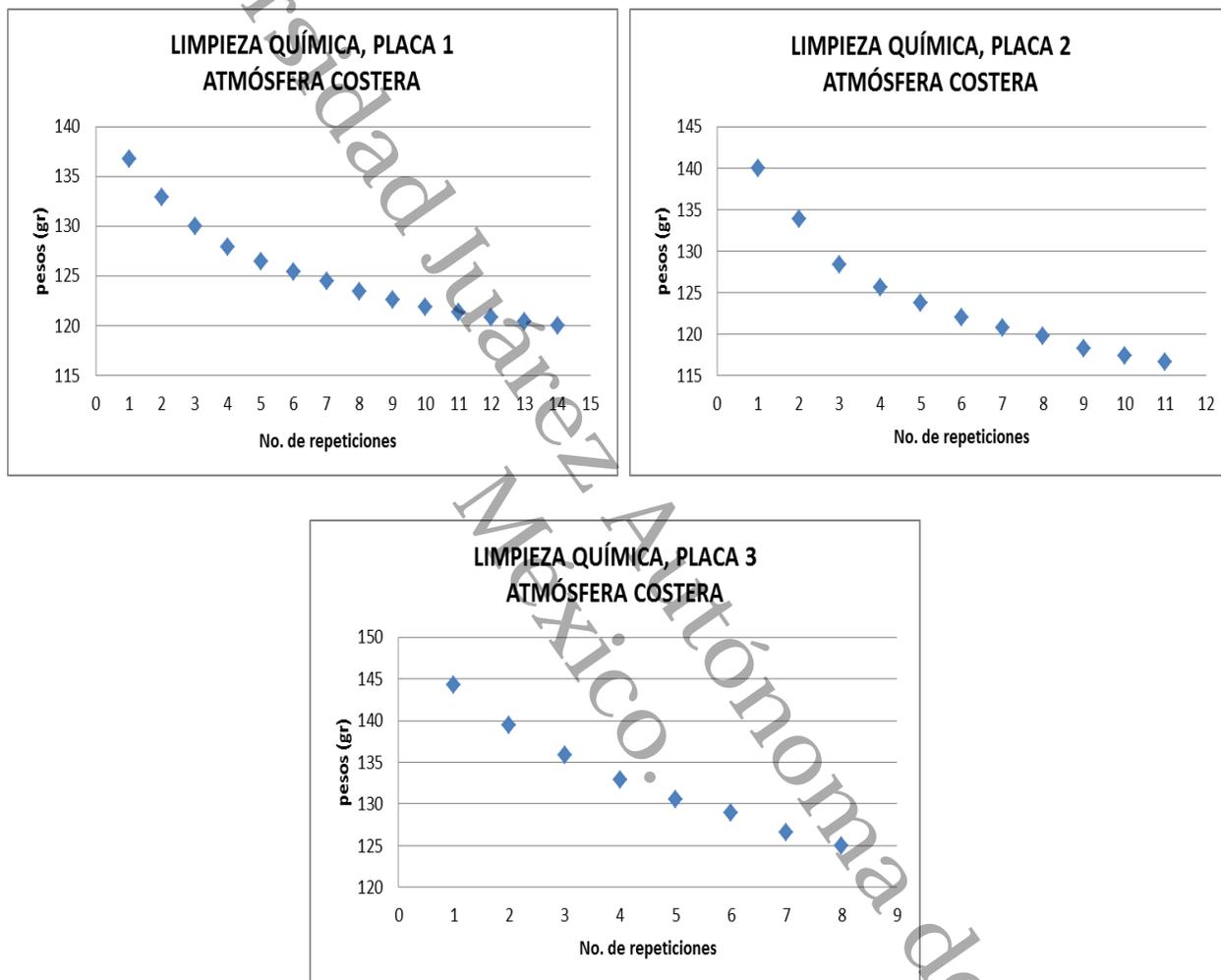
Vera R., Chrebler R., Layana G., Orellana F., Olguín A. 1998. Corrosión por picaduras del aluminio y de la aleación Al-6201 en soluciones de NaCl. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Págs 268-273.

Villaseñor H. 2009. Tesis de licenciatura. Influencia de contaminantes atmosféricos en diferentes regiones del estado de Campeche. Facultad de Ciencias Químico Biológicas.

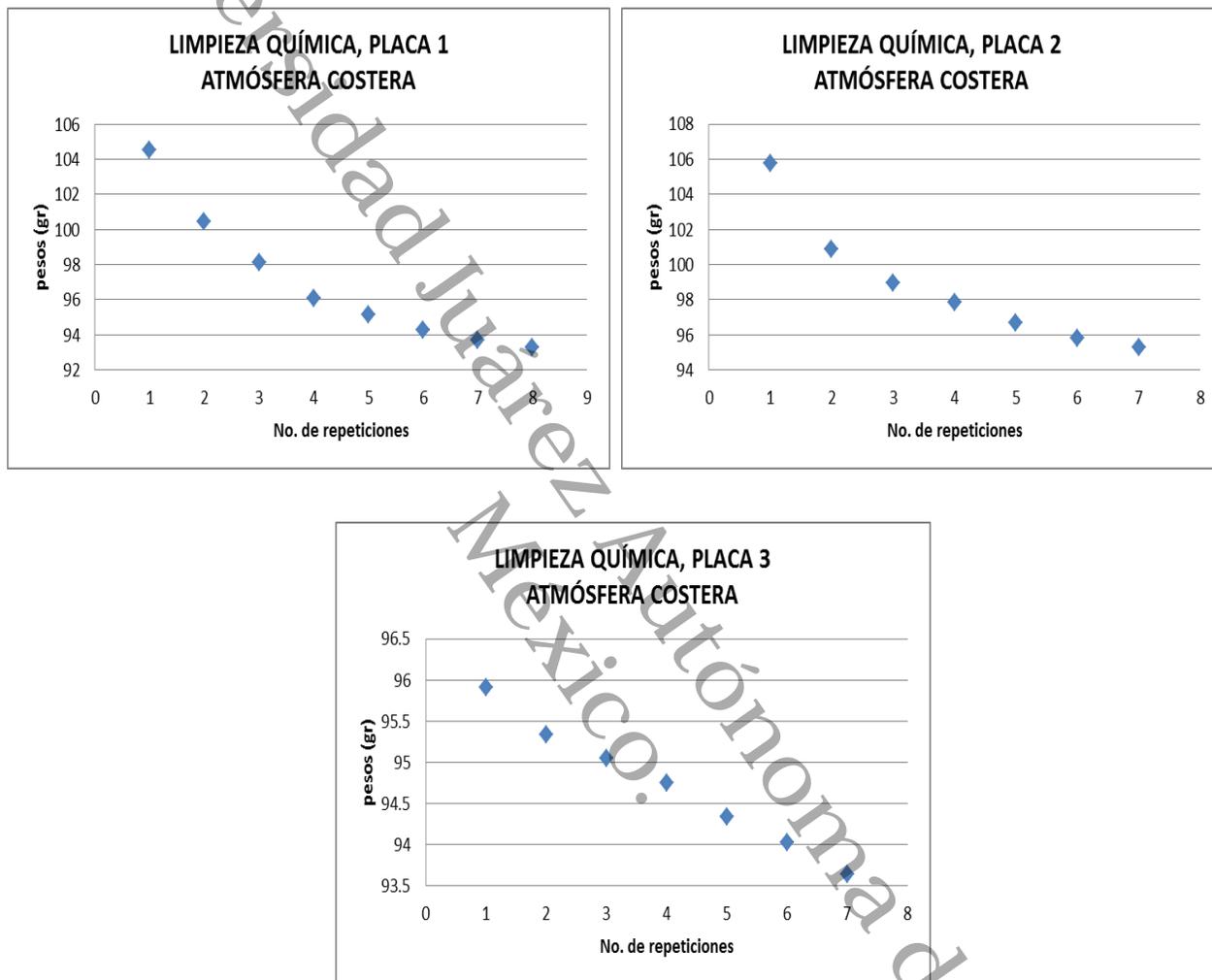
Yuntai Ma. y Ying L., F. W. 2010. The atmospheric corrosion kinetics of low carbon steel in a tropical marine environment. Corrosion Science. 52:1796-1800.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

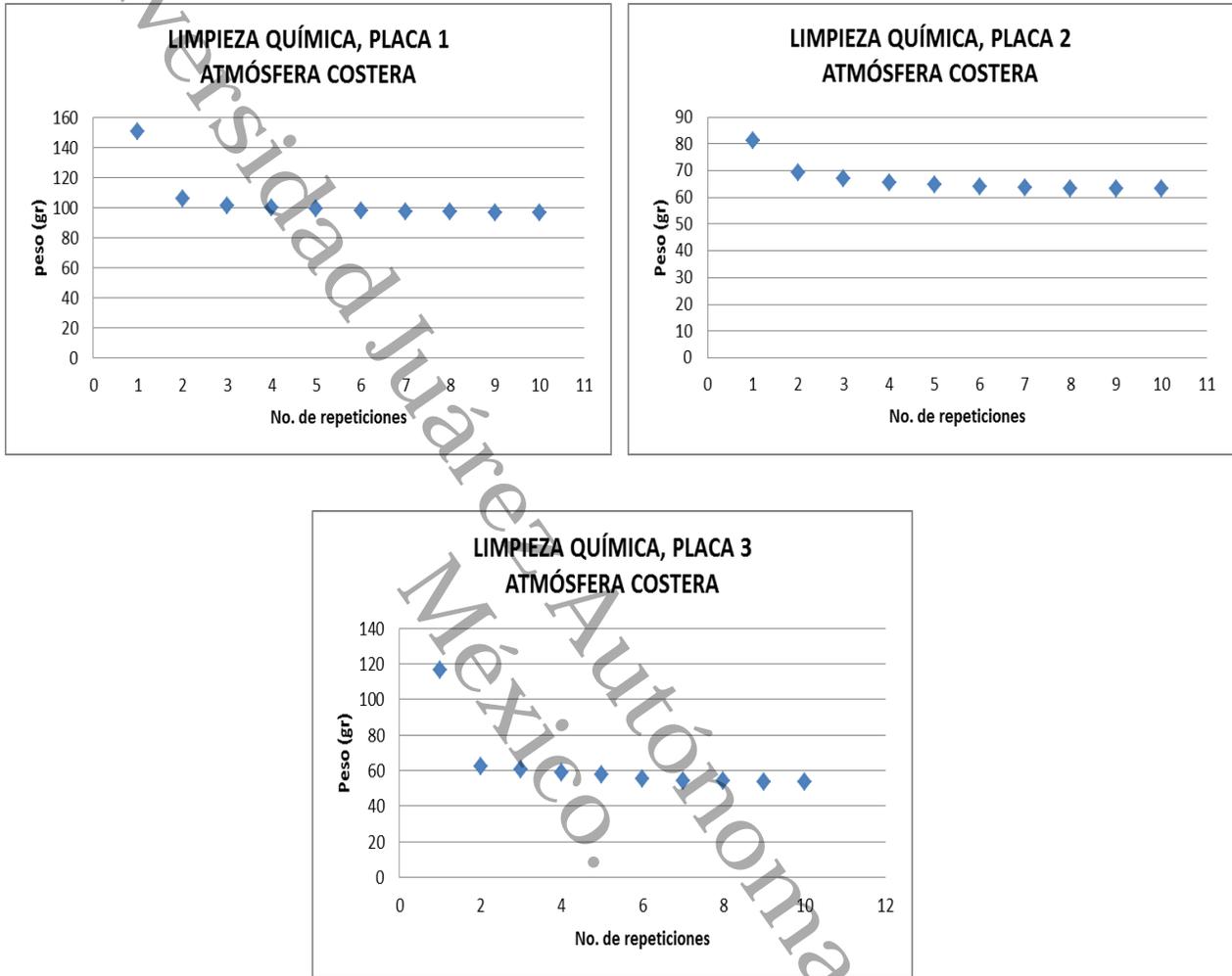
**ANEXO A: PÉRDIDA DE MASA DEL ACERO AL CARBONO 1036  
ATMÓSFERA COSTERA EXTERIOR**



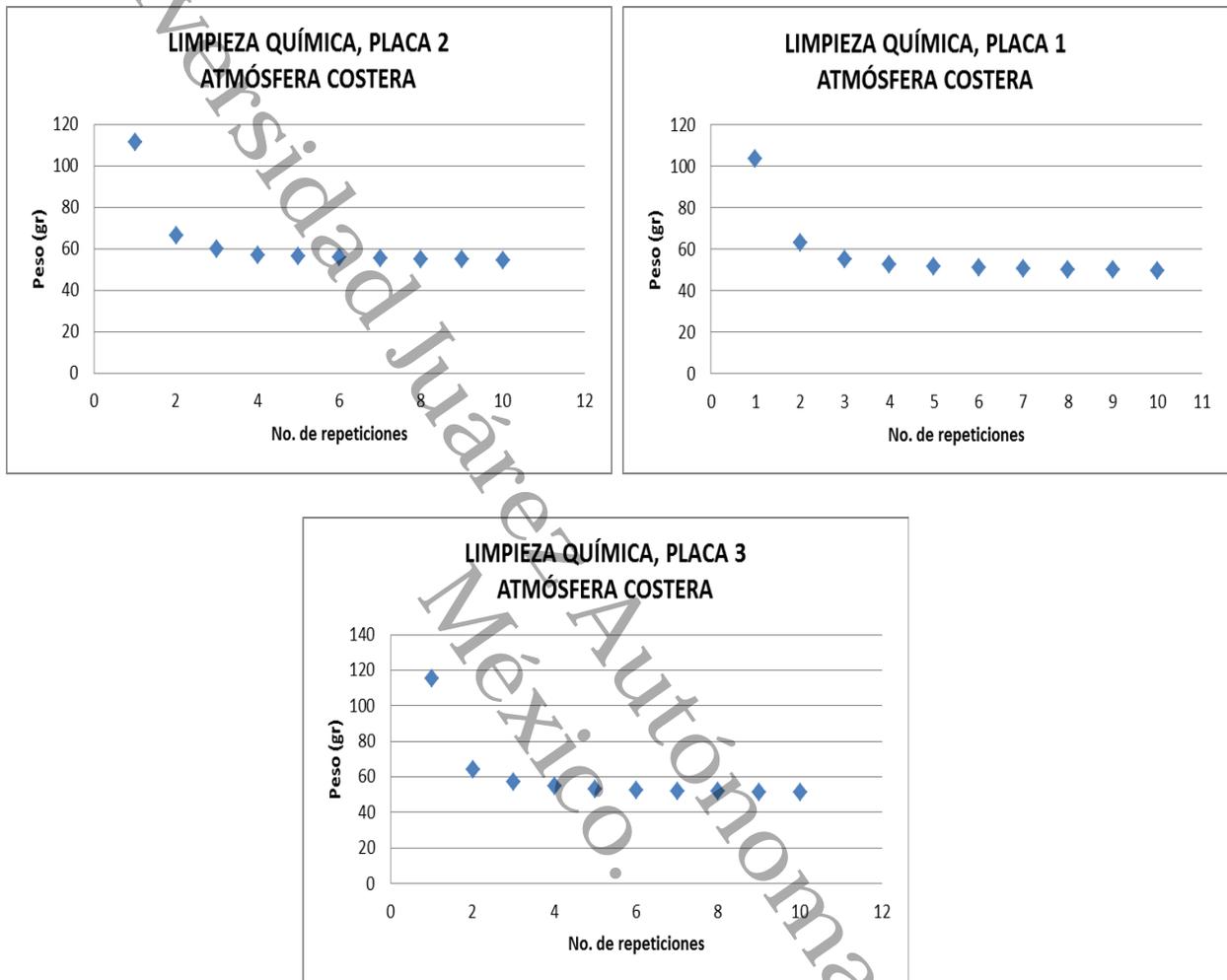
**Figura 43.** Comportamiento de la pérdida de masa, durante la limpieza química de las placas en el primer periodo de evaluación.



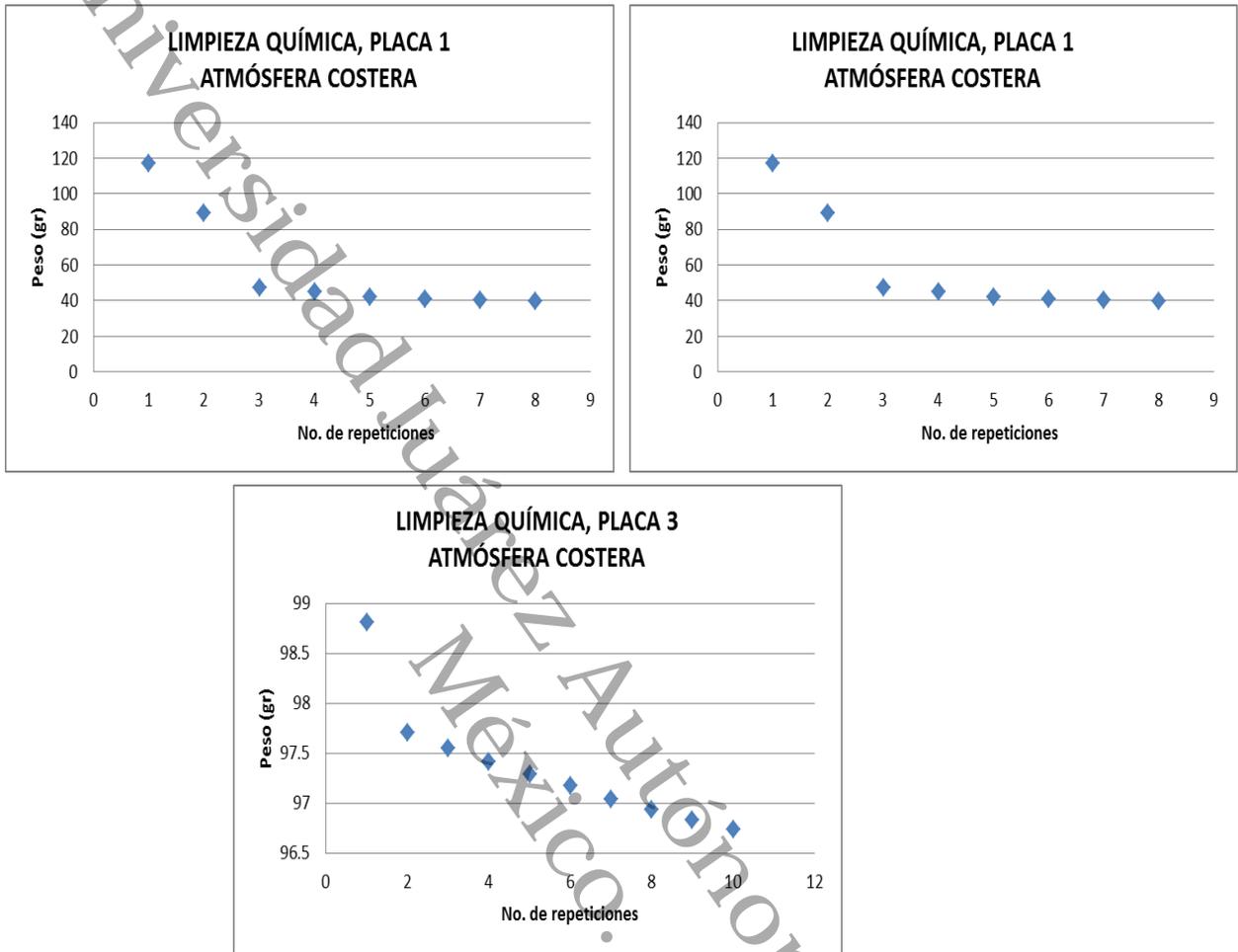
**Figura 44.** Comportamiento de la pérdida de masa, durante la limpieza química de las placas en el segundo periodo de evaluación.



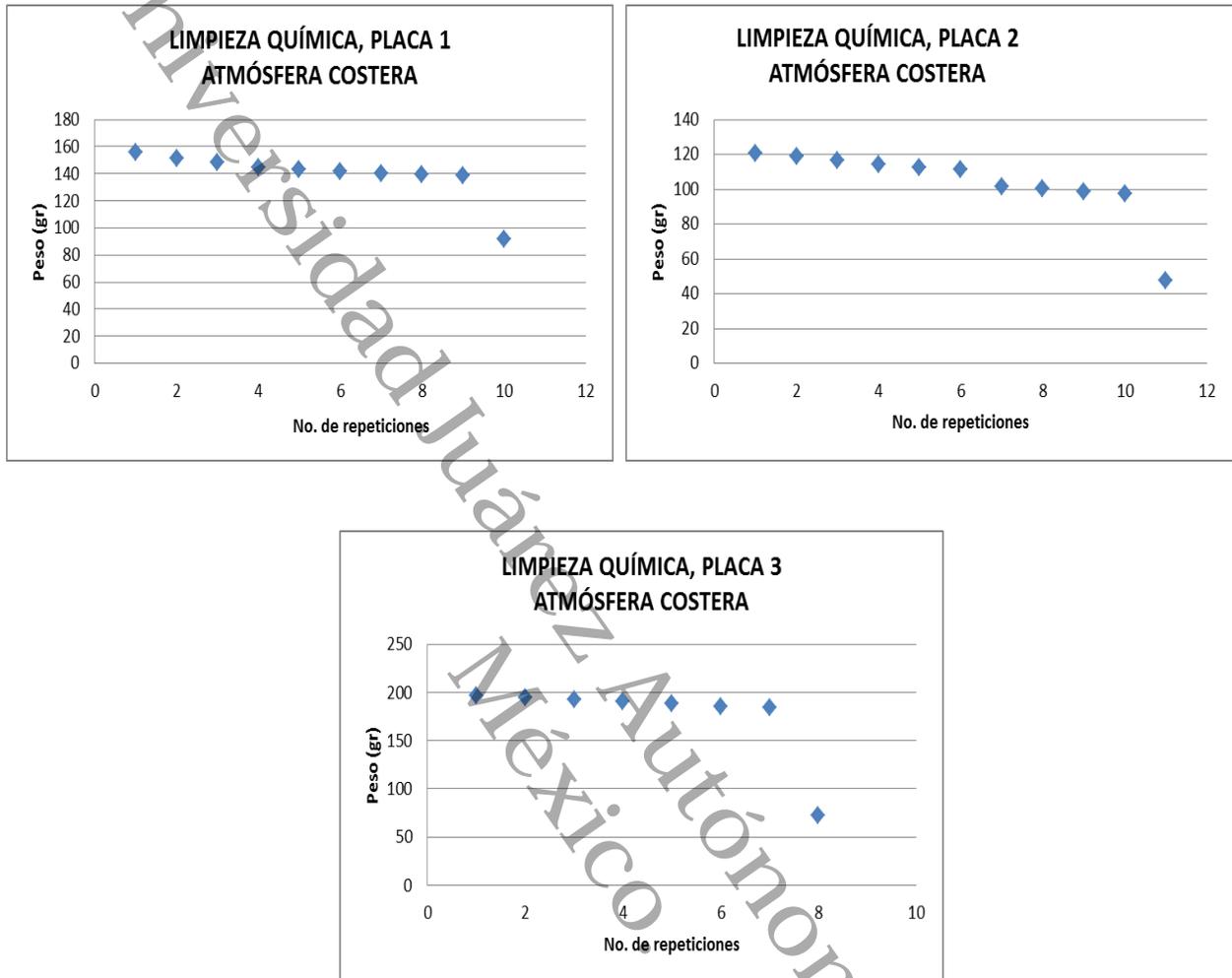
**Figura 45.** Comportamiento de la pérdida de masa, durante la limpieza química de las placas en el tercer periodo de evaluación.



**Figura 46.** Comportamiento de la pérdida de masa, durante la limpieza química de las placas en el cuarto periodo de evaluación.



**Figura 47.** Comportamiento de la pérdida de masa, durante la limpieza química de las placas en el quinto periodo de evaluación.



**Figura 48.** Comportamiento de la pérdida de masa, durante la limpieza química de las placas en el sexto periodo de evaluación.

**ANEXO B: DATOS DE TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA Y  
PRECIPITACIONES OBTENIDAS DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE  
LA CONAGUA.**

**Tabla 5.** Temperaturas obtenidas de las estaciones de monitoreo de la CONAGUA, de 06:00 a 19:00 hrs para el día y de 18:59 a 05:59 hrs para la noche.

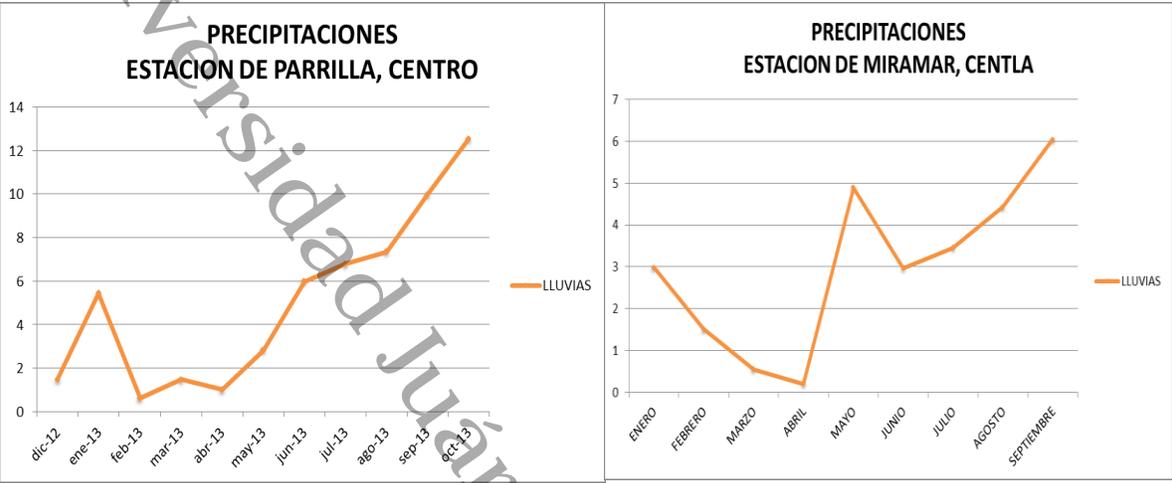
MES	NOCHE	DÍA	promedio
dic-12	23.7030858	24.5583238	24.1307048
ene-13	22.3681712	23.2807305	22.8244508
feb-13	24.1643189	25.6322834	24.8983012
mar-13	24.9326795	23.6931255	24.3129025
abr-13	26.9388	28.3963	27.66755
may-13	27.459288	28.425169	27.9422285
jun-13	27.7291751	28.7285719	28.2288735
jul-13	27.599465	28.4533543	28.0264096
ago-13	27.5546704	27.9706817	27.7626761
sep-13	27.8089504	28.1419145	27.9754325
oct-13	29.3516528	27.8357278	28.5936903
nov-13	25.4731836	25.612387	25.5427853
dic-13	20.9032258	27.2258065	24.0645161

**Tabla 6.** Humedad Relativa obtenidas de las estaciones de monitoreo de la CONAGUA.

<b>CENTLA</b>		
	<b>NOCHE</b>	<b>DÍA</b>
Dic	84.8986569	80.6956265
Ene	88.4398564	82.645614
Feb	83.3578188	76.1510703
Mar	78.4626016	71.8213879
Abr	77.7043147	72.0796719
May	78.9061	75.2438
Jun	78.5618953	75.3660547
Jul	80.2678607	77.7341871
Ago	82.6153848	81.6673634
Sep	85.2712165	82.6118194
Oct	83.930392	84.1271391
Nov	87.2394109	86.9666524
Dic	89.6910017	87.7608132
	<b>83.0266547</b>	<b>79.6054769</b>

<b>PARRILLA II, CENTRO</b>		
	<b>DÍA</b>	<b>NOCHE</b>
Dic	76.854761	86.2429708
Ene	83.7340054	91.5166629
Feb	76.6214286	90.7152015
Mar	73.0293662	88.2216708
Abr	68.5293939	83.5797009
May	71.7888889	85.7035867
Jun	76.58659	88.3380757
Jul	76.1412186	87.7529915
Ago	79.1734767	90.2178547
Sep	84.5169444	92.542735
Oct	84.1895161	92.3760004
	<b>77.3787</b>	<b>88.837</b>

**Figura 49.** Comportamiento de las precipitaciones obtenidas de las estaciones de monitoreo de la CONAGUA.



**ANEXO C: CATEGORIAS DE AGRESIVIDAD PROPUESTAS POR ISO 9223.**

**Tabla 7.** Categorías de acuerdo a ISO 9223 del contaminante SO<sub>2</sub> y NaCl.

TIPO DE CONTAMINANTE					
DIÓXIDO DE AZUFRE	CATEGORIA	$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
	VELOCIDAD DE DEPOSICIÓN DE SO <sub>2</sub> mg/(m <sup>2</sup> .d)	$P_d \leq 10$	$10 < P_d \leq 35$	$35 < P_d \leq 80$	$80 < P_d \leq 200$
	CONCENTRACIÓN DE SO <sub>2</sub> µg/m <sup>3</sup>	$P_c \leq 12$	$12 < P_c \leq 40$	$40 < P_c \leq 90$	$90 < P_c \leq 250$
CLORURO DE SODIO	CATEGORIA	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
	VELOCIDAD DE DEPOSICIÓN DEL Cl mg/(m <sup>2</sup> .d)	$S \leq 3$	$3 < S \leq 60$	$60 < S \leq 300$	$300 < S \leq 1500$

**Tabla 8.** Categorías de acuerdo a ISO 9223 de la velocidad de corrosión de acuerdo al tipo de material expuesto.

CATEGORIA	CORROSIVIDAD	UNIDADES	ACERO AL CARBONO	ZINC	COBRE	ALUMINIO
C1	MUY BAJA	g/(m <sup>2</sup> .a)	$v_{corr} \leq 10$	$v_{corr} \leq 0,7$	$v_{corr} \leq 0,9$	DESPRECIABLE
		µm/a	$v_{corr} \leq 1,3$	$v_{corr} \leq 0,1$	$v_{corr} \leq 0,1$	----
C2	BAJA	g/(m <sup>2</sup> .a)	$10 < v_{corr} \leq 200$	$0,7 < v_{corr} \leq 5$	$0,9 < v_{corr} \leq 5$	$v_{corr} \leq 0,6$
		µm/a	$1,3 < v_{corr} \leq 25$	$0,1 < v_{corr} \leq 0,7$	$0,1 < v_{corr} \leq 0,6$	----
C3	MEDIA	g/(m <sup>2</sup> .a)	$200 < v_{corr} \leq 400$	$5 < v_{corr} \leq 15$	$5 < v_{corr} \leq 12$	$0,6 < v_{corr} \leq 2$
		µm/a	$25 < v_{corr} \leq 50$	$0,7 < v_{corr} \leq 2,1$	$0,6 < v_{corr} \leq 1,3$	----
C4	ALTA	g/(m <sup>2</sup> .a)	$400 < v_{corr} \leq 650$	$15 < v_{corr} \leq 30$	$12 < v_{corr} \leq 25$	$2 < v_{corr} \leq 5$
		µm/a	$50 < v_{corr} \leq 80$	$2,1 < v_{corr} \leq 4,2$	$1,3 < v_{corr} \leq 2,8$	----
C5	MUY ALTA	g/(m <sup>2</sup> .a)	$650 < v_{corr} \leq 1500$	$30 < v_{corr} \leq 60$	$25 < v_{corr} \leq 50$	$5 < v_{corr} \leq 10$
		µm/a	$80 < v_{corr} \leq 200$	$4,2 < v_{corr} \leq 8,4$	$2,8 < v_{corr} \leq 5,6$	----

**ANEXO G: REACTIVOS QUÍMICOS PARA LIMPIEZA QUÍMICA PROPUESTOS  
POR ISO 8407.**

**Tabla 9.** Sustancias químicas propuestas por ISO 8407, para realizar la limpieza química de los materiales.

MATERIAL	REACTIVOS QUÍMICOS	TIEMPO (min)	TEMPERATURA (°C)
Acero	500 ml de HCl ( $\rho=1,10$ g/ml) 3.5 g de hexametil teramina 1000 ml de agua destilada	10	20 a 25
Cobre	200 g de trióxido de cromo 1000 ml de agua destilada	1	80
Zinc	54 ml de ácido sulfúrico ( $\rho=1,84$ g/ml) 1000 ml de agua destilada	30 a 60	40 a 50
Aluminio	50 ml de ácido fosfórico ( $\rho=1,69$ g/ml) 20 g de trióxido de cromo 1000 ml de agua destilada	5 a 10	90 a 95
	Ácido nítrico ( $\rho=1,42$ g/ml)	1 a 5	20 a 25

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.