

## CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO, ACERO GALVANIZADO Y ALUMINIO EN DIFERENTES ATMÓSFERAS COLOMBIANAS

### Atmospheric corrosion of carbon steel, galvanized steel and aluminium exposed in Colombian atmospheres

#### RESUMEN

En un país tan extenso y de tanta diversidad geográfica como Colombia no se había realizado un estudio de corrosión atmosférica que incluyese ambientes de diferente agresividad. En este trabajo se evaluó el comportamiento del acero al carbono, acero galvanizado y aluminio expuestos durante 8 meses en 21 sitios colombianos de diferente agresividad. Además, se realizó una clasificación bimensual de las atmósferas utilizando la técnica CLIMAT. Finalmente, se correlacionaron las velocidades de corrosión halladas en los distintos materiales con variables atmosféricas medidas en los sitios de muestreo como temperatura, humedad relativa y concentración de cloruros y sulfatos.

**PALABRAS CLAVES:** Acero al carbono, acero galvanizado, aluminio, clasificación atmosférica, CLIMAT, corrosión atmosférica.

#### ABSTRACT

*In Colombia, a country with a wide geographical diversity, it has not been yet performed an atmospheric corrosion study including sites with different aggressiveness. In this paper, behavior of carbon steel, galvanized steel and aluminium exposed during 8 months in 21 Colombian sites of different aggressiveness was evaluated. Furthermore, using CLIMAT method, a bimonthly classification of atmospheres was made. Finally, corrosion rate of materials were correlated with atmospheric parameters measured in test sites as temperature, relative humidity, and sulphates and chlorides concentration..*

**KEYWORDS:** carbon steel, galvanized steel, Aluminium, atmospheric classification, CLIMAT, atmospheric corrosion.

#### ESTEBAN CORREA BEDOYA

Estudiante Ingeniería de Materiales  
Auxiliar de Investigación  
Grupo de Corrosión y Protección  
Universidad de Antioquia  
estebancorrea@udea.edu.co

#### CARLOS BOTERO VEGA

Ingeniero de Materiales  
Estudiante de Maestría  
Grupo de Corrosión y Protección  
Universidad de Antioquia  
ecabv949@udea.edu.co

#### ALEX H. RESTREPO

Estudiante de Maestría en Ingeniería  
de Materiales.  
Grupo de Corrosión y Protección.  
Universidad de Antioquia.  
oahrc797@udea.edu.co

#### JUAN DELGADO L.

Estadístico, M.Sc.  
Investigador  
Grupo de Corrosión y Protección  
Universidad de Antioquia  
jdelgado@udea.edu.co

#### JUAN G. CASTAÑO

Ingeniero Metalúrgico, Ph.D.  
Investigador  
Grupo de Corrosión y Protección  
Universidad de Antioquia  
jcasta@udea.edu.co

#### FÉLIX ECHEVERRÍA E.

Ingeniero Metalúrgico, Ph.D.  
Investigador  
Grupo de Corrosión y Protección  
Universidad de Antioquia  
fecheve@udea.edu.co

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde principios del siglo XX vienen desarrollándose estudios sistemáticos de corrosión atmosférica de distintos materiales en numerosos países. Por ello, en la actualidad es bien conocido el fenómeno de corrosión

atmosférica de los aceros y el aluminio; materiales que por su importancia ingenieril componen gran parte de las infraestructuras expuestas a la atmósfera. De la misma manera se conoce aceptablemente la influencia de los diferentes parámetros atmosféricos sobre dicho fenómeno [1-9].

Sin embargo, la corrosión atmosférica es un proceso sumamente complejo, y altamente sensible a las condiciones atmosféricas de cada sitio particular, por lo que se hace arriesgado realizar generalizaciones y predicciones, cuando se pretende extrapolar lo que ocurre en un sitio a otro de condiciones diferentes [2,5,10].

Bajo este panorama, muchas empresas que poseen grandes infraestructuras expuestas frente a distintas atmósferas, como es el caso de las empresas del sector eléctrico, necesitan conocer el impacto de la corrosividad atmosférica sobre los materiales que componen tales infraestructuras.

En este trabajo se presenta una evaluación del comportamiento frente a la corrosión atmosférica de acero al carbono, acero galvanizado y aluminio, expuestos durante 8 meses en 21 sitios de muestreo. Los sitios de muestreo fueron elegidos mediante análisis estadísticos de agrupamiento aplicados a datos meteorológicos históricos de puntos ubicados a lo largo del país, y los materiales fueron expuestos siguiendo los lineamientos de la norma ASTM G-50 [11]. Además se realiza una clasificación bimensual de las atmósferas según su corrosividad siguiendo la técnica CLIMAT o alambre sobre tornillo según los lineamientos de la norma ASTM G-116 [12], y se correlaciona dicha clasificación con las pérdidas de masa encontradas para los distintos materiales estudiados así como con los parámetros atmosféricos medidos en los sitios de muestreo: temperatura, humedad relativa (HR) y concentración de cloruros y sulfatos.

## 2. CONTENIDO

### 2.1 Selección de Sitios de Muestreo

Para la selección inicial de los puntos de muestreo se partió de una muestra de 114 sitios ubicados en todo del país, de donde se tomaron datos de temperatura, humedad relativa, altitud, y tiempo de humectación calculado según ISO 9223 [13]. Basados en estos datos, y empleando métodos estadísticos de análisis de cluster, los 114 sitios fueron agrupados en 6 familias de diferente agresividad. De cada una de estas familias se eligieron 2 sitios, para un total de 12 puntos representativos de las distintas agresividades que se presentan en el país. Con el fin de obtener representación de los algunos núcleos urbanos importantes, se eligieron 3 ciudades (Bogotá, Medellín, y Barranquilla), y se escogieron 3 puntos de muestreo en cada ciudad (residencial, comercial e industrial), para un total de 9 sitios urbanos de muestreo. De esta manera se eligieron 21 sitios representativos de diferentes agresividades a lo largo y ancho de nuestra geografía, como puede observarse en la figura 1, donde se agrupan en familias de agresividad creciente, de A a F.

### 2.2 Metodología Experimental

Se prepararon probetas metálicas planas de 100 x 150 x 2 mm de acero al carbono AISI-SAE 1016, acero galvanizado en caliente y aluminio 99.9%. Todas las probetas fueron acondicionadas según los lineamientos de la norma ASTM G1 [14], y fueron instaladas en los 21 sitios del estudio empleando para ello lo sugerido por la norma ASTM G50 [11]. Los materiales fueron expuestos por triplicado, y se planeó retirarlos cada 2 meses.

Igualmente se instalaron en los sitios de ensayo ensambles CLIMAT preparados según la norma ASTM G116 [12], a 1 metro del suelo. Dichos ensambles son renovados cada dos meses.

Adicionalmente, en los 21 sitios de ensayo se instalaron captadores de cloruros preparados según la norma NBR-6211 [15], y de sulfatos según NBR-6921 [16]. Además, se realizaron mediciones continuas de humedad relativa y temperatura, utilizando termohigrómetros marca EXTECH con capacidad de medida y almacenamiento periódico de información cada 11 segundos durante 2 meses. En la figura 2 se ilustran los elementos de las estaciones de ensayo instaladas.

Una vez retiradas las probetas metálicas planas así como los ensambles CLIMAT se decaparon según la norma ASTM G-1 [14], con el fin de retirar los productos de corrosión y medir la pérdida de masa. De igual manera se determinó el contenido de cloruros y sulfatos utilizando el método de cromatografía líquida.

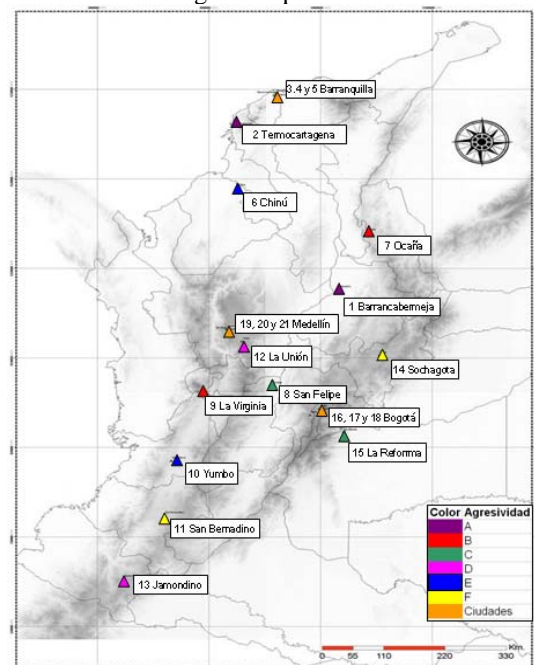


Figura 1. Mapa de Colombia con los 21 puntos de muestreo geo-referenciados.



(a) Bastidor de Exposición



(b) Captadores de SO<sub>2</sub> y Cl<sub>2</sub>



(c) Ensamble CLIMAT



(d) Termohigrómetros

Figura 2. Estación de corrosividad atmosférica.

### 2.3 Resultados y discusión

#### 2.3.1 Ensayo CLIMAT

Siguiendo la norma ASTM G116 y basados en la pérdida de masa de los alambres de aluminio enrollados en los distintos pares; Fe-Al, Cu-Al y Ny-Al, se calcularon los índices de corrosividad marino *ICM*, industrial *ICI* e índice de corrosividad general para el aluminio *ICA*, respectivamente, para 4 periodos bimensuales durante los 8 primeros meses de exposición. En las tablas 1 a 3 se presentan los índices para las 21 estaciones y los diferentes periodos de exposición.

Estación	1 Bimestre	2 Bimestre	3 Bimestre	4 Bimestre
1	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable
2	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable
3	Moderada Severa	Moderada	Moderada Severa	Moderada Severa
4	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Moderada
5	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada Severa
6 a 21	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable

Tabla 1. Índice de corrosividad marino calculado, y clasificación de las atmósferas para los 4 periodos de exposición.

Estación	1 Bimestre	2 Bimestre	3 Bimestre	4 Bimestre
1	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable
2	Moderada	Moderada	Despreciable	Moderada
3	Muy severa	Severa	Muy Severa	Muy Severa
4	Moderada	Despreciable	Moderada Severa	Moderada Severa
5	Moderada Severa	Moderada Severa	Muy Severa	Muy Severa
6 a 15	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable
16	Moderada Severa	Despreciable	Despreciable	Despreciable
17 a 21	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable

Tabla 2. Índice de corrosividad industrial calculado, y clasificación de las atmósferas para los 4 periodos de exposición.

Estación	1 Bimestre	2 Bimestre	3 Bimestre	4 Bimestre
1	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable
2	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable
3	Despreciable	Despreciable	Severa	Moderada Severa
4	Despreciable	Despreciable	Moderada	Moderada
5	Despreciable	Despreciable	Severa	Severa
6 a 21	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable

Tabla 3. Índice de corrosividad general para el aluminio calculado, y clasificación de las atmósferas para los 4 periodos de exposición.

De las anteriores tablas puede observarse como la clasificación de las atmósferas en las estaciones 1 y 6 a 21 fue en general “despreciable” para todos los periodos de exposición, a excepción de la estación 16 ubicada en zona industrial de la ciudad de Bogotá que para el primer periodo presentó un ICI “Moderada Severa”.

La estación 2 ubicada en zona industrial de Cartagena presentó calificación “Despreciable” para todos los periodos de exposición en el ICM, sin embargo presentó calificación “Moderada” para los dos primeros periodos respecto al ICI. Esto podría explicarse con base en las concentraciones bajas de cloruros y altas en sulfatos halladas en esta estación (Figuras 3 y 4).

El ICI mostró igualmente a las estaciones costeras del estudio como las más severas, presentando calificación “Muy Severa” a las estaciones 3 y 5 especialmente para los bimestres 3 y 4. La estación 16, donde se midió la mayor concentración de sulfato durante todos los periodos de estudio (Figura 4) presentó solamente calificación “Moderada Severa” para el primer periodo de exposición.

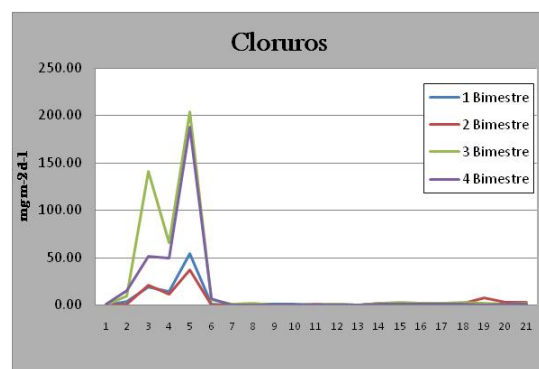


Figura 3. Concentraciones de cloruro medidas durante los 4 periodos de ensayo en las 21 estaciones.

La estación 4, ubicada en la ciudad de Barranquilla presentó agresividad “Despreciable” para los 3 primeros periodos de estudio, y “Moderada” el último periodo. Las estaciones 3 y 5 ubicadas en la misma ciudad presentaron agresividades “Moderada”, y “Moderada Severa” en los

últimos dos periodos de estudio, en los que igualmente se midió la mayor concentración de cloruros (Figura 3).

Según el ICA, sólo las estaciones 3, 4 y 5 presentan agresividades apreciables, nuevamente para los periodos 3 y 4 del estudio, donde presentaron calificaciones “Moderada Severa” y “Severa”.

Todo lo anterior permite catalogar los bimestres 3 y 4 como los más agresivos según los 3 índices de la norma ASTM G116, además a las estaciones 3, 4 y 5 ubicadas en la ciudad de Barranquilla como las más agresivas.

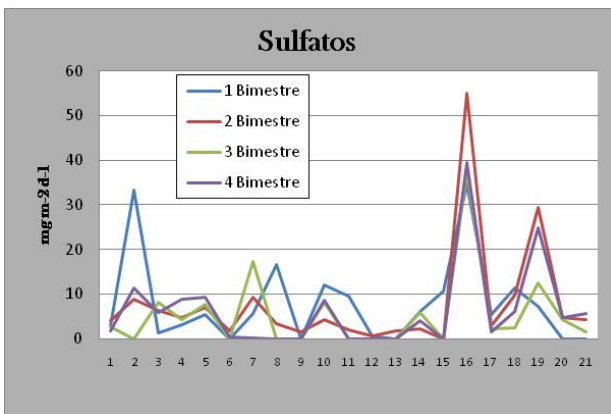


Figura 4. Concentraciones de sulfato medidas durante los 4 periodos de ensayo en las 21 estaciones.

### 2.3.2 Pérdidas de masa

En las figuras 5 a 7 se presentan de manera gráfica los resultados de pérdida de masa promedio de los materiales expuestos en los 4 periodos bimensuales para los primeros 8 meses de exposición.

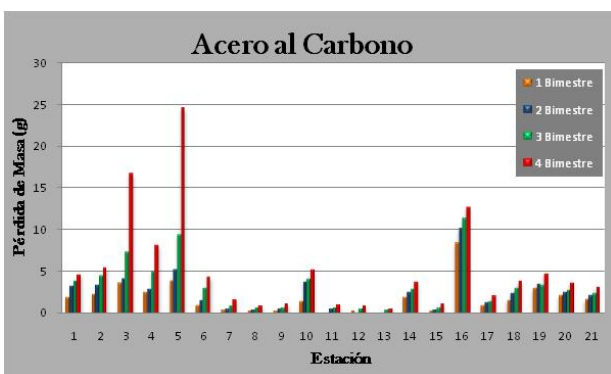


Figura 5. Pérdida de masa para el acero al carbono durante los 4 periodos de ensayo en las 21 estaciones.

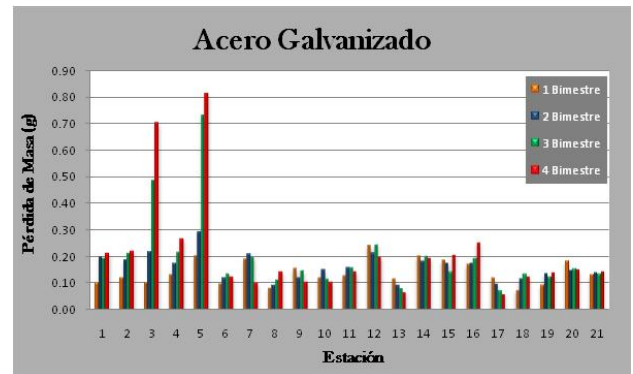


Figura 6. Pérdida de masa para el acero galvanizado durante los 4 periodos de ensayo en las 21 estaciones.

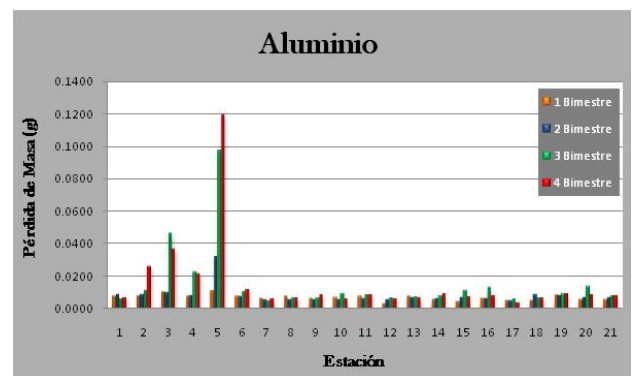


Figura 7. Pérdida de masa para el aluminio durante los 4 periodos de ensayo en las 21 estaciones.

De la figura 3 puede observarse como las estaciones ubicadas en sitios con influencia marina, de concentraciones altas en cloruro, presentan pérdidas de masa altas para el acero al carbono durante todos los periodos de exposición, siendo los casos más notables las estaciones 3 y 5. Las estaciones ubicadas en sitios urbanos, (2 en Cartagena, 10 en Yumbo, 3, 4 y 5 en Barranquilla, 16, 17 y 18 en Bogotá y 19, 20 y 21 en Medellín) presentaron pérdidas de masa relativamente altas para el acero al carbono para todos los periodos de exposición, siendo los casos más representativos las estaciones 2 y 16.

En las estaciones 1 y 6 a 15 de carácter rural; sin influencia marina ni industrial presentaron concentraciones bajas tanto de cloruro como de sulfato (figuras 3 y 4), se encontró una pérdida de masa baja para este material.

Las estaciones 5 (marina), y 16 (industrial), fueron los escenarios de mayor deterioro del acero al carbono expuesto, alcanzándose pérdidas de 24,62 y 12,75 gramos respectivamente para los 8 meses de exposición. Sin embargo, la velocidad con que se alcanzó dicha pérdida de masa no fue la misma en ambos casos. En el caso del acero expuesto en la estación 5 la pérdida de masa crece

continuamente con el tiempo como puede observarse en la figura 5, mientras que en la estación 16 la pérdida de masa fue muy alta para el primer periodo pero fue estabilizándose con el tiempo. Este hecho concuerda con lo expuesto en la literatura, y es atribuible probablemente a la naturaleza de los productos de corrosión del acero formados en distintos medios. En el caso de ambientes marinos los productos de corrosión poco compactos, poco adherentes y, por ende, poco protectores, ocasionando pérdidas sucesivas de estos productos en el tiempo, lo que se refleja en aumentos en la velocidad de corrosión de este material. En el caso de ambientes industriales los productos formados son más compactos y adherentes, lo que se refleja en la estabilización de la velocidad de deterioro con el tiempo. Aunque las características mencionadas de estos productos pueden apreciarse macroscópicamente, cabe realizar caracterizaciones más detalladas para corroborar tal supuesto.

En el caso del acero galvanizado se presenta una situación similar a la del acero al carbono, pero a escala menor como puede observarse en las figuras 6 y 8. No obstante, el acero galvanizado parece afectarse mayormente por la influencia marina que por la industrial.

En el caso del aluminio puede observarse mayor deterioro en las estaciones costeras del estudio, especialmente las estaciones 3 y 5, donde se presentaron mayores concentraciones de cloruros. La estación 2 en la ciudad de Cartagena presentó una pérdida de masa relativamente alta (0,0257 g) para el último periodo de exposición. Las demás estaciones presentan pérdidas de masa muy bajas para este material, y las diferencias entre ellas aún no son significativas (<0,01g, que está dentro del error de medición de la balanza utilizada). Aunque la pérdida de masa es aún muy pequeña, se observa alguna diferencia entre las estaciones costeras y las demás estaciones.

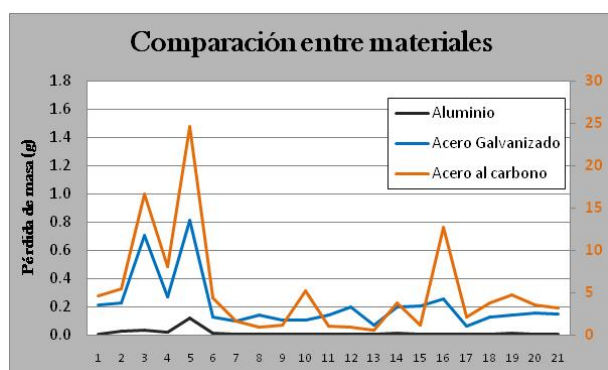


Figura 8. Comparación entre pérdidas de masa de los 3 materiales estudiados. La escala color negro (izquierda) corresponde al aluminio y acero galvanizado, y la anaranjada (derecha) al acero al carbono, para 8 meses de exposición en las 21 estaciones de ensayo.

De la figura 8 se puede observar que hay un comportamiento parecido entre estaciones para el acero y el acero galvanizado, siendo este último menos afectado por la presencia de sulfatos como puede apreciarse en las estaciones 10, 14, 16 y 19. El aluminio sólo presenta mayor deterioro en las estaciones costeras como puede corroborarse además por los índices ICM, ICI e ICA.

### 3. CONCLUSIONES

El ensayo CLIMAT, así como los demás ensayos realizados, muestran que, para las estaciones costeras, en el tercer y cuarto periodo (enero a mayo de 2007) hay una mayor agresividad hacia los materiales estudiados, lo cual parece tener relación con las mayores concentraciones de cloruros medidas en estos periodos.

Las atmósferas más agresivas hacia el acero al carbono fueron las de las estaciones 3 y 5 (marinas), además de la 16 (industrial). En esta última se observa una mayor diferencia entre el acero al carbono y los demás materiales. Para el acero galvanizado y para el aluminio las estaciones más agresivas fueron la 2, 3, 4 y 5, de influencia marina.

La corrosión del acero al carbono en sitios con influencia marina aumenta con el tiempo, sin estabilizarse, contrario a lo ocurrido en los sitios de muestreo de carácter rural e industrial.

En la mayoría de las estaciones se observa mayor corrosión en el acero al carbono, y en todos los casos la corrosión del aluminio es muy baja, aunque debe precisarse que en este último a diferencia de los otros dos materiales la corrosión es de tipo localizado y no generalizado.

### 4. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen su apoyo a la Universidad de Antioquia, Colciencias y a la CREG

### 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. Kucera, and J. Tiblad, "Comparison of environmental parameters and their effect on atmospheric corrosion in Europe and in South Asia and Africa," in *Proc. 16<sup>th</sup> International Corrosion Congress*. pp. 19-24.
- [2] C. Arroyave, "El papel del NO<sub>x</sub> en la Corrosión Atmosférica del Acero," *Tesis Doctoral*. Universidad Complutense de Madrid, 1995.
- [3] F. Corvo, C. Haces, N. BETANCOURT, *et al.* "Atmospheric corrosivity in the caribbean area," *Corr. Sci*, vol. 39, pp. 823-833, 1997.
- [4] Q. Qu, C. Yan., Y. Wan, and C. Cao, "Effects of NaCl and SO<sub>2</sub> on the initial atmospheric corrosion of zinc," *Corr. Sci*, Vol. 44, pp. 2789-2803, 2002.

- [5] J. Santana, F. Santana y J. Gonzalez, "The effect of environmental and meteorological parameters on atmospheric corrosion of carbon steel, copper, zinc and aluminium in a limited geographic zone with different types of environment," *Corr. Sci*, Vol. 45, pp. 799-815, 2003.
- [6] F. Corvo, J. Minotas, J. Delgado y C. Arroyave, "Changes in atmospheric corrosion rate caused by chloride ions depending on rain regime," *Corr. Sci*, Vol. 47, pp. 883-892, 2005.
- [7] M. Morcillo, B. Chico, L. Mariaca, y E. Otero, "Salinity in marine atmospheric corrosion: its dependence on the wind regime existing in the site," *Corr. Sci*, Vol. 42, pp. 91-104, 2000.
- [8] J. G. Castaño, C. Botero, y S. Peñaranda, "Corrosión atmosférica del zinc en ambientes interiores y exteriores," *Rev. Metal (Madrid)*, Vol. 43, pp. 133-145, 2007.
- [9] D. de la Fuente, J. G. Castaño and M. Morcillo, "Long-term atmospheric corrosion of zinc," *Corr. Sci*, Vol. 49, pp. 1420-1436, 2007.
- [10] J. Morales, F. Diaz, J. Hernandez-Borgues, S. Gonzalez, y V. Cano, "Atmospheric corrosion of zinc plates exposed to several atmospheres in the province of Santa Cruz de Tenerife (Canary Islands, Spain)", *Corr. Sci*, Vol. 49, pp. 526-541, 2007.
- [11] *Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals*. ASTM American Society for Testing and Materials. Standard G50-76, , 2003.
- [12] *Standard Practice for Conducting Wire-on-Bolt Test of Atmospheric Galvanic Corrosion* ASTM American Society for Testing and Materials. Standard G 116-99, 1999.
- [13]. *Corrosion of Metals and Alloys -Corrosivity of atmospheres- Classification*, International Standards Organization ISO 9223, 1992.
- [14] *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*. American Society for Testing and Materials. ASTM G1-03, 2003.
- [15] *Atmosfera pelo método da vela úmida determinação de cloretos*, Norma Brasileira NBR-6211, 1981.
- [16] *Sulfatação total na atmosfera-determinação da taxa pelo método da vela de dióxido de chumbo*, Norma Brasileira NBR-6921, 1981.