

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<https://dx.doi.org/10.14482/inde.42.01.823.445>

Estudio cinético de la corrosión atmosférica de larga exposición para acero al carbono y acero galvanizado expuestos en la ciudad de Medellín (Colombia)

Kinetic study of long-term atmospheric corrosion for carbon steel and galvanized steel exposed in Medellín city (Colombia)

DIEGO ALEJANDRO MONTOYA ALZATE*

JUAN GUILLERMO CASTAÑO GONZÁLEZ**

*Departamento de Ingeniería de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Ingeniero de materiales.
Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0003-0875-6726>. diego.montoyaa@udea.edu.co

**Profesor titular, Departamento de Ingeniería de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Doctor en Ciencias Químicas.
Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-7972-8293>. juan.castano@udea.edu.co

Correspondencia: Diego Alejandro Montoya Alzate, calle 62 n°52-59, Torre 2, Lab. 330, Medellín (Colombia), +57 3192656336. Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales (CIDEMAT).

Subvenciones y apoyos: Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI), Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.



Resumen

La corrosión atmosférica es uno de los fenómenos naturales de mayor impacto en la integridad de las infraestructuras metálicas en todo el mundo, y en especial en ambientes tropicales. Sin embargo, la gran mayoría de los estudios de corrosión atmosférica realizados en ambientes naturales no superan los 5 años de exposición, y son más escasos aún los estudios con resultados de 10 o más años. En este estudio se evaluó la cinética de corrosión del acero al carbono y acero galvanizado expuestos en la zona céntrica de Medellín, catalogada como un ambiente de agresividad moderada, con base en resultados obtenidos tras 1, 2, 5, 8 y 11 años de exposición. Para ambos materiales se obtuvo una ecuación cinética de corrosión mediante gráficas Log-Log de la pérdida de masa, de gran utilidad para hacer predicciones a largo plazo del deterioro de estructuras expuestas a la atmósfera. La corrosión del galvanizado fue aproximadamente entre 10 a 17 veces menor que la del acero al carbono.

Palabras clave: acero al carbono, acero galvanizado, cinética, corrosión atmosférica, pérdida de masa.

Abstract

Atmospheric corrosion is one of the natural phenomena with the greatest impact on the integrity of metallic infrastructures worldwide and especially in tropical environments. However, most atmospheric corrosion studies carried out in natural environments do not exceed 5 years of exposure, and studies with results of 10 or more years are even fewer. This study evaluates the corrosion kinetics of carbon and galvanized steels exposed in the downtown area of Medellín, classified as a moderate aggressiveness environment, from results obtained at 1, 2, 5, 8 and 11 years. For both materials, a corrosion kinetic equation was obtained from Log-Log plots of mass loss, useful for making long-term predictions of the deterioration of structures exposed to the atmosphere. The corrosion of the galvanized was approximately between 10 to 17 times lower than that of carbon steel.

Keywords: atmospheric corrosion, carbon steel, galvanized steel, kinetics, mass loss.

INTRODUCCIÓN

La corrosión es uno de los fenómenos naturales que mayor afectación presenta sobre la vida útil de las estructuras a nivel mundial. En países desarrollados hay una inversión igual o mayor al 3 % del producto interno bruto para el mantenimiento de las infraestructuras afectadas por la corrosión [1], siendo la corrosión atmosférica la de mayor relevancia. Entre los parámetros más importantes para la corrosión del acero al carbono y acero galvanizado se incluyen los contenidos de cloruros y dióxido de azufre y el tiempo de humectación (TDH), siendo este último el de mayor importancia respecto a la velocidad de la corrosión [2]. El TDH ocurre cuando la humedad relativa está por encima del 80% y la temperatura supere los 0°C [3]. En ambientes tropicales como Medellín, los altos niveles de humedad y tasas de precipitación se deben a la influencia de la cordillera de los Andes [4] y las características particulares del valle de Aburrá, que está rodeado de montañas.

Existen diferentes estudios cinéticos de corrosión atmosférica aplicados tanto para acero galvanizado como para acero al carbono [5]-[8], y una de las ecuaciones más empleadas para relacionar la tasa de corrosión con el tiempo y la agresividad de un ambiente particular es la siguiente ecuación empírica [3]:

$$D = at^n \quad (1)$$

Donde D es la pérdida de metal debido a la corrosión (μm), t es el tiempo de exposición (años), n es el coeficiente cinético de corrosión y A es la velocidad de corrosión del primer año ($\mu\text{m}/\text{año}$). El coeficiente cinético (n) es de gran importancia, ya que es un reflejo de la efectividad y la capacidad protectora de las capas de los productos de corrosión, y guarda estrecha relación con las características de cada ambiente particular. Si este valor es mayor a la unidad, muestra que los productos de corrosión no son protectores y que el proceso de corrosión está produciéndose de manera acelerada, mientras que si es menor a la unidad, indica que ya la corrosión se presenta de forma desacelerada debido al efecto protector de las capas de los productos de corrosión [9].

En ambientes con presencia de contaminantes como cloruros o sulfatos, los productos de corrosión que se forman para el acero al carbono desde las primeras etapas de la corrosión atmosférica son la goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$) y la lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$). Las capas de herrumbre tienen generalmente alta porosidad, lo cual dificulta la adherencia al acero y promueve la continuación de la corrosión [10]. También es frecuente la presencia de magnetita (Fe_3O_4), y en ambientes marinos es común la presencia de akaganeíta ($\beta\text{-FeOOH}$). Las propiedades protectoras de la capa de productos de corrosión dependen de los compuestos presentes, de su estructura cristalina y de su estratificación [11].

Por otro lado, el galvanizado del acero produce un efecto de barrera que impide que los contaminantes interaccionen con la superficie del metal base. También provee una protección catódica, ya que el zinc tiene una mayor tendencia a oxidarse que el hierro. Los productos de corrosión del zinc presentan un pH ligeramente alcalino que ayuda a inhibir las reacciones electroquímicas de corrosión. El zinc es influenciado por el tiempo de humectación, al igual que el acero, y es especialmente susceptible al CO_2 , los SO_x y los cloruros [12]. Los productos de corrosión que aparecen en las primeras etapas de la corrosión (como $\text{Zn}(\text{OH})_2$ y ZnCO_3) son poco protectores, pero con el paso de los años se van formando compuestos de mayor complejidad, de carácter básico y poco solubles, como los hidroxisulfatos e hidroxiclорuros de Zn, que tienen características protectoras [10].

La gran mayoría de los estudios de corrosión atmosférica del acero al carbono y acero galvanizado no superan los 5 años de exposición, y son más escasos aún los estudios con resultados de 10 o más años. Entre los más relevantes se incluyen varios estudios en acero al carbono realizados por ASTM en Estados Unidos, de bastante antigüedad, en algunos casos llegan a 20 años, y muestran en todos los sitios de exposición una estabilización en la velocidad de corrosión en tiempos superiores a los 7 años [13]. También se destacan los estudios realizados en tiempos de hasta 13 años en diferentes atmósferas españolas, en acero al carbono y acero galvanizado [11], [14]. Hay otros estudios realizados en 11 sitios de Suecia y la antigua Checoslovaquia (8 años) para acero al carbono y acero galvanizado [15], en 7 lugares de China (8 años) para acero al carbono [16] y en 6 lugares de diferentes países (6 años) para acero galvanizado [17]. En Colombia no existen antecedentes de estudios de larga duración de la corrosión atmosférica.

En este trabajo se estableció la cinética de la corrosión del acero al carbono y el acero galvanizado expuestos hasta por 11 años en la atmósfera de la ciudad de Medellín y la influencia de las variables atmosféricas y de contaminación, con el propósito de obtener funciones de correlación que permitan realizar pronósticos del comportamiento de estos materiales. Tales correlaciones pueden utilizarse como criterios adicionales para la selección de materiales y la estimación de tiempos de servicio en diferentes sectores industriales, principalmente en la industria de la construcción.

METODOLOGÍA

Se expusieron placas metálicas de acero al carbono, cuya composición se ve en la tabla 1, y de acero galvanizado en caliente (125 μm de espesor promedio), en un sitio cercano al centro de la ciudad de Medellín (figura 1), entre 2011 y 2022.

Las placas, de dimensiones 100 mm x 150 mm x 2 mm, se expusieron con un ángulo de inclinación de 45°, mirando hacia el norte, en dirección opuesta a la dirección predominante del viento en la ciudad. La clasificación atmosférica se realizó de acuerdo con la norma ISO 9223 [18] durante el primer año de exposición de inicio del proyecto, en 2011. Dicha clasificación se realizó mediante dos métodos: la agresividad de las variables meteorológicas y la cantidad de contaminantes. Las variables meteorológicas medidas fueron: tiempo de humectación (TDH), que depende directamente de la temperatura y la humedad relativa (HR), así como la cantidad de cloruros y la cantidad de sulfatos presentes en el sitio, que fueron recolectados mediante captadores.

TABLA 1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AL CARBONO

Elemento	Fe	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	Al	Cu
Composición (wt. %)	98,98	0,09	0,012	0,752	0,012	0,021	0,0025	0,011	0,0043	0,071	0,0075

Fuente: autores.



Fuente: autores.

FIGURA 1. SITIO DE EXPOSICIÓN DE LAS PLACAS METÁLICAS

Se realizaron retiros de las placas expuestas a tiempos de 1, 2, 5, 8 y 11 años. En cada tiempo de exposición se evaluó la pérdida de masa por triplicado para cada material, y con base en esta se calculó la velocidad de corrosión. Los análisis de pérdida de masa se hicieron siguiendo la norma ASTM G1 [19], realizando entre 5 y 6 ciclos de limpieza hasta obtener una estabilidad en la pendiente del gráfico de pérdida de masa en función del número de ciclos de limpieza. Para remover los productos de corrosión en las placas de acero al carbono se utilizó una solución decapante (500 ml HCl + 500 ml de agua destilada + 3,5 g hexametilentetramina) a temperatura ambiente por un tiempo de 10 minutos por ciclo. En el acero galvanizado, los productos de corrosión se removieron mediante una solución de 100 ml de persulfato de amonio $[(NH_4)_2S_2O_8]$ en 900 ml de agua destilada, a temperatura ambiente con un tiempo de ciclo de 5 minutos.

La velocidad de corrosión se calculó empleando la ecuación (2):

$$Velocidad\ de\ corrosi3n = \frac{K * W}{A * T * D} \quad (2)$$

Donde K es la constante de tasa de corrosión ($8,76 \times 10^7$ para unidades de $\mu m/a\tilde{n}o$), W es la pérdida de masa en gramos, A es el área en cm^2 , T es el tiempo de exposición en horas y D es la densidad en g/cm^3 .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación de la agresividad del sitio de exposici3n

En la tabla 2 se muestra la informaci3n ambiental del sitio de exposici3n recolectada para el primer a\~no del proyecto, as\~i como la clasificaci3n de la agresividad del ambiente. Adem\~as, en la tabla 3 se muestra la clasificaci3n de la agresividad ambiental a partir de la velocidad de corrosi3n obtenida en el primer a\~no de exposici3n. Las dos formas de clasificar, incluidas en la norma ISO 9223, arrojaron resultados similares. Para ambos casos la clasificaci3n fue C3, que corresponde a un ambiente de agresividad moderada, donde tiene una alta predominancia el alto tiempo de humectaci3n.

TABLA 2. INFORMACI3N AMBIENTAL DEL SITIO DE EXPOSICI3N

Altitud	HR, %	Temperatura promedio, °C	TDH, %	ζ	Cl mg/m ² día	S	SO ₂ mg/m ² día	P	CA
1400	76,9	21,6	53,4	ζ ₄	0,79	S ₀	3,64	P ₀	C3

HR: humedad relativa; TDH: tiempo de humectaci3n; ζ, S y P: clasificaci3n de la agresividad seg\~un la humedad relativa, el contenido de cloruros y contenido de sulfatos respectivamente; CA: Clasificaci3n de la agresividad seg\~un la informaci3n ambiental del sitio de exposici3n.

Fuente: autores.

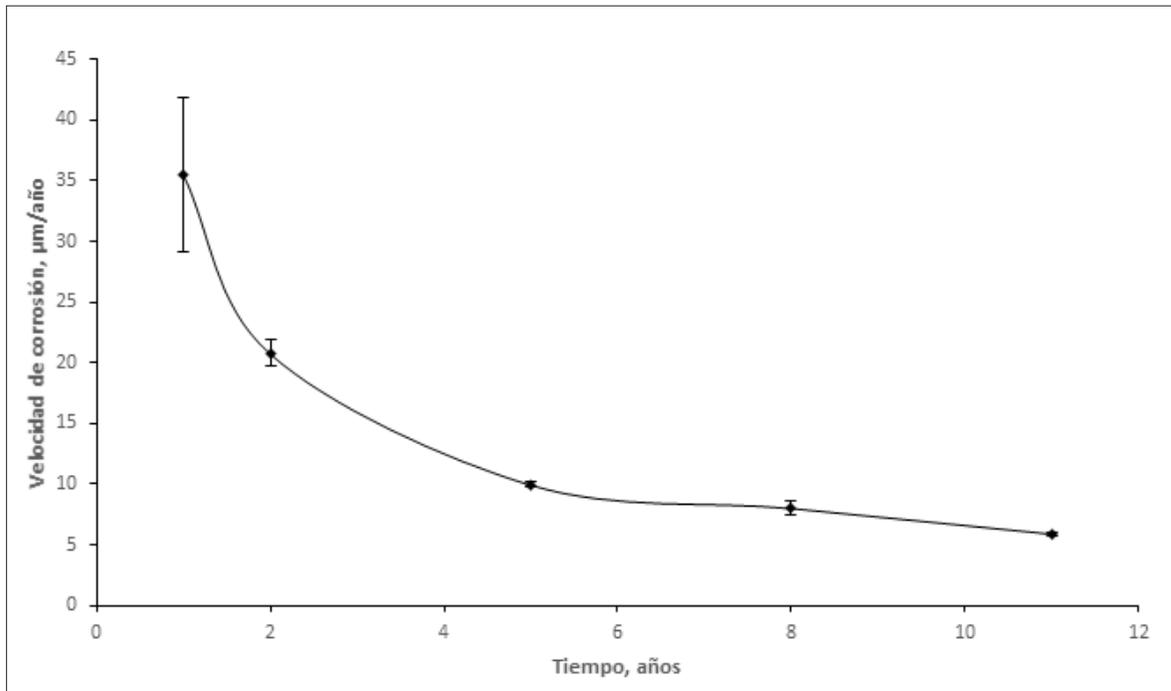
TABLA 3. CLASIFICACIÓN DE LA AGRESIVIDAD AMBIENTAL SEGÚN LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

Vcorr acero al carbono, $\mu\text{m/a}$	C	Vcorr acero galvanizado, $\mu\text{m/a}$	C
35,27	C3	2,01	C3

Fuente: autores.

Cinética de corrosión del acero al carbono

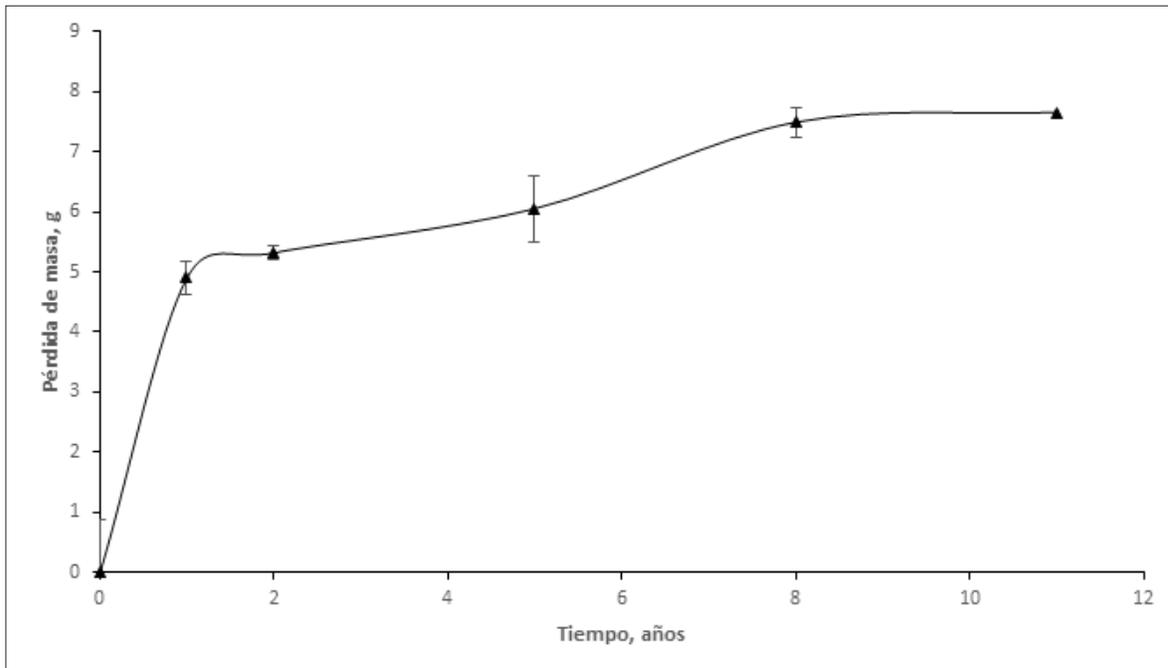
En la figura 2 se observa la disminución de la velocidad de corrosión del acero al carbono en función del tiempo. Durante el primer año se observa que la velocidad de corrosión es de aproximadamente $35 \mu\text{m/año}$. La alta variabilidad de la tasa de corrosión durante el primer año se debe a que los productos de corrosión están en un proceso de formación y desprendimiento y aún no se ha consolidado una capa estable, como ha sido observado por varios autores [10]. En un estudio realizado en 2007 en 6 sitios en Colombia, incluyendo a Medellín, se obtuvo que la velocidad de corrosión durante el primer año de exposición en la ciudad fue de $25,93 \mu\text{m/año}$, un 25 % menos del obtenido para este proyecto [14], lo que indica que, aunque en la ciudad la velocidad de corrosión del acero se puede seguir considerando como moderada, parece tener una tendencia a aumentar. Los valores de velocidad de corrosión calculados para el segundo año indican que hay una reducción alrededor del 40 % de la velocidad de corrosión con respecto al primer año. A partir de los cinco años se evidencia el inicio de un proceso de estabilización de la velocidad de corrosión, que generalmente se atribuye a la formación de capas de productos de corrosión más compactas y protectoras, que no se desprenden fácilmente y que son una barrera que obstaculiza las reacciones electroquímicas de corrosión y el ingreso de especies contaminantes [8]. A largo plazo, se observa una tendencia a la estabilización de la velocidad de corrosión alrededor de los $5 \mu\text{m/año}$.



Fuente: autores.

FIGURA 2. VELOCIDAD DE CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO

En cuanto a los datos de pérdida de masa (figura 3), en el primer año se observa un rápido aumento, pero luego la pendiente va disminuyendo. Entre los 8 y 11 años se observa una estabilización en la pérdida de masa alrededor de los 7,5 g. Esta estabilización de la pérdida de material por corrosión con el paso del tiempo ha sido evidenciada por otros autores en estudios de larga duración en ambientes de agresividad moderada [6], [16].

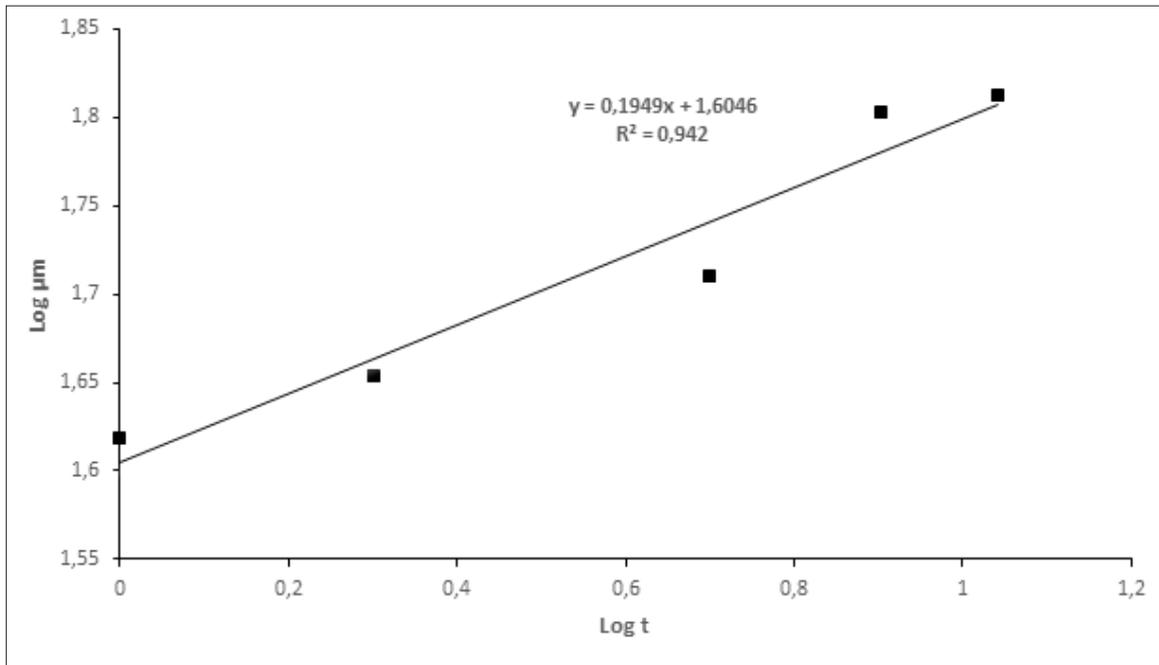


Fuente: autores.

FIGURA 3. PÉRDIDA DE MASA DEL ACERO AL CARBONO

Los gráficos log-log de pérdida de material por corrosión (expresada en μm) en función del tiempo de exposición (en años) permiten obtener el parámetro cinético n , que corresponde a la pendiente de la recta obtenida. Este parámetro es un indicativo de qué tan protectores son los productos de corrosión o qué tan agresiva es la zona de exposición.

Para el acero al carbono se identificó que dicho coeficiente es de 0,1949 (figura 4), con un R^2 de 0,94, que es un valor relativamente bajo si se compara con estudio previos. Por ejemplo, para este mismo material en diferentes atmosferas de España se encontraron valores alrededor de 0,7 para las atmósferas más agresivas, que fueron las marinas y las industriales, mientras que para atmosferas urbanas o rurales se obtuvieron valores de 0,48 y 0,73, respectivamente. Después de los 5 años se obtiene una segunda pendiente de valores mucho más bajos de 0,09 y 0,08, respectivamente, lo que indica que después de los 5 años se han desarrollado productos de corrosión con características protectoras [11]. Por otro lado, en un estudio previo realizado en Medellín [14] se encontró que el coeficiente cinético fue de 0,440, que es un poco más del doble del obtenido en esta investigación. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en ese estudio el coeficiente se obtuvo con datos obtenidos en los primeros 14 meses, periodo en el cual la velocidad de corrosión generalmente es más alta si se compara con tiempos de exposición mayores.



Fuente: autores.

FIGURA 4. GRÁFICA LOG-LOG DE CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO VERSUS EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN

Con base en lo anterior se obtuvo la siguiente ecuación para la corrosión atmosférica del acero al carbono:

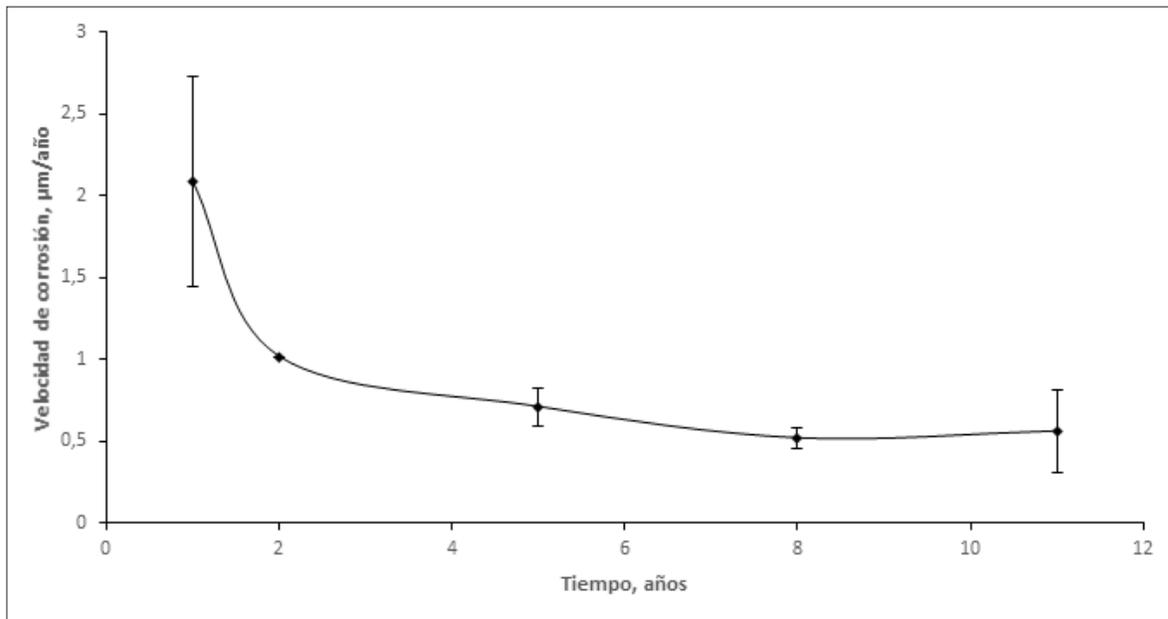
$$D = 35,5261t^{0,1949} \quad (3)$$

Donde D es la pérdida de metal (en μm) después de t años, 35,5261 corresponde a la velocidad de corrosión en el primer año (en $\mu\text{m}/\text{año}$) y 0,1949 es el coeficiente cinético.

Cinética de corrosión del acero galvanizado

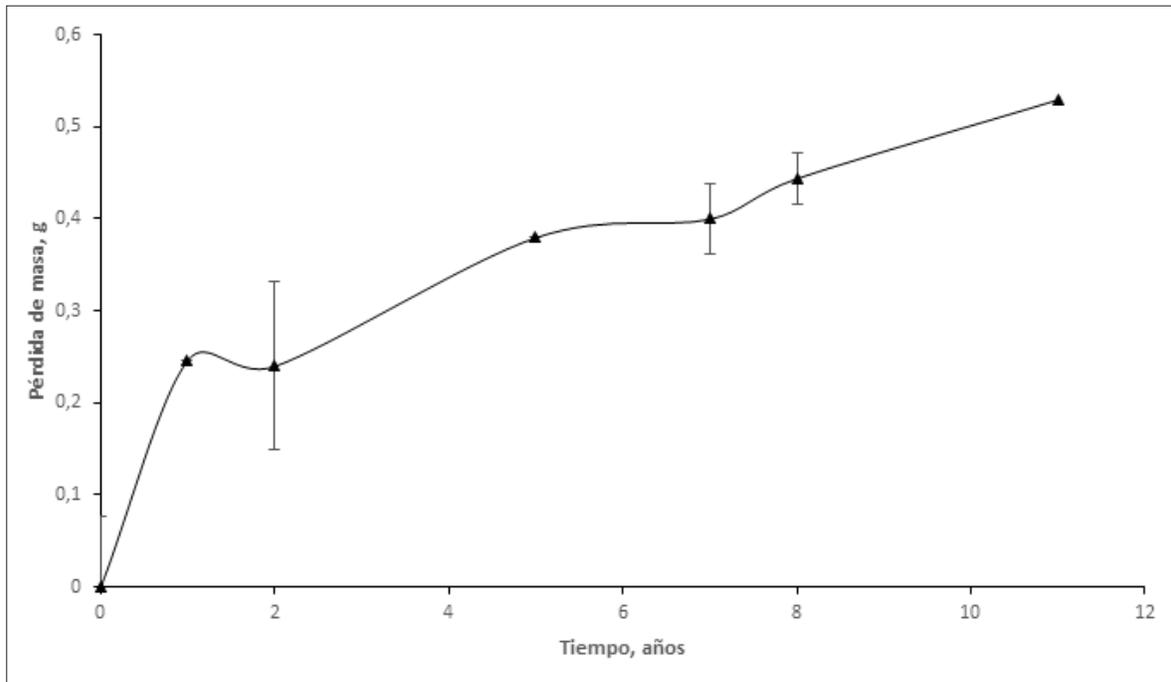
En la figura 5 se observa la velocidad de corrosión del acero galvanizado en función del tiempo. En el primer año la velocidad fue aproximadamente de $2 \mu\text{m}/\text{año}$, mientras que para el segundo hay una disminución del 50 %, debido principalmente a la formación de productos de corrosión más compactos y adherentes al galvanizado, que hace que la velocidad tienda a estabilizarse después de los 5 años, en un valor cercano a $0,51 \mu\text{m}/\text{año}$. Por otro lado, en la figura 6 se evidencia cómo el galvanizado presenta una pendiente considerable en la pérdida de masa para el primer año. Lue-

go tiene una tendencia a seguir aumentando con el tiempo, pero con menor pendiente, y no hay una estabilización en los años finales de exposición. De forma similar, De la Fuente et al. [12] obtuvieron una tendencia lineal en el gráfico de la variación de la pérdida de masa con el tiempo de exposición en varias atmósferas en España. Lo anterior puede indicar que en los primeros años de exposición en Medellín no se formaron productos de corrosión protectores a pesar de que las cantidades de cloruros y sulfatos son significativamente menores que los medidos en España.



Fuente: autores.

FIGURA. 5. VELOCIDAD DE CORROSIÓN DEL ACERO GALVANIZADO



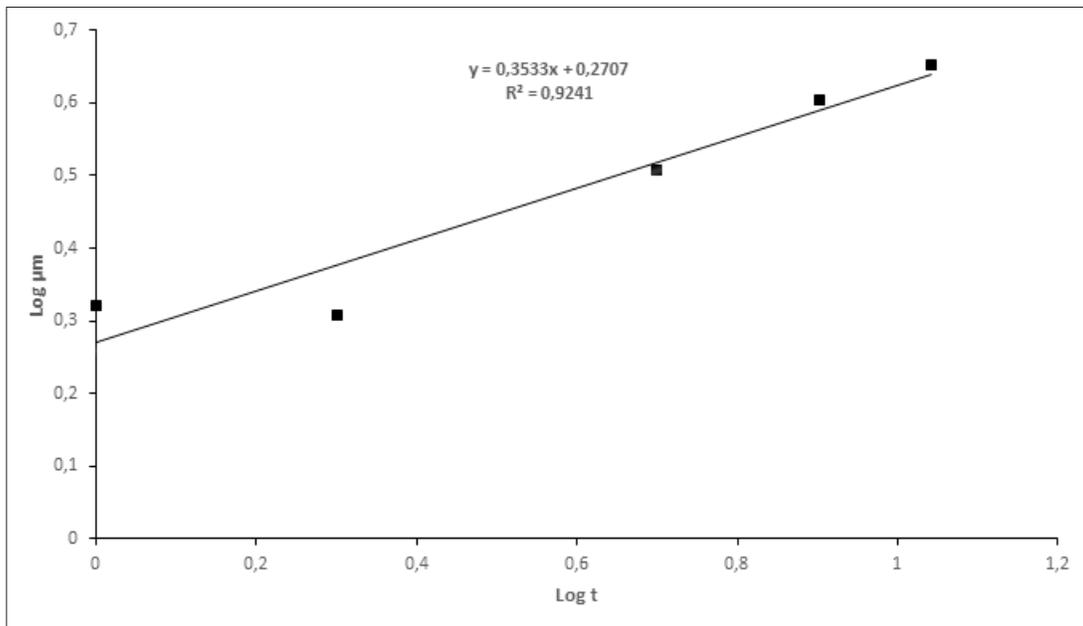
Fuente: autores.

FIGURA 6. PÉRDIDA DE MASA DEL ACERO GALVANIZADO

Con base en el gráfico log-log de la figura 7 se obtuvo un valor para el coeficiente n de 0,3533 con un R^2 de 0,92. Este valor fue un poco más alto del obtenido para el acero al carbono, lo que indica que la cinética de corrosión no se ha estabilizado. Con base en lo anterior se obtuvo la siguiente ecuación de correlación:

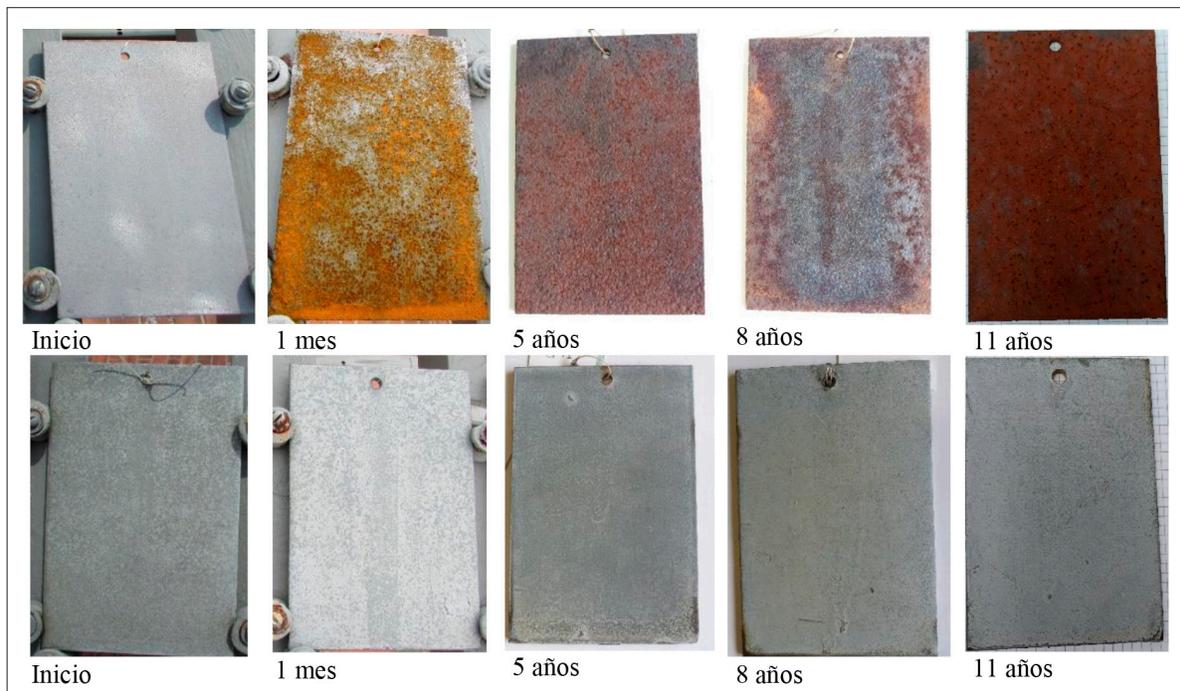
$$D = 2,0864t^{0,3533} \quad (4)$$

Donde D es la pérdida de metal (en μm) después de t años, 2,0864 corresponde a la velocidad de corrosión en el primer año (en $\mu\text{m}/\text{año}$) y 0,3533 es el coeficiente cinético.



Fuente: autores.

FIGURA 7. GRÁFICA LOG-LOG DE CORROSIÓN DEL ACERO GALVANIZADO VERSUS EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN



Fuente: autores.

FIGURA 8. APARIENCIA DE LAS PLACAS DE ACERO AL CARBONO Y ACERO GALVANIZADO RESPECTIVAMENTE CON DIFERENTES TIEMPOS DE EXPOSICIÓN

La examinación visual se realizó mediante cámara digital para el acero al carbono y el acero galvanizado en los diferentes tiempos de exposición (figura 8). Se puede observar cómo a medida que aumenta el tiempo de exposición se van consolidando las capas más compactas y adherentes de los productos de corrosión rojos y blancos para el acero al carbono y acero galvanizado, respectivamente, lo cual está relacionado con el aumento en la pérdida de masa y, a su vez, a la disminución de la velocidad de corrosión reportadas en las curvas cinéticas para cada acero.

Las ecuaciones obtenidas son una herramienta de gran utilidad para realizar una predicción del tiempo de servicio del acero al carbono y en acero galvanizado en la ciudad de Medellín o en sitios con condiciones ambientales similares. Además, en el caso del acero galvanizado, se cuenta con un elemento de análisis adicional para saber si el espesor del galvanizado es adecuado a las condiciones meteorológicas de la zona de exposición o si se requiere aumentar el espesor para cumplir satisfactoriamente con el tiempo en servicio estimado.

CONCLUSIONES

El estudio de la corrosión atmosférica para exposiciones hasta 11 años de placas de acero al carbono y acero galvanizado permite concluir lo siguiente:

La velocidad de corrosión para el acero al carbono obtuvo un comportamiento potencial, y se obtuvo un coeficiente n de 0,1949 mediante las gráficas Log-Log, es decir, que tiene un comportamiento desacelerado de la corrosión y es relativamente pequeño comparado con otros sitios. Se estableció una correlación entre pérdida de masa por corrosión (D), tiempo (t) y características del ambiente y de la capa de productos de corrosión, por medio de la ecuación $D = 35,5261t^{0,1949}$.

Para el acero galvanizado también se presentó un buen ajuste potencial, y el n fue mayor al del acero al carbono, con un valor de 0,3533. Este aumento del coeficiente fue debido a una mayor pérdida de masa para el periodo de los 11 años. Aunque la pérdida de masa no se estabiliza con el tiempo, la velocidad de corrosión del acero galvanizado es aproximadamente entre 10 y 17 menor que la del acero al carbono. Se estableció una correlación entre pérdida de masa por corrosión (D), tiempo (t) y características del ambiente y de la capa de productos de corrosión, por medio de la ecuación $D = 2,0864t^{0,3533}$.

Las ecuaciones obtenidas son una herramienta de gran utilidad para realizar una predicción del tiempo de servicio del acero al carbono y en acero galvanizado en la ciudad de Medellín o en sitios con condiciones ambientales similares.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Antioquia a través de la Facultad de ingeniería y el CODI por el apoyo financiero por medio del fondo de ayudas a los trabajos de grado de pregrado (código PR22-2-01).

REFERENCIAS

- [1] D. Askeland, *Ciencia e ingeniería de materiales*, 7th ed. México D.F: Cengage Learning, 2017.
- [2] F. Zafar, H. Bano, A. Mahmood, F. Corvo y J. Rodriguez, “Physicochemical studies of mild steel corrosion and atmospheric corrosivity mapping of Karachi: An important harbor city of modern Maritime Silk Route”, *Materials and Corrosion*, vol. 71, n^o. 9, pp. 1557-1575, 2020. doi: 10.1002/mac0.202011793.
- [3] V. Kucera y E. Mattsson, “Atmospheric corrosion, in F. Mansfeld,” in *Corrosion Mechanisms*. New York: Marcel Dekker, 1987, pp. 211–284.
- [4] J. G. Castaño, C. A. Botero, A. H. Restrepo, E. A. Agudelo, E. Correa y F. Echeverría, “Atmospheric corrosion of carbon steel in Colombia”, *Corros Sci*, vol. 52, n^o. 1, pp. 216-223, 2010. doi: 10.1016/j.corsci.2009.09.006.
- [5] M. Morcillo et al. (Eds.), *Corrosión y protección de metales en las atmósferas de Iberoamérica*, vol. 1. Madrid: CYTED, 1998.
- [6] S.W. Dean, D. Knotkova y K. Kreislova, “ISOCORRAG”, en *International Atmospheric Exposure Program: Summary of Results, ASTM Data Series 71*, ASTM International, West Conshohocken, 2010.
- [7] D. Thierry, D. Persson, A. Gac, N. Lebozec, A. Peltola y P. Väisänen, “Long-term atmospheric corrosion of Zn-5%Al-coated steel and HDG during outdoor worldwide exposures”, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, vol. 55, pp. 1-11, 2020. doi: 10.1080/1478422X.2020.1750162.
- [8] M. Ivaskova, P. Kotes y M. Brodnan, “Air pollution as an important factor in construction materials deterioration in Slovak Republic”, en *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2015, pp. 131-138. doi: 10.1016/j.proeng.2015.06.128.
- [9] Y. W. Liu, Z. Y. Wang, G. W. Cao, Y. Cao y Y. Huo, “Study on corrosion behavior of zinc exposed in coastal-industrial atmospheric environment”, *Mater Chem Phys*, vol. 198, pp. 243-249, Sep. 2017. doi: 10.1016/j.matchemphys.2017.05.043.
- [10] C. Leygraf, I. Wallinder, J. Tidblad, and T. Graedel, *Atmospheric Corrosion*, 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.

- [11] D. de la Fuente, I. Díaz, J. Simancas, B. Chico y M. Morcillo, “Long-term atmospheric corrosion of mild steel”, *Corros Sci*, vol. 53, n°. 2, pp. 604-617, 2011. doi: 10.1016/j.corsci.2010.10.007.
- [12] D. de la Fuente, J. G. Castaño y M. Morcillo, “Long-term atmospheric corrosion of zinc”, *Corros Sci*, vol. 49, n°. 3, pp. 1420-1436, 2007. doi: 10.1016/j.corsci.2006.08.003.
- [13] CW. Briggs, “Atmospheric Corrosion of Carbon and Low Alloy Cast Steels”, *Metal Corrosion in the Atmosphere, ASTM STP 435, American Society for Testing and Materials*, pp. 271-284, 1968.
- [14] J. G. Castaño, C. A. Botero, A. H. Restrepo, E. A. Agudelo, E. Correa y F. Echeverría, “Atmospheric corrosion of carbon steel in Colombia”, *Corros Sci*, vol. 52, n°. 1, pp. 216-223, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.corsci.2009.09.006.
- [15] V. Kucera, D. Knotkova, J. Fullman y P. Holler, “Corrosion of Structural Metals in Atmospheres with Different Corrosivity at 8 Years’ Exposure in Sweden and Czechoslovakia”, *Proceedings 10th International Congress in Metallic Corrosion*, Madras, India, 1987, p. 167.
- [16] W. Hou y C. Liang, “Eight-Year Atmospheric Corrosion Exposure of Steels in China”, *Corrosion*, vol. 55, n°. 1, pp. 65-73, Jan. 1999. doi: 10.5006/1.3283967.
- [17] D. Thierry, N. Lebozec, A. Gac y D. Persson, “Long-term atmospheric corrosion rates of hot dip galvanised steel and zinc-aluminium-magnesium coated steel”, *Materials and Corrosion*, vol. 70, Apr. 2019. doi: 10.1002/maco.201911010.
- [18] ISO 9223, “Corrosion of metals and alloys, Corrosivity of atmospheres. Classification”, 2012.
- [19] ASTM G1, “Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens”, 2017.