

Mapas estimativos de la corrosión atmosférica de acero de baja aleación en Costa Rica

Javier E. Rodríguez Yáñez, Luis Garita Arce y Ericka Saborío Leiva

Centro de Investigación en Corrosión, Instituto Costarricense de Electricidad, CP 10032-1000, San José, Costa Rica, Tel (+506) 22205149, e-mail: urutico@gmail.com

Recibido 13-II-2015 • Corregido 19-V-2015 • Aceptado 16-VI-2015

ABSTRACT: Maps estimates of atmospheric corrosion of low alloy steel in Costa Rica. The Corrosion maps used are to display quickly the different situations in a country. These maps developed are for low alloy steel in Costa Rica depending on climatic data and pollutant levels, considering the different regulations associated with ISO 9223 and models developed by the Center for Research in Corrosion (CICorr). The atmosphere in Costa Rica has high rates of Brooks, considered very corrosive. The corrosion controlling atmospheric parameters are the relative humidity (RH) and Wetting Time (TWH) associated with low levels of pollution and rural type atmospheres. The corrosion rates are between 25 and 80 $\mu\text{m}\cdot\text{yr}^{-1}$ (Class 3 and 4 according to ISO 9223). Local models associated with the controlling parameters are more suitable for estimating the corrosion according to ISO 9223.

Key words: map; corrosion; atmospheric; low alloy steel; Costa Rica, ISO 9223.

Resumen: Los mapas de corrosión permiten visualizar de forma rápida las distintas situaciones en un país. Se desarrollan dichos mapas para acero de baja aleación en Costa Rica en función de datos climáticos y de niveles de contaminantes, considerando las distintas normativas asociadas con ISO 9223:1992 y los modelados desarrollados por el Centro de Investigación en Corrosión (CICorr). La atmósfera en Costa Rica presenta altos índices de Brooks, considerándose muy corrosiva. Los parámetros atmosféricos controlantes son la humedad relativa (HR) y el Tiempo de Humectación (TDH) asociados a bajos niveles de contaminación y atmósferas de tipo rural. La velocidad de corrosión se encuentra entre 25 y 80 $\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$ (Clase 3 y 4 según ISO 9223). Los modelados locales se asocian a los parámetros controlantes y resultan más adecuados para la estimación que el modelo según ISO 9223.

Palabras claves: mapa; corrosión; atmosférica; acero de baja aleación; Costa Rica, ISO 9223.

La corrosión de materiales metálicos expuestos a la atmósfera es una de las principales formas de deterioro. Debido a esto conocer los posibles niveles de corrosión al que será expuesto un material permite estimar su vida útil si el mismo está sin protección.

A este respecto existen varias normas y guías asociadas a la estimación de los niveles de corrosión atmosférica en forma local o regional.

Este proceso por su necesidad de evaluaciones previas requiere esfuerzos y financiamientos que no todos los países están en condiciones de realizar. En este sentido proyectos de apoyo a la evaluación de la corrosión atmosférica como lo fueron el Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica (MICAT), el proyecto de Corrosión de Metales de uso electrónico en Ambientes agresivos (TROPICORR), la red temática de Protección anticorrosiva de metales en atmósferas iberoamericanas (PATINA) y el

proyecto de Duración de concretos (DURACON), los cuales permitieron evaluaciones puntuales de la corrosión atmosférica y sus efectos en Costa Rica. Adicionalmente el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) ha desarrollado recientemente estudios de corrosión atmosférica en diversos puntos de su interés. (Morcillo, Almeida, Rosales, Uruchurtu, & Marrocos, 1998; Garita, Rodríguez Yáñez, & Robles, 2014)

A partir de estos datos algunos países han realizado mapas globales de sus niveles de corrosión atmosférica, tomando como referencia estudios locales y modelados. Los mismos tienen como base estudios preliminares donde se definen niveles de corrosión en sitios característicos, promediando o modelando los niveles de corrosión intermedios.

En Centroamérica los mapas de corrosión atmosférica no son un tema muy desarrollado, existiendo solo

un mapa esquemático de la NACE (National Association Corrosion Engineer). Mientras que todos los países en América del Norte tienen mapas y algunos en América del Sur (Rosales, 1997; Mariaca, Genesca, Uruchurtu, & Salvador, 1999; Vera, et al., 2012).

La aplicación de los mapas de corrosión estimativos para Costa Rica es una forma de evaluación general de la problemática en el país.

La corrosión atmosférica depende de la formación de la celda electroquímica sobre la superficie metálica, la cual genera la corrosión del metal formando óxidos y la reducción de algún compuesto atmosférico, en general el oxígeno.

Dicha corrosión está condicionada a las características ambientales a las que está expuesto el material, en particular los parámetros atmosféricos y los niveles de contaminantes.

Dentro de los principales parámetros climáticos que se consideran afectan la reacción electroquímica están la temperatura, la humedad relativa y las precipitaciones. Los primeros permiten el avance de la reacción en especial por la formación de una película superficial de electrolito que permite la conducción eléctrica y el cierre del circuito de la celda de corrosión. Para considerar el tiempo de afectación de esta película de electrolito, se define el tiempo de humectación (TDH) como el porcentaje de tiempo que la humedad relativa (HR) es mayor al 80%, con temperaturas mayores a los 0°C. Por otro lado la precipitación (P) genera un lavado de los óxidos lábiles no estabilizados, así como de los contaminantes (Robles, 2013).

Mientras que dentro de los contaminantes se considera especialmente el cloruro (Cl⁻) y el sulfato (como SO₂ en el aire). Ambos generan afectaciones a los productos de corrosión, disminuyendo sus propiedades protectoras de los óxidos formados o favoreciendo la aparición de regiones anódicas sobre la superficie.

Costa Rica se ubica entre los 8° y los 11° de latitud norte y los 82° y 85° de longitud oeste. Esto lo ubica en una región tropical influenciada en gran medida por los vientos alisios de NE a SO, que le aportan humedad. Esta surcada por dos sistemas montañosos paralelos en sentido NO-SE, que son la cordillera volcánica y la cordillera de Talamanca.

En estas condiciones el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) define 6 regiones climáticas principales con 27 sub regiones, en una extensión de 51100km², lo que representa una alta variabilidad climática. Presenta una temperatura media de unos 20°C y una HR dependiente de la altura y la afectación de los alisios, pero que

en general con un promedio mayor al 70%. (Solano & Villalobos, 2000).

Las atmósferas pueden clasificarse en forma simple según su agresividad y las características del medio en 4 grupos principales: Rural, Marino, Industrial y Urbano. (Morcillo, Almeida, Rosales, Uruchurtu, & Marrocos, 1998).

El Ambiente Rural presenta bajos niveles de contaminantes y los niveles de corrosividad son función principalmente de las características climáticas, asociadas en especial a la T, la HR ambiente y al TDH.

En tanto que el Ambiente Marino, además de los factores climáticos, la afectación principal es por los cloruros derivados del spray marino, los cuales afectan sobre todo la franja costera. La penetración de los mismos en dicha franja es dependiente de las características del viento y vegetación. (Chico, Otercr, Mariaca, & Morcillo, 1998).

Las afectaciones por el Ambiente Industrial se deben principalmente al aumento de los niveles de sulfatos derivados de las emisiones por combustión que acelera los procesos de corrosión naturales.

De la misma forma el Ambiente Urbano está relacionado con grandes concentraciones de población que generan emisiones asociados a distintas actividades, pero en especial por transporte y calefacción, las cuales incrementan los niveles de contaminantes, en especial sulfatos.

En el caso de Costa Rica los bajos niveles de contaminantes en la mayoría del país, con algunas excepciones en regiones costeras o volcánicas, hacen que la consideración general sea de ambiente rural (Duarte & Fernandez, 2010).

En base a lo expuesto el presente trabajo desarrolla mapas de los parámetros asociados a la corrosión atmosférica, así como de valores estimativos para la misma.

MÉTODOS

Los mapas de corrosión atmosférica tienen básicamente 3 niveles posibles para su generación:

- Estimación de los niveles de corrosión en base a tablas o criterios generales, asociados a parámetros climáticos y de contaminantes.
- Medida directa de la corrosión sobre distintos materiales (generalmente metales) expuestos en lugares representativos.
- Evaluación de la corrosión a partir de funciones de estimación a partir de datos de campo y parámetros climáticos.

Realicé la estimación a partir del primer nivel, planeando una base para el seguimiento del estudio de la corrosión atmosférica en los siguientes niveles, según medidas de la velocidad de corrosión por métodos gravimétricos y modelados simples.

Como parámetro de control consideré que el mapa es estimativo para acero de baja aleación (asimilable a composición A36 según ASTM), dado que es el material con mayor número de estudios en el país. (ASTM A36/A36M, 2012)

Se consideran los mapas existentes de parámetros climáticos del IMN, así como datos meteorológicos de estaciones del ICE, a partir de los cuales se estiman los mapas principales de parámetros atmosféricos que se utilizarán como base en la obtención de los mapas de corrosión.

Los mapas principales considerados para este estudio son los de los valores medio anuales de T, P, HR y TDH. De estos son novedosos los mapas estimativos de HR y TDH.

Adicionalmente se realizan mapas de los niveles de contaminantes (Cl^- y SO_2) en base a un estudio anterior

realizado por el ICE (Proyecto de Salinidad) según la técnica de muestreo direccional de recolección de polvo, con base en la norma BS 1747, parte 5, la cual es asimilable a las técnicas de la ISO 9223. (Hall, Upton, & Marsland, 1993; BS 1747 part 5: 1972, Reapproved 1991)

Dentro de los posibles mapas de corrosión y en orden creciente de complejidad, se realizaron los del índice de Brooks, los de los niveles de corrosión según la ISO 9223:1992 y normas asociadas, los de estimación según el modelado de la ISO 9223:2012 y mapas con base en un modelado propio obtenido por el CICorr a partir de mediciones de velocidad de corrosión gravimétrica (ver apéndice).

RESULTADOS

El modelado de los mapas se realiza en ARC GIS 10.1, usando interpolaciones tipo *Topo to Raster* o *Natural Neignborg* o una combinación de ambas, para lograr un mejor ajuste en el mapa. (Esri, 2013; Fig. de 1-8)

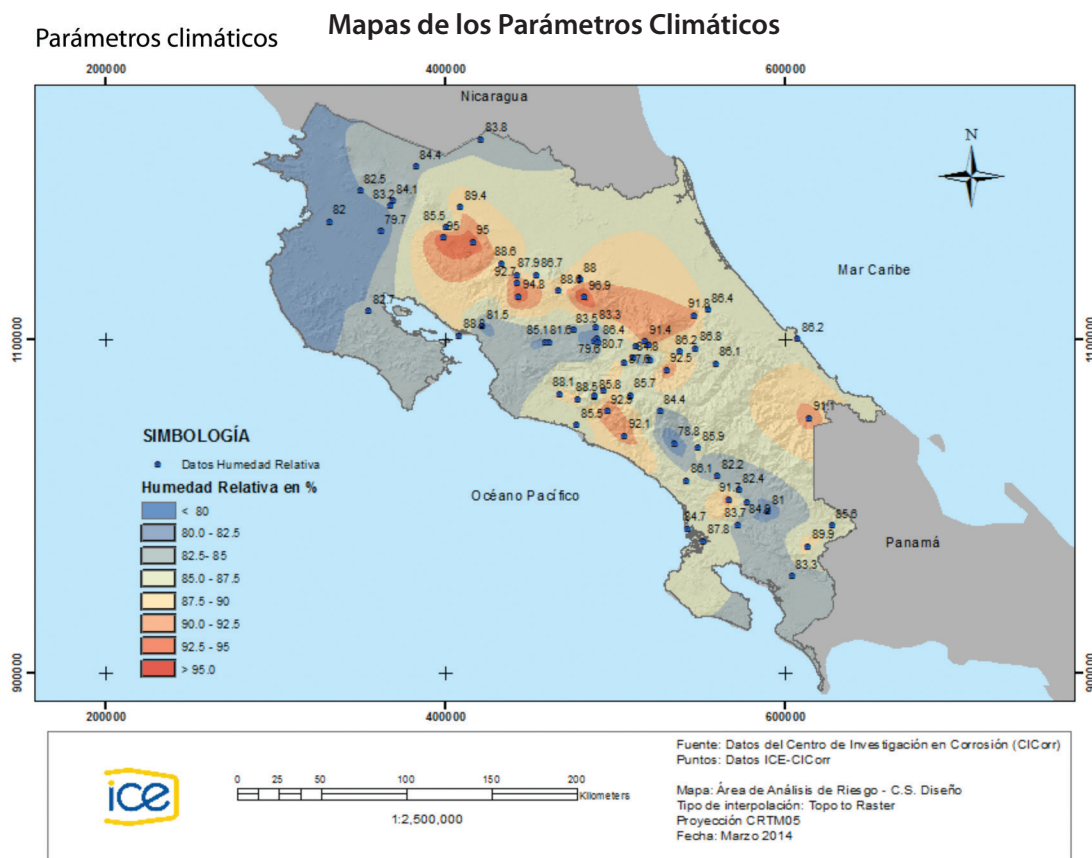


Fig. 1. Humedad Relativa Media Anual (%).

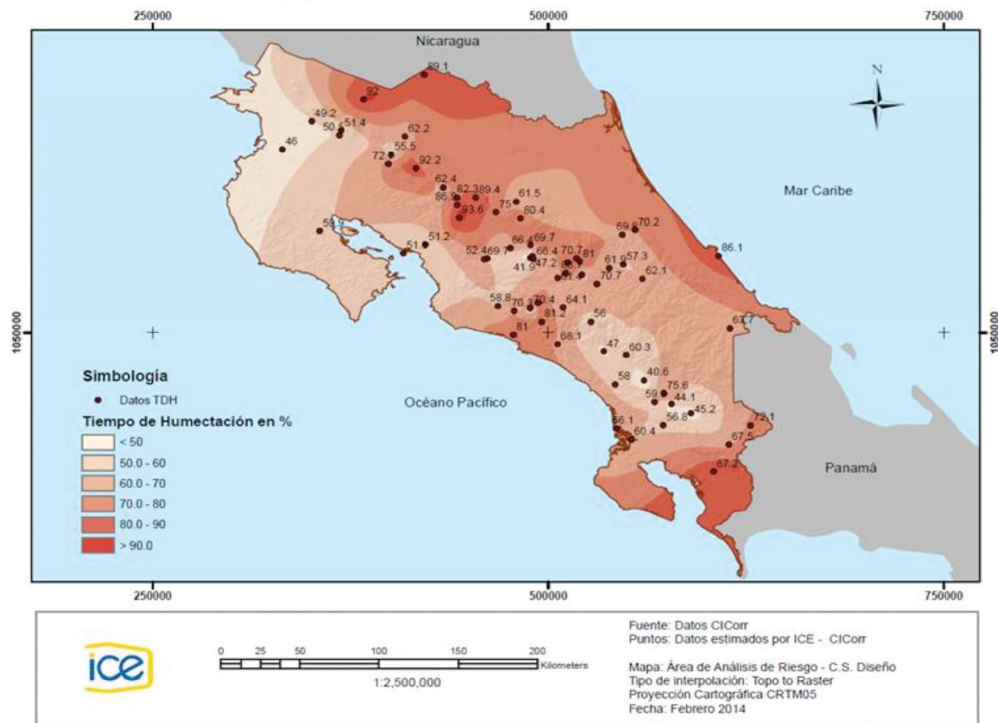


Fig. 2. Tiempo de Humectación (%).

Mapa de Estimación de Niveles de Contaminantes

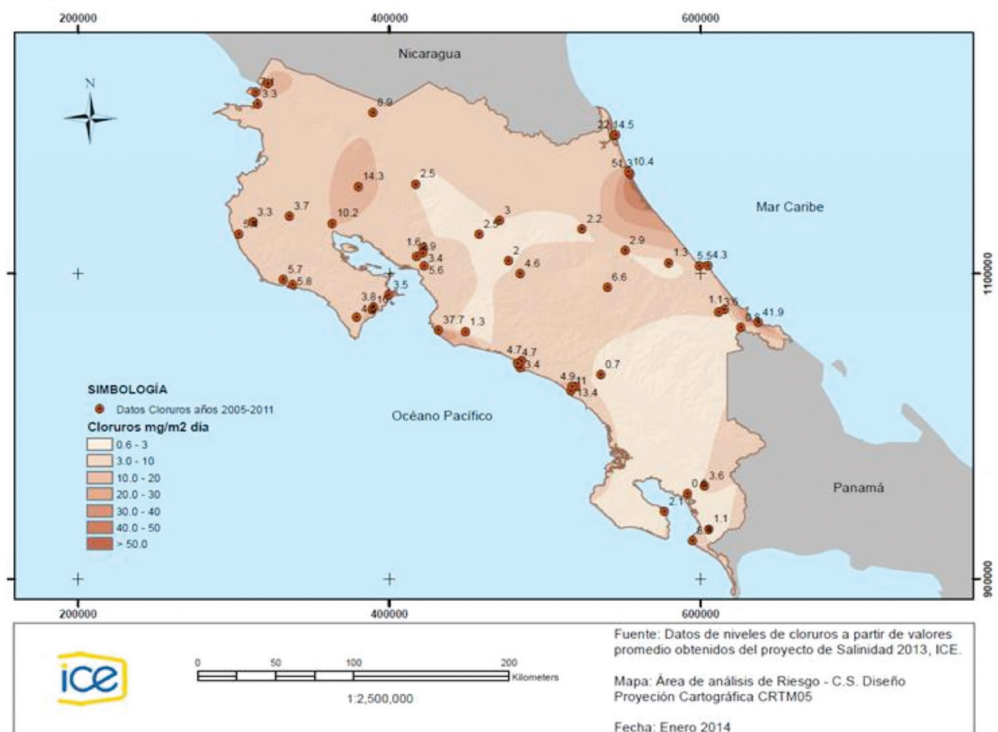


Fig. 3. Cloruros ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$).

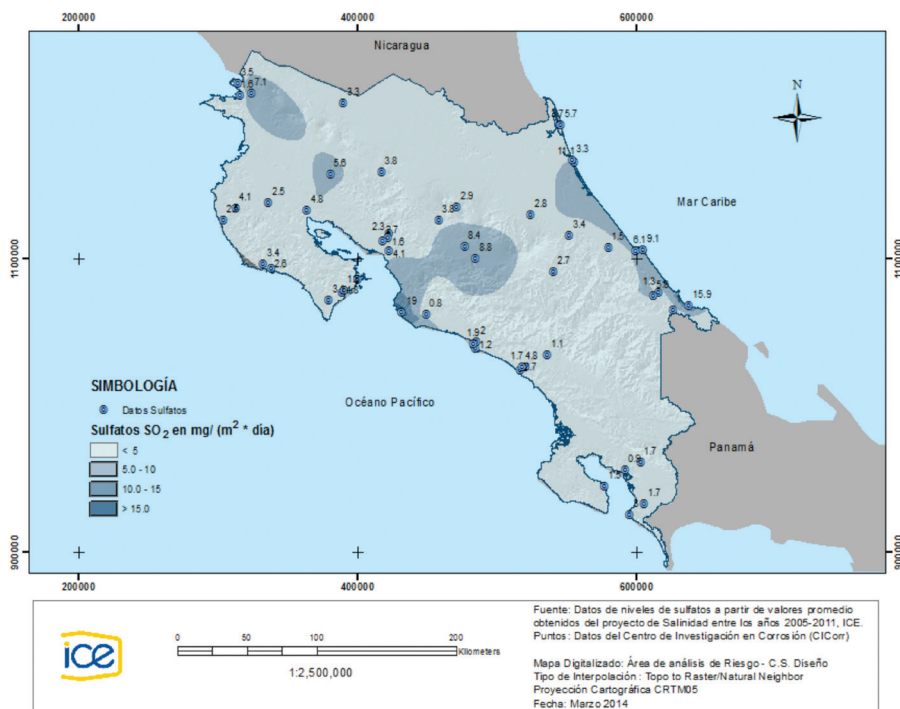


Fig. 4. Sulfatos, como SO_2 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$).

Mapas de Estimación de la Corrosión Atmosférica

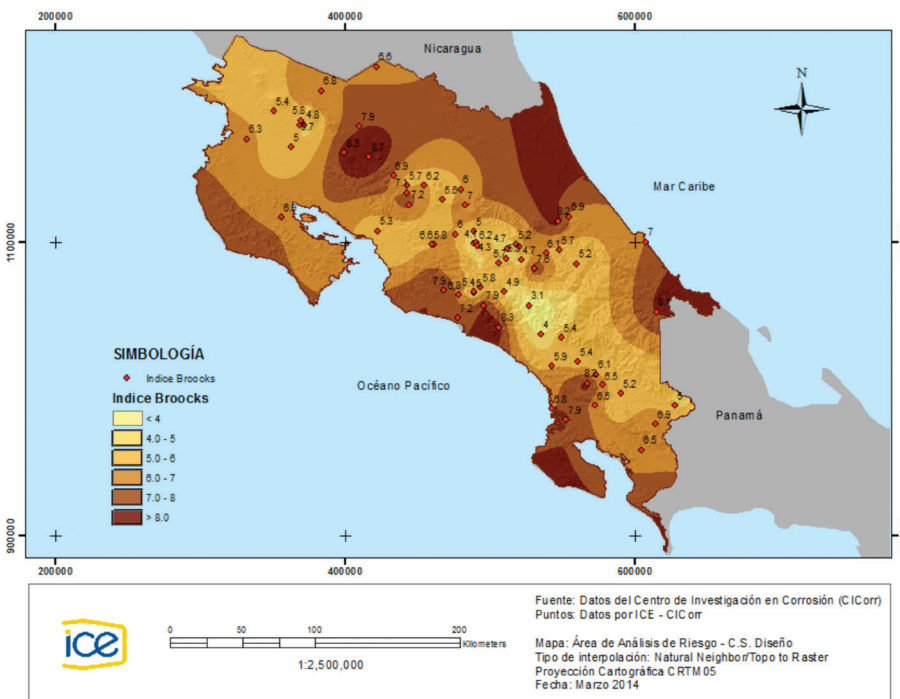


Fig. 5. Índice de Deterioro de Brooks por Corrosión Atmosférica.

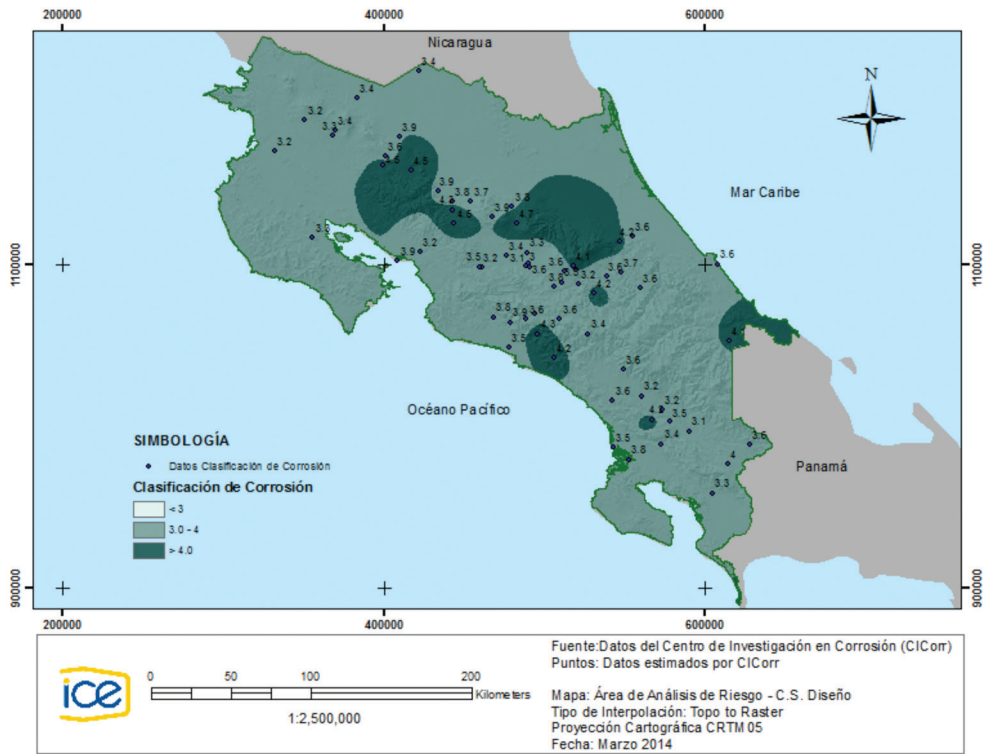


Fig. 6. Clasificación de Corrosión Atmosférica según ISO 9223:1992 y consideraciones de MICAT.

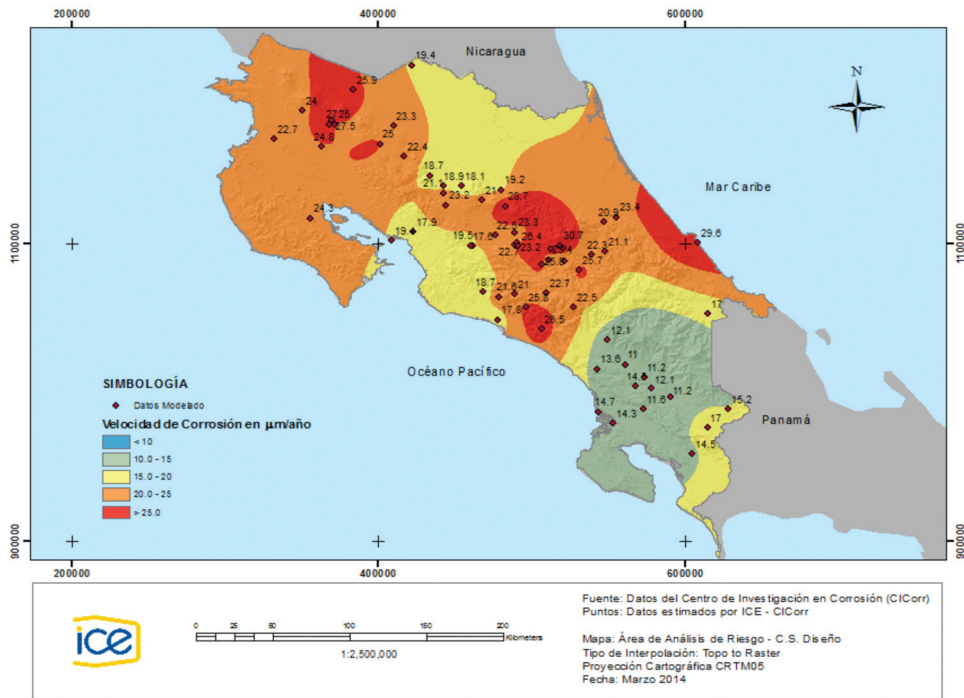


Fig. 7. Corrosión Atmosférica para acero de baja aleación según *Modelado de la ISO 9223:2012* ($\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$).

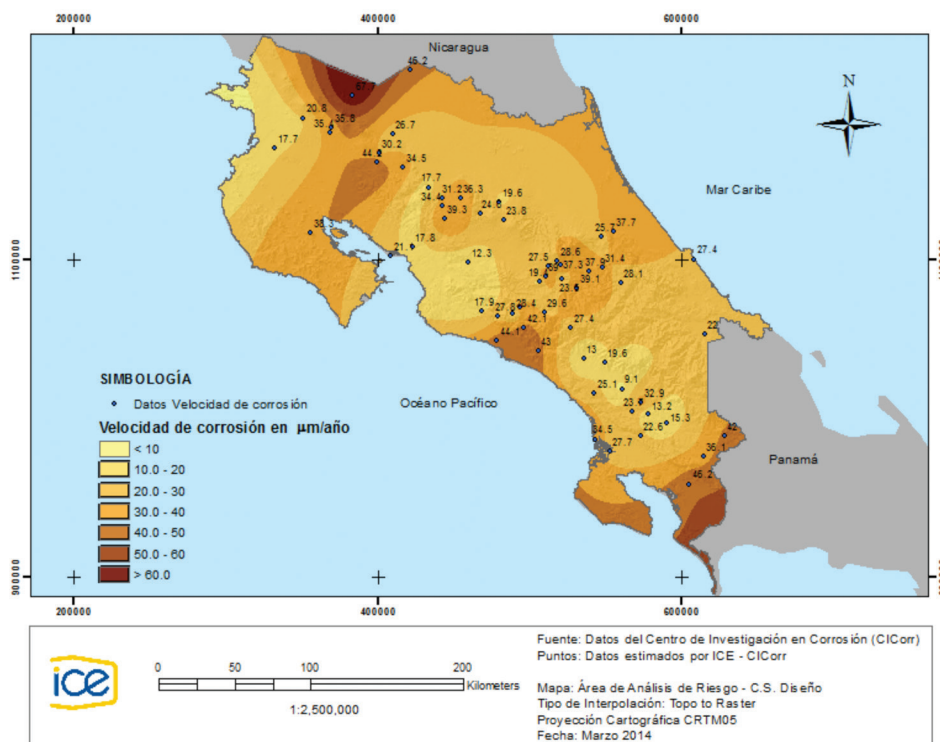


Fig. 8. Corrosión Atmosférica para acero de baja aleación según Modelado lineal con un año de mediciones del CICorr, en base a Cl , SO_2 y TDH ($\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$).

DISCUSIÓN

El factor controlante de la corrosión atmosférica es la HR o el TDH; ya que influencia los distintos mapas de estimación de la corrosión y en particular la Clasificación de la ISO 9223:1992. Además los valores generales de los contaminantes (Cl y SO_2) son bajos, haciendo que Costa Rica presente un ambiente de tipo Rural para esta evaluación. (Feliu, Morcillo, & Feliu, 1993; Morcillo, Almeida, Rosales, Uruchurtu, & Marrocos, 1998)

Los índices de Brooks son del orden de 3 a 9, estando principalmente entre un rango mayor a 5 que equivale a atmósferas Muy Corrosivas. (Brooks, 1950)

Los niveles de clasificación de la corrosión atmosférica según la ISO 9223:1992 están principalmente en valores de 3 y 4, lo que representa pérdidas de espesor de acero de baja aleación expuesto al ambiente de entre 25 y $80\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$. (25 a $50\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$ clase 3; y 50 a $80\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$ clase 4). Por otra parte la estimación de la velocidad de corrosión (V_{corr}) por el modelo propuesto de la ISO 9223:2012, plantean valores del orden de 25 a $40\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$. Estos valores resultan bajos como velocidades para el primer año, solo siendo estimaciones aceptables en las áreas clase 3. (ISO 9223:1992, 1992; ISO

9223:2012, 2012). Estudios anteriores del CICorr en Costa Rica indican que los valores estimados por esta ecuación son bajos, asemejándose a velocidades de corrosión a más largo plazo (3 a 5 años) (Rodríguez Yáñez, 2013; Garita, Rodríguez Yáñez & Robles, 2014).

El mapa obtenido a partir del modelado del CICorr se ajustada mejor que la clasificación de la ISO 9223:1992, ya que dichos valores se asocian de mejor manera con los obtenidos en campo en el Proyecto de Corrosión Atmosférica.

Al aplicar las ecuaciones de aproximación a V_{corr} con HR o TDH, los mapas son idénticos a los de estas variables climáticas, cambiando las escalas de los valores de V_{corr} (ver apéndice)

Según las estimaciones a partir de los distintos modelos se tiene en general un ambiente tropical corrosivo de tipo rural, influenciado principalmente por factores climáticos como precipitaciones, HR y/o TDH.

Los niveles de corrosión se encuentran entre 25 y $80\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$ para todo el país, sin embargo en términos generales las regiones montañosas presentan los valores más elevados de corrosión, mientras que Guanacaste presenta los valores más bajos.

Las áreas costeras y volcánicas deben ser consideradas en forma diferente debido a la posibilidad de tener mayores niveles de contaminantes en las mismas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo y aporte de datos de los proyectos de Salinidad y de Corrosión Atmosférica en Plantas del ICE, en cuanto a contaminantes y niveles de corrosión.

También al Área de Hidrología de Estudios Básicos de Ingeniería por el aporte de los datos meteorológicos del ICE.

Así mismo al Centro de Diseño, y en especial a Rosa Vásquez por el desarrollo de los mapas estimativos.

REFERENCIAS

- ASTM A36/A36M. (2012). *Especificación Normalizada para Acero al Carbono Estructural*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- Brooks, C. (1950). *Climate in everyday life*. Londres: Dent.
- British Standards Institution (BS) 1747 part 5: 1972. (Reapproved 1991). *Methods for the measurement of air pollution. Directional dust gauges*.
- Chico, B., Otercr, E., Mariaca, L., & Morcillo, M. (1998). La corrosión atmosférica marina. Efecto de la distancia a la costa. *Revista Metalurgica 34*, 71-77.
- Corrosion y Protección de Metales en las Atmosferas de Iberoamerica, Parte I: Mapas Iberoamericanos de Corrosión Atmosférica (MICAT) 1998* Madrid, España Programa CYTED
- Duarte, E., & Fernandez, E. (2010). *Lluvia acida en volcanes de Costa Rica*. Heredia: OVSICORI -UNA.
- Esri. (2013). *Arc GIS Resources*. Obtenido de esri: <http://resources.arcgis.com/es/home/>
- Feliu, S., Morcillo, M., & Feliu, S. (1993). The prediction of atmospheric corrosion from meteorological and pollution parameters, I Annual Corrosion. *Corrosion Science 34* (3), 403-4014.
- Garita, L., Rodríguez Yáñez, J., & Robles, J. (2014). Modelado de la Velocidad de Corrosión de Acero de baja aleación en Costa Rica. *Revista Ingeniería*, (24), 2, 79-90.
- Hall, D., Upton, S., & Marsland, G. (1993). Improvements in dust gauge design, Cap. 11. En *Mesurement of Airborne Pollutants*. Butterworth Heinemann: Coulling.
- ISO 9223:1992. (1992). *Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres - Classification*. Ginebra, Suiza: ISO.
- ISO 9223:2012. (2012). *Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres - Classification*. Ginebra, Suiza: ISO.
- Larroca, S. (2013). *Meteorología al alcance de todos; Formulas por aquí... Formulas por allá*. Obtenido de http://www.tutiempo.net/silvia_larrocca/Temas/ecuaciones.htm
- Mariaca, L., Genesca, J., Uruchurtu, J., & Salvador, L. (1999). *Corrosividad Atmosférica (MICAT - Mexico)*. Mexico, Mexico: Plaza y Valdez.
- MATLAB. (2013). *MathWorks - Matlab Manual*. Obtenido de <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- Mikhailov, A., Tidblad, J., & Kucera, V. (2004). The classification System of ISO 9223 Standard and the Dose-Resonse Functions Assenssing the Corrosivity of Outdoor Atmospheres. *Protection of Metals 40* (6), 541-550.
- Robles, J. (2013). *Evaluacion de la Corrosion Atmosferica en Tres Zonas Geograficas de Costa Rica por Medio de Tecnicas Electroquimicas y Gravimetricas*. Heredia, Costa Rica: Tesis de Grado para Licenciatura en Química Industrial, Universidad Nacional.
- Rodríguez Yáñez, J. (2013). VII Congreso de la Red Latinoamericana de Ciencias Ambientales. *Evaluacion de la Corrosion Atmosferica en Las Pailas, Costa Rica*. Ciudad Quesada, Costa Rica.
- Rosales, B. (1997). *Mapa de Corrosividad Atmosferica de Argentina*. Buenos Aires, Argentina: CITEFA.
- Solano, J., & Villalobos, R. (2000). *Regiones y Subregiones Climaticas de Costa Rica*. San Jose, Costa Rica: Instituto Meteorologico Nacional.
- Vera, R., Delgado, D., Araya, R., Puentes, M., Guerrero, I., Rojas, P., y otros. (2012). Construcción de Mapas de Corrosión Atmosférica de Chile. Resultados Preliminares. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 32(2): 269-276.

APÉNDICE

Mapa Estimación del Índice de Deterioro de Brooks:

El índice de deterioro de Brooks surge como una estimación primaria simple de la afectación de una atmósfera en ambiente rural, considerando básicamente la HR como parámetro principal de control del proceso. (Brooks, 1950)

La estimación del Índice se realiza en base a la fórmula:

$$I = [(HR-65)*Pv]/100 \quad (1)$$

Dónde:

I es el índice de deterioro

HR es la humedad relativa media anual en %

Pv es la presión de vapor de saturación a la temperatura media anual en mbar, la cual se estima en HPa según:

$$Pv = 6.11 * \exp [(17.27*T)/(237.3+T)] \quad (2)$$

T es la temperatura media anual en °C

El valor de Pv debe corregirse como una proporción en función del valor de la Presión atmosférica de referencia en HPa (Pz), que cambia con la altura según:

$$Pz = 1013.3 / \exp [Z / (8430.15-Z*0.09514)] \quad (3)$$

Donde Z es la altura en m

Se considera que la Temperatura es cercana a los 15°C y que el gradiente térmico vertical es del orden de 6.5°C/km (Larroca, 2013).

Los índices definidos se asocian con niveles cualitativos de corrosividad atmosférica. El cuadro siguiente plantea los niveles de corrosividad asociados a dichos índices.

CUADRO 1
Relación entre los Índices de Brooks y los niveles de corrosividad cualitativos

Índice	Corrosividad
0 a 1	No corrosiva
1 a 2	Muy poco corrosiva
2 a 4	Poco corrosiva
4 a 5	Corrosiva
5 a 10	Muy Corrosiva

Mapa de Clasificaciones de corrosión atmosférica:

En la norma ISO 9223:1992 se tiene una correlación simple entre la Velocidad de corrosión del primer año, respecto a los parámetros de contaminantes ambientales (Cl y SO₂) y del TDH. Esta clasificación es modificada por las consideraciones del MICAT que amplían los rangos para clasificar atmósferas corrosivas el primer año en atmósferas tropicales. (Morcillo, Almeida, Rosales, Uruchurtu, & Marrocos, 1998)

Los rangos de valores de V_{corr}, TDH, Cl y SO₂ para acero de baja aleación en cada rango se expresan en los cuadros 2a, 2b, 2c y 2d, respectivamente.

CUADRO 2.a
Categoría de la atmósfera según nivel de corrosión gravimétrica en acero de baja aleación

Categoría	Corrosividad atmosférica	V _{corr} (µm/año)
C1	Muy baja	<1,3
C2	Baja	1,3 < V _{corr} < 25
C3	Medio	25 < V _{corr} < 50
C4	Alta	50 < V _{corr} < 80
C5	Muy alta	80 < V _{corr} < 200

CUADRO 2.b
Clasificación de los tiempos de humectación (TDH o τ), norma ISO 9223

Categorías	(horas/año)	(%)
τ 1	t < 10	t < 0,1
τ 2	10 < t < 250	0,1 < t < 3
τ 3	250 < t < 2500	3 < t < 30
τ 4	2500 < t < 5500	30 < t < 60
τ 5	5500 > t	60 > t

CUADRO 2.c
Clasificación de corrosividad atmosférica según la concentración de Sulfatos en aire

Categorías	Deposición (mg* m ⁻² *día ⁻¹)	Concentración (µg/m ³)
P 0	Pd < 10	Pc < 12
P 1	10 < Pd < 35	12 < Pc < 40
P 2	35 < Pd < 80	40 < Pc < 250
P 3	80 < Pd < 200	90 < Pc < 250

CUADRO 2.d
Clasificación de corrosividad atmosférica según la concentración de Cloruros en aire

Categorías	Deposición en (mg* m ⁻² *día ⁻¹)
S 0	S < 3
S 1	3 < S < 60
S 2	60 < S < 300
S 3	300 < S < 1500

El resultado es una tabla de asociación donde los parámetros (Cl, SO₂ y TDH) permiten estimar una V_{corr}. La misma se representa para acero de baja aleación en el cuadro 3, en los rangos de interés para este trabajo de τ3 a τ5, donde:

P: es el nivel de sulfatos (como SO₂), en mg m⁻² día⁻¹

S: es el nivel de cloruros (Cl), en mg m⁻² día⁻¹

τ: es el nivel de TDH anual, como %

CUADRO 3

Clasificación para la estimación de la corrosividad atmosférica para acero de baja aleación de acuerdo a lo establecido a la norma ISO 9223:1992, en el rango entre τ3 a τ5

	τ ₃			τ ₄			τ ₅		
	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃
P ₀ -P ₁	2 ó 3	3 ó 4	4	2 ó 3	3 ó 4	5	2 ó 4	5	5
P ₂	3 ó 4	3 ó 4	4 ó 5	3 ó 5	4	5	4 ó 5	5	5
P ₃	4	4 ó 5	5	5	5	5	5	5	5

Siendo los valores en **cursiva y negrita** los cambios propuestos por MICAT para acero de baja aleación.

Dado los bajos niveles de contaminantes encontrados para cloruros (S1) y sulfatos (P0); Costa Rica presenta en general una atmósfera rural, donde el factor controlante es el TDH, con valores usuales de τ4 o τ5. Los rangos de clasificación obtenidos son de C2 a C4, los cuales son discriminados en función de la HR, dado que la temperatura media no varía significativamente.

Se consideró que si HR promedio presenta una media anual menor a 80% se toma la clasificación menor del rango, si es mayor al 90% la clasificación mayor y entre 80% y 90% la clasificación intermedia o mínima. En general los valores están entre clasificaciones de nivel C3 o C4.

Mapa de Estimación de Velocidad de Corrosión: La norma ISO 9223:2012 contiene una ecuación general de modelado para acero de baja aleación que permite la obtención de la velocidad de corrosión (V_{corr}) en el primer año, a partir de parámetros medios anual de T, HR

y contaminantes (Cl y SO₂), la misma se puede apreciar a continuación:

$$V_{corr} = 1,77 * SO_2^{0.52} \exp(0,020 * HR - 0,054 * (T - 10)) + 0,102 * Cl^{0.62} \exp(0,033 * HR + 0,040 * T) \quad (4)$$

Donde:

V_{corr} es en μm*año⁻¹

SO₂ es en mg de SO₂*m⁻²*día⁻¹

Cl es en mg de Cl*m⁻²*día⁻¹

T es la temperatura media anual en °C

HR es la humedad relativa media anual en %

A pesar que la ecuación está definida para velocidades de corrosión en el primer año, estudios recientes consideran que para atmósferas tropicales los valores predichos por esta ecuación son bajos para ambientes rurales, considerándose valores a largo plazo o de estabilización de la oxidación (más de 3 años). Esto se confirmó con evaluaciones recientes sobre los puntos de control del Proyecto de Corrosión Atmosférica. (Rodríguez Yáñez, 2013; Mikhailov, Tidblad, & Kucera, 2004)

Mapa de Estimación de la Velocidad de Corrosión en el primer año: Comparativamente se considera la ecuación obtenida por modelado a partir de datos de los puntos de control de la Corrosión Atmosférica en el ICE, para la velocidad de corrosión en el primer año, según modelos lineales. (Feliu, Morcillo, & Feliu, 1993)

Se obtiene así la ecuación:

$$V_{corr} = -17,96 + 65,75 * TDH - 5,34 * SO_2 + 4,80 * Cl \quad R^2 = 0,935 \quad (5)$$

Donde:

Cl y SO₂ es en mg *m⁻²*día⁻¹

TDH como fracción (h de TDH respecto a las h totales)

Como una simplificación del modelo anterior se consideraron ecuaciones lineales de la velocidad de corrosión en el primer año, en base solo a TDH o HR, siendo las ecuaciones:

$$V_{corr} = -46,31 + 135,59 * TDH \quad R^2 = 0,643 \quad (6)$$

$$V_{corr} = -253,47 + 3,52 * HR \quad R^2 = 0,744 \quad (7)$$

Donde:

HR es en %, siendo el valor medio anual.

El modelado es realizado con Matlab, presentando limitaciones, siendo una estimación similar a la de la ISO 9223:2012, pero más asociada para la situación en Costa Rica. (Garita, Rodríguez Yáñez, & Robles, 2014)

Las ecuaciones 6 y 7 permiten una estimación rápida de la V_{corr} , aunque menos precisa, en función de parámetros más simples y rápidos de medir o estimar para un sitio específico. Ambos mapas resultan similares a los de TDH y HR respectivamente, dado el carácter rural de la corrosión atmosférica.

Relación entre V_{corr} con HR y TDH

CUADRO 4
Escala de V_{corr} ($\mu\text{m}/\text{año}$) asociada a la escala de HR (%) para acero de baja aleación

Escala HR (%)	Escala V_{corr} ($\mu\text{m}*\text{año}^{-1}$)
80,0	28,08
82,5	36,88
85,0	45,68
87,5	54,48
90,0	63,28
92,5	72,08
95,0	80,88

CUADRO 5
Escala de V_{corr} ($\mu\text{m}/\text{año}$) asociada a la escala de TDH (%) para acero de baja aleación

Escala TDH (%)	Escala V_{corr} ($\mu\text{m}*\text{año}^{-1}$)
50	21,49
60	35,04
70	48,60
80	62,16
90	75,72

Limitaciones de los mapas:

Los valores obtenidos de cloruros y sulfatos, son promedios y no corresponden con situaciones puntuales que puedan ser más elevadas en algunos momentos o sitios en particular.

Los mapas no son aplicables a zonas costeras, considerando las mismas como la región de 2 a 5km desde el borde costero (dependiendo el nivel de vientos, clima y vegetación), debido a que el efecto de los cloruros en dicha área puede ser superior al considerado. Esto cambiaría las clasificaciones definidas en la ISO 9223:1992 o el modelado de la ISO 9223:2012. (Chico, Otercr, Mariaca & Morcillo, 1998)

Tampoco son aplicables a regiones cercanas a volcanes, debido a las posibles emisiones de gases que generan lluvia ácida que elevaría los niveles considerados de contaminantes, especialmente el de SO_2 . En general se considera que en un entorno de unos 5 km alrededor del cráter del volcán el sistema no es aplicable y parcialmente aplicable en las regiones de afectación directa de la pluma de gases, que en Costa Rica es generalmente hacia el oeste. Pudiendo aumentar la clasificación de la corrosión indicada en la norma ISO 9223:1992 o el modelado de la ISO 9223:2012. (Duarte & Fernandez, 2010)

No se consideran efecto de atmosferas industriales o urbanas de gran densidad, lo cual puede ser un factor incremental en las clasificaciones planteadas.

Los modelados del CICorr son obtenidos a partir de pocos puntos por lo que debe tomarse como un estimativo.

