

MODELADO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA DE ACERO DE BAJA ALEACIÓN EN COSTA RICA

*Luis Garita Arce
Javier Rodríguez Yañez
Javier Robles Cordero*

Resumen

A partir de datos de velocidad de corrosión atmosférica y variables ambientales en diferentes sitios de Costa Rica, se realizan evaluaciones matemáticas de los modelos usuales utilizados para la estimación de la velocidad de corrosión (V_{corr}). Estos datos de contaminantes y parámetros atmosféricos en conjunto con la velocidad de corrosión obtenida gravimétricamente, son modelados por medio de la aplicación “optimtool” de Matlab, obteniendo resultados mixtos entre los modelos utilizados. Como principal conclusión se tiene el desarrollo de la Ecuación 3, la cual presenta un modelo de mejor ajuste para cada uno de los sitios, obteniendo valores adecuados de los parámetros de control (RSS, F y R^2), pero no así de la aplicación de las mismas en otros sitios.

Palabras clave: Corrosión atmosférica, modelado, velocidad de corrosión, acero de baja aleación

Abstract

From corrosion atmospheric rate data and its relationship with environmental variables of different Costa Rica locations, mathematical evaluations of typical models for corrosion rate estimation, were performed. Contamination data and atmospheric parameters along with gravimetric corrosion rate are modeled through Matlab's application “optimtool”, yielding mixed results for the models. As main result, the development of equation 3, delivers a model of best adjustment for each site, which generates acceptable values for control parameters (RSS, F y R^2), but not for the application of same model for other sites.

Key words: Atmospheric corrosion, modeling, corrosion rate, low alloy steel

Recibido: 22 de mayo de 2014 • **Aprobado:** 14 de julio de 2014

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión atmosférica representa una de las principales causas de pérdida de materiales metálicos.

En Costa Rica se han realizado pocos estudios, generalmente asociados a evaluaciones financiadas por empresas o fondos internacionales, como fue el caso del Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica (MICAT) o el proyecto TROPICORR, pero todos de poca extensión

en el tiempo o en pocos sitios (Morcillo, Almeida, Rosales, Uruchurtu, & Morrocos, 1998) (Coto & Saborio, 2006).

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) realizó un estudio para evaluar la corrosión atmosférica en varias ubicaciones, considerando distintas regiones climáticas de interés, bajo los criterios de las normas ISO 9223 a ISO 9226 y otras normas asociadas (Coto & Saborio, 2006) (ASTM, 1976).



En base a esto se desarrolla según los diferentes criterios de modelados simples, la obtención de ecuaciones de aproximación adecuada a las características de Costa Rica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Obtención de datos

La evaluación de la velocidad de corrosión atmosférica fue en acero de baja aleación conforme con las especificaciones de la norma ASTM A36, exponiendo las placas por 2 años para obtener la velocidad de corrosión gravimétrica (Davies, 1998). Además se realizó el monitoreo de los contaminantes, dióxido de azufre y cloruros de acuerdo a lo establecido en las normas ISO 9225, igualmente se registraron por medio de estaciones meteorológicas automáticas del ICE los parámetros ambientales tales como: temperatura, humedad relativa y precipitación. (ISO, 1992)

Las estaciones utilizadas para la aplicación de los modelos son las indicadas en la Tabla 1. Los datos obtenidos en las mismas se utilizan en modelos de aproximación a corto plazo, en general a un año, y mediano plazo, 2 a 5 años, definidos por varios autores. (Coto & Saborio, 2006), (Robles, 2013), (D.D.N, Shyamjeet, & Saha, 2008), (Santana, Santana, & González, 2003). Ver Tabla 1.

2.2 Modelado

Los modelos de velocidad de corrosión presentan generalmente comportamientos lineales o exponenciales como función de las variables climáticas y de contaminantes atmosféricos, ya sean acumulados en el tiempo o sus promedios anuales, teniendo como variable de respuesta obtenida en los mismos es la velocidad de corrosión (V_{corr}).

Dichos resultados del modelo se comparan con los valores obtenidos en campo para los distintos puntos y con el modelo de V_{corr} al primer año, definido en la norma ISO 9223:2012 y con la estimación a largo plazo definida en la norma ISO 9224:1992. (ISO, 1992)

Dentro de los modelos utilizados se encuentra el definido por Feliu y Morcillo, que se define en la Ecuación 1 para el primer año (tiempo constate) (González & Feliu, 1982) (Morcillo & Feliu, 1993).

$$V_{corr} = a + b \cdot TDH + c \cdot SO_2 + d \cdot Cl + e \cdot T + f \cdot HR + g \cdot P \quad (1)$$

Donde:

$$V_{corr} \text{ es en } \mu\text{m} \times \text{año}^{-1}$$

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

SO_2 y Cl^- en $\text{mg} \times \text{m}^{-2} \times \text{dia}^{-1}$

Tabla 1. Datos asociados a las estaciones de evaluación de la corrosión atmosférica

Ubicación	Coordenadas		Orientación	Altura	Observaciones
Sabana	9°56'33.46"N	84°6'11.28"O	N	1108 m	Edificio UEN PySA
Toro	10°19'4.78"N	84°14'13.47"O	NO	728 m	C.P Toro 1
Río Macho	9°46'31.96"N	83°50'30.50"O	NNO	1130 m	P.H. Río Macho
Moín	9°59'37.07"N	83°6'8.17"O	NNE	7 m	P.T. Moín
Diquís	8°57'57.42"N	83°28'20.13"O	NO	20 m	Palmar Norte
Las Pailas	10°45'15.23"N	85°21'52.98"O	NO	604 m	C.G. Las Pailas

Nota: Unidad Estratégica de Negocios Proyectos y Servicios Asociados (UEN PySA), Centro de Producción (C. P.), Proyecto Hidroeléctrico (P. H.), Planta Térmica (P. T.), Centro Geotérmico (C. G.).

T es la temperatura media anual en °C

HR es la humedad relativa media anual en %

P es la precipitación anual en mm

Siendo a, b, c, d, e, f y g constantes del modelo matemático a calcular.

En este modelo se utilizó los datos del primer año para cada estación a fin de obtener un valor general anual para la corrosión. Se consideró también la linealidad de las variables respecto a la V_{corr} y las limitaciones a la utilización de múltiples variables en función de la disponibilidad de datos.

Además estos autores también plantean una ecuación general de la V_{corr} en el tiempo de la siguiente forma:

$$\log V_{corr} = A + n \cdot \log t \quad (2)$$

Donde:

V_{corr} es en μ m acumulado.

t es el tiempo en años acumulado.

A esta asociado con el $\log V_{corr}$ en el primer año.

n esta inversamente asociado al nivel de protección de la capa de óxido.

Para este modelo se evaluaron los valores de A y n para los distintos sitios.

$$\log V_{corr} = a + n \cdot \log t + b \cdot Cl + c \cdot SO_2 + d \cdot TDH \quad (3)$$

Donde:

V_{corr} es en $g \times m^{-2}$

t es el tiempo en horas acumulado

TDH como horas acumuladas

SO_2 y Cl^- en $mg \times m^{-2}$ acumulados en el tiempo

Siendo a, b, c y d constantes del modelo matemático a calcular.

Para este modelo se utilizan todos los valores disponibles en cada punto, a fin de estimar las constantes de la ecuación 3, en los distintos puntos de muestreo.

Por último se aplica a cada ubicación estudiada el modelo definido en la ISO 9223:2012, el cual considera los valores medios anuales de los parámetros climáticos para estimar un valor de la V_{corr} a un año, siendo para climas tropicales la ecuación 4 (ISO, 2012) (Mikhailov, Tidblad, & Kucera, 2004).

$$V_{corr} = 1,77 \cdot SO_2^{0,52} e^{(0,020 \cdot HR - 0,054 \cdot (T-10))} + \dots \\ 0,102 \cdot Cl^{0,62} e^{(0,033 \cdot HR + 0,040 \cdot T)} \quad (4)$$

Donde:

V_{corr} es en μ m \times año⁻¹

SO_2 y Cl^- en $mg \times m^{-2} \times día^{-1}$

T es la temperatura media anual en °C

HR es la humedad relativa media anual en %

Para la Ecuación 4, se definen en cada punto el valor de la ecuación según los parámetros medios anuales obtenidos en el período de análisis. Posteriormente se compara con los valores gravimétricos obtenidos en cada sitio.

El proceso de cálculo de los modelos se realiza en base a la herramienta "optimtool" de Matlab, seleccionando el sistema "Isqlin" asociado a sistemas lineales con restricciones. (Mathworks, 2013) (Díaz, Martínez-Luaces, & Guineo-Cobs, 2003) (Miller & Miller, 2002) (Mongay, 2005)

Para la Ecuación 2 y 3, se dispone de la restricción que el valor de n , tiene que ser mayor a 0 y menor a 1. (ISO, 1992)

Además de la evaluación por los modelos antes descritos

2.3. Parámetros de control del modelado

Se calculó como parámetro de control relaciones entre los valores obtenidos por los modelos y los valores obtenidos experimentales. (D.D.N, Shyamjeet, & Saha, 2008) (Santana, Santana, & González, 2003), (Mikhailov, Tidblad, & Kucera, 2004) (Mathworks, 2013), (Díaz, Martínez-Luaces, & Guineo-Cobs, 2003), (Miller & Miller, 2002) (Mongay, 2005)

Inicialmente se calculó la suma de los Errores Residuales Cuadráticos (residual sum of squares o RSS) como evaluador del rendimiento, buscando que los valores mínimos sean menores a 1. El valor de RSS es calculado por Matlab de la siguiente forma:

$$RSS = \sum (E_c(t) - \text{valor}(t))^2 \quad (5)$$

Donde:

$E_c(t)$ es el valor de la función de modelado de la V_{corr} a tiempo t

Valor (t) es el valor de V_{corr} a tiempo t

Luego se comparó dichos valores realizando una regresión lineal para determinar la recta de mejor ajuste y determinando el valor del coeficiente de correlación (R^2), asociado a la linealidad entre valores obtenidos con la ecuación utilizada y el valor experimental, cuando existe una correlación buena los valores son cercanos a 1, según la ecuación:

$$R^2 = \sqrt{(1/n \cdot \sum (\text{fun lineal}(t) - \text{valor}(t))^2)} \quad (6)$$

Donde:

Fun lineal (t) es el valor de la función lineal de modelado de la V_{corr} a tiempo t

Valor (t) es el valor de V_{corr} a tiempo t

n es el número de datos disponibles.

También se calculó el factor F de Fisher para determinar la confiabilidad del modelo frente a los datos. Se espera que el valor sea mayor a 100.

En los casos que el tiempo no sea una variable (Ecuación 1) se controla la linealidad de las variables respecto a la V_{corr} , esperándose R^2 mayores a 0,7.

Se considera además que en las iteraciones para el cálculo de las constantes de las ecuaciones de modelado, la cantidad de datos por estación debe ser mayor que el número de variables. (Miller & Miller, 2002) (Mongay, 2005)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Obtención de datos

La velocidad de corrosión atmosférica gravimétrica, los valores de los contaminantes atmosféricos, y los datos climáticos fueron obtenidos para cada estación y se expresan en el Tabla 2. Los datos reportados son para el período junio 2011 a julio 2013, a excepción de la estación de Las Pailas que el período considerado fue de abril de 2006 a abril de 2011.

3.2. Análisis Ecuación (1) Modelado lineal con valores del primer año

El análisis de la Ecuación 1 y 3 se realizó con todos los puntos, aplicando sistemas de ecuaciones lineales y cálculo a partir de Matlab, considerando todas las variables en conjunto o en grupos de 3 o más variables, considerando siempre la existencia de una constante a .

Se llevó a cabo un control previo de relación de linealidad entre los valores de V_{corr} y las distintas variables, obteniendo que los datos de Las Pailas para el primer año no siguen la tendencia general de linealidad de las otras ubicaciones, por lo que no fueron considerados para este modelado. Esto limitó la cantidad de datos y por ende de variables a considerar (4 o menos) a partir de la Ecuación 1.

Tal como se puede observar en la Tabla 3, se encontró que solo valores de Cl-, SO₂, HR y TDH cumplieron con el requisito de una buena linealidad con V_{corr} , el TDH presentó un valor inferior al límite propuesto para R^2 .

Tabla 2. Datos de V_{corr} , TDH, Cl y SO_2 en el tiempo para la estación de Las Pailas, Sabana, Toro, Diquís, Río Macho, Moín.

Tiempo (meses)	Estación	V_{corr} (g x m^{-2})	TDH (h)	Cl- (mg x m^{-2})	SO_2 (mg x m^{-2})	
4	Sabana	232,9	2557	1397,35	355,62	
	Toro	258,2	3323	1275,71	336,01	
	Diquís	117,1	2669	1094,82	383,96	
	Río Macho	88,8	1991	1093,35	415,85	
	Moín	228,6	2832	1644,83	165,67	
6	Pailas	145,6	3279	827,16	771,35	
	Sabana	259,6	4185	3509,22	1217,21	
	Toro	372,1	5670	3222,71	1521,75	
8	Diquís	213,0	4600	2638,31	2086,31	
	Río Macho	108,8	3691	2841,92	1958,76	
	Moín	460,8	5598	3751,62	786,66	
	Pailas	288,2	4445	1501,99	1447,64	
	Sabana	353,1	5041	4460,64	2435,05	
12	Toro	470,9	7642	4359,44	2297,27	
	Diquís	263,6	6278	3414,55	2640,62	
	Río Macho	136,6	5153	3764,04	2892,05	
	Moín	564,3	7405	5201,99	1538,32	
	Pailas	384,6	7602	2144,08	1714,70	
18	Sabana	457,2	7490	6370,60	3476,80	
	Toro	564,7	11328	6255,18	3324,06	
	Diquís	307,6	8787	4632,32	3582,81	
	Río Macho	172,1	7421	5186,26	3983,50	
	Moín	769,2	11110	7620,52	2254,72	
24	Pailas	433,5	9411	3199,13	3795,87	
	Sabana	512,8	9901	8714,50	4756,00	
	Toro	679,0	15227	8528,72	4532,24	
	Diquís	378,6	12234	6513,92	5038,11	
	Río Macho	248,1	10688	7365,70	5657,50	
36	Moín	1024,2	14804	10151,32	3003,52	
	Pailas	531,3	14046	4848,98	5334,02	
	48	Pailas	641,4	17706	6498,80	7061,71
	60	Pailas	735,3	22602	8148,62	8600,06

Tabla 3. Ecuaciones de linealidad entre V_{corr} gravimétrica y las distintas variables (Cl^- , SO_2 , HR y TDH) utilizadas en la ecuación 1

Variable	O.O.	Pend.	R ²
Cl ⁻	7,886	0,0715	0,7337
SO ₂	8,912	-0,0524	0,8452
HR	75,598	0,2115	0,7442
TDH	0,471	0,0047	0,6433

Nota: Pend Pendiente, O.O. ordenada en origen.

En la Tabla 3, se aprecia que la mayoría de las pendientes son positivas, indicando que existe una relación directamente proporcional, en entre las variables y la velocidad de corrosión, caso contrario para el SO_2 , que presenta una pendiente negativa.

Para la ecuación 1, el modelo de mejor resultado considerando en la formula general para modelado simple con TDH es:

$$V_{corr} = -17,96 + 65,75 \cdot TDH - 5,34 \cdot SO_2 + 4,80 \cdot Cl \quad (7)$$

$$RSS = 143,06$$

$$F = 43,0$$

$$R^2 = 0,935$$

Mientras que considerando HR en vez de TDH, es:

$$V_{corr} = -229,02 + 0,063 \cdot SO_2 + 6,73 \cdot Cl + 2,345 \cdot HR \quad (8)$$

$$RSS = 62,04$$

$$F = 103,7$$

$$R^2 = 0,972$$

Se determinan mejores valores de los parámetros de control, cuando se considera el promedio anual de la HR en vez de utilizar TDH, dado que el valor de RSS son menores, lo cual sugiere que el modelo utilizando HR presenta menor error que el de TDH, mientras que los de F y R² son mayores, indicando que existe una mejor correlación entre los datos utilizando el promedio de HR anual.

Los valores obtenidos en estas ecuaciones para RSS son elevados, mientras que aunque R²

es relativamente cercano a 1, los valores de F no expresan una situación adecuada de la relación entre los datos y la función de estimación.

La curva de estimación (Ecuación 8) se compara con los valores reales de V_{corr} , tal como se muestra en la Figura 1, observándose una ligera subvaloración de la corrosión real cuando la V_{corr} está entre 30 μm y 60 μm , mientras que sobrevalora fuera de ese rango.

3.3 Análisis Ecuación (2) Modelado Logarítmico

En el caso de la Ecuación 2, el modelado se realiza para cada punto considerando, expresan las constantes en cada sitio en la Tabla 4.

En general esta ecuación presenta buena correlación de linealidad para todos los sitios, debido a que los valores de R², se encuentran entre 0,9409 y 0,9978.

Los valores de la constante A, en todas las estaciones son similares a los de Log V_{corr} del primer año.

La constante n obtenida en la Tabla 4, presenta valores entre 0,5 y 0,9, asociado según la bibliografía a procesos de estabilización de los óxidos superficiales con el tiempo. En general para lugares alejados de la costa los valores de n se concentrarían entre 0,5 y 0,7, valores considerados como parcialmente protectores. (Morcillo, Almeida, Rosales, Uruchurtu, & Morcos, 1998), (Robles, 2013), (Corvo *et al*, 2008), (Chico, Otercr, Mariaca, & Morcillo, 1998), (Meira, Andrade, Alonso, Padaratz, & Borba, 2008)

En base al caso más extenso de Las Pailas, esto puede asociarse a que el proceso de estabilización de los óxidos en la superficie es lento, del orden de 2 a 3 años, para obtener una velocidad de corrosión estable, como se puede apreciar en la Tabla 6.

3.4 Análisis Ecuación (3) Modelado Exponencial

Para la aplicación de la Ecuación 3 debe considerarse la cantidad de datos disponibles para cada sitio en relación a la cantidad de variables

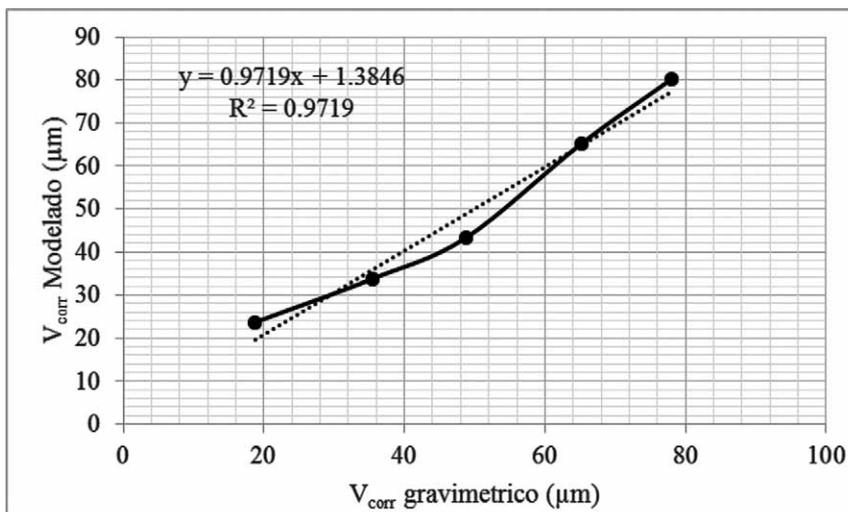


Figura 1. Relación entre la V_{corr} Modelado (μm) en el primer año calculada por la Ecuación 8, respecto a los valores de V_{corr} gravimétrico (μm) utilizados para el modelado.

Tabla 4. Valores de las constantes para la Ecuación 2 en cada sitio.

Sitio	A	n	R ²	Log V_{corr} (año 1)
Las Pailas	1.2224	0.6905	0.9793	1,2632
Sabana	1.6425	0.5942	0.9428	1.6470
Toro	1.7504	0.6758	0.9955	1.7733
Río Macho	1.2664	0.6198	0.9409	1.2323
Moín	1.8478	0.9107	0.9978	1.8518
Diquís	1.4894	0.7303	0.9891	1.5085

Tabla 5. Valores de las constantes para la Ecuación 3 en cada sitio, para el sistema con menor RSS.

Sitio	a	n	b Cl ⁻	c SO ₂	d TDH	RSS	F	R ²
Las Pailas	-1,275	0,961	1,29 x 10 ⁻⁴	-7,76 x 10 ⁻⁵	-3,18 x 10 ⁻⁵	8,23 x 10 ⁻⁴	2069	0,9976
Sabana	1,879	0,143	-5,52 x 10 ⁻⁵	1,50 x 10 ⁻⁴	ND	8,96 x 10 ⁻⁴	295	0,9900
Toro	1,149	0,375	-1,19 x 10 ⁻⁴	2,45 x 10 ⁻⁴	ND	2,03 x 10 ⁻⁵	15778	0,9998
Río Macho	1,110	0,215	-5,58 x 10 ⁻⁵	ND	7,30 x 10 ⁻⁵	1,48 x 10 ⁻⁴	2442	0,9988
Moín	-1,180	1,000	1,85 x 10 ⁻⁵	-7,91 x 10 ⁻⁵	ND	3,04 x 10 ⁻⁴	2458	0,9988
Diquís	-0,683	0,797	9,42 x 10 ⁻⁵	ND	-6,00 x 10 ⁻⁵	4,83 x 10 ⁻⁶	94612	0,9999

Nota: No disponible (ND)

Tabla 6. Valores de V_{corr} según la ISO 9223:2012, para lo sitios considerados y la evolución de V_{corr} en los mismos con el tiempo, expresado en $\mu\text{m} \times \text{año}^{-1}$.

Sitio	V_{corr}	V_{corr} año1	V_{corr} año 2	V_{corr} año 3	V_{corr} año 4	V_{corr} año 5
Las Pailas	19,92	40,31	30,32	24,79	22,46	20,60
Sabana	20,70	44,00	35,72	ND	ND	ND
Toro	28,46	64,26	47,35	ND	ND	ND
Río Macho	22,33	18,50	17,16	ND	ND	ND
Moín	25,40	77,00	71,63	ND	ND	ND
Diquís	20,35	34,93	26,30	ND	ND	ND

Nota: No Disponible (ND)

a poder considerar a fin de que el resultado no sea único y se presente algún nivel de modelado con la ecuación. En este sentido Las Pailas tiene mayor número de datos lo que permite considerar todas las variables o combinaciones de 2 a 4, a fin de obtener las constantes de la ecuación. Por otro lado los restantes puntos tienen menor número de datos lo que restringe la ecuación de modelado a la utilización de 2 o 3 variables, con las correspondientes limitaciones en la cantidad de constantes para la ecuación de modelado.

Por este motivo para estos sitios se consideró determinar cuál sería la combinación de mejor aproximación, en procesos dependientes del tiempo (con las constantes a y n) y con una o dos variables adicionales de las posibles (Cl^- , SO_2 y TDH), además la condición de que $0 < n \leq 1$. Los valores expresados en la Tabla 5 son los de mejor RSS obtenidos en cada sitio.

Las constantes a y n son diferentes a las obtenidas en la Ecuación 2, debido a que el modelado se torna más complejo y restrictivo al aumentar la cantidad de variables.

Como variables principal aparece el Cl^- , asociado generalmente al SO_2 y en algunos casos al TDH, cuando los valores de SO_2 son más altos.

Las constantes asociadas al Cl^- están en el orden de $(1 \text{ a } 13) \times 10^{-5}$, mientras que su signo es variable pero opuesto a los signos de las otras variables consideradas (SO_2 y/o TDH).

En cuanto a la constante del SO_2 , la misma está en el orden de $(7 \text{ a } 25) \times 10^{-5}$ y la de TDH entre $(3 \text{ a } 8) \cdot 10^{-5}$.

Los valores de RSS, F y R^2 plantean buenas correlaciones entre el modelo en cada sitio y los datos reales.

La relación entre ecuaciones de distintos sitios muestran linealidad con R^2 mayor a 0,6, pero con pendientes mucho mayores a 1 y ordenadas en el origen distintas de cero. Esto implica que cada función solo tendría aplicación local. La figura 2 muestra una de las mejores relaciones, al aplicar la ecuación de Sabana con los datos de Toro, para relacionar los valores de V_{corr} modelado con los de V_{corr} obtenido en el sitio.

3.5 Análisis Ecuación (4) Modelado según ISO 9223:2012 y resultados de velocidad de corrosión atmosférica gravimétricos

En cuanto a la Ecuación 4, definida en la ISO 9223:2012, bajo las condiciones de clima tropical se aplican para todos los sitios, evaluándose el resultado respecto a los valores del primer año y a los demás periodos disponibles.

La Tabla 6 muestra la relación entre las velocidades de corrosión obtenidas por la ecuación 4 y los valores gravimétricos experimentales obtenidos en el tiempo para cada sitio, en general

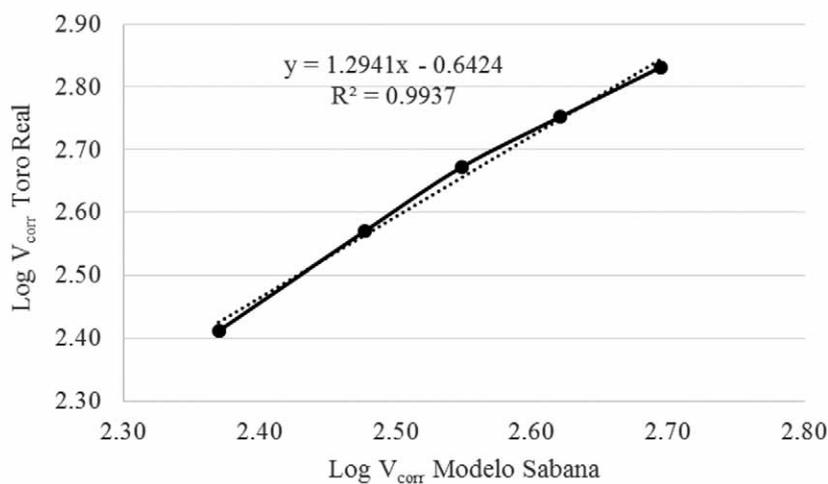


Figura 2. Relación entre Log V_{corr} ($\text{g} \times \text{m}^{-2}$) obtenida con el modelo de Sabana, aplicando en ella los datos de Toro y su relación con los valores reales de Log V_{corr} ($\text{g} \times \text{m}^{-2}$) obtenidos en Toro.

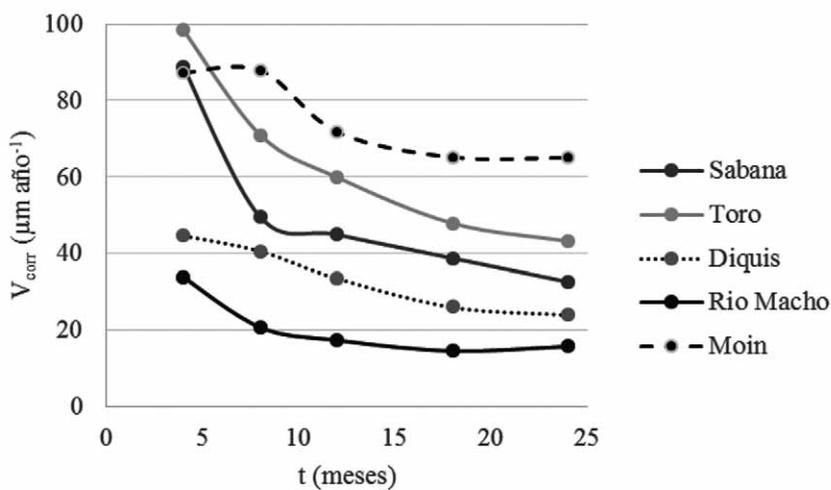


Figura 3. Evolución de V_{corr} ($\mu\text{m} \text{año}^{-1}$) con el tiempo para los 5 sitios analizados durante dos años.

el valor de V_{corr} aportado por la Ecuación 4, resulta en la mayoría de los casos, menor al valor para el primer año, ajustándose con el tiempo a un valor más cercano.

La tendencia general vista en Las Pailas es que los valores de corrosión decrecen los 2 a 3 primeros años hasta estabilizarse en un valor.

De los sitios considerados solo las velocidades de corrosión atmosférica obtenida gravimétricamente para Río Macho presenta valores por debajo de lo estimado por el modelo, asociado posiblemente a un bajo valor de HR promedio y un mayor nivel de SO_2 que podría estar afectando la V_{corr} .

3.6 Estimación de V_{corr} según la ISO 9224:1992

La evaluación a largo plazo de la norma ISO 9224:1992 (ISO, 1992) considera una ecuación similar a la Ecuación 2 para el modelado, plantean valores de la constante n (B2 en la norma) del orden de 0,575 (valor dentro del rango obtenido para la constante n de la Ecuación 2).

La misma muestra los valores máximos definidos por la norma para cada categoría de corrosión atmosférica, en función del tiempo, lo cual se expresa en la Tabla 7.

Los valores máximos esperados por la norma ISO 9224 no son superados por lo encontrado gravimétricamente en cada sitio. Mientras que los valores modelados, considerando el uso de la V_{corr} del primer año, para estimar la V_{corr} los siguientes años resultan bastante concordantes a excepción de Río Macho y Moín. Ambos presentan valores modelados menores que los obtenidos.

En caso de Moín quizás asociado a que el valor de la constante n es muy superior a 0,575, siendo la corrosión (en $\mu\text{m año}^{-1}$) casi constante después del primer año. Algo similar ocurre en Río Macho, que, aunque con un valor de n más similar a B2, en el segundo año parece haberse estabilizado la V_{corr} , acercándose más al límite superior de la corrosión esperada para una categoría C2.

La evolución de la V_{corr} ($\mu\text{m año}^{-1}$) puede apreciarse en la Figura 3, para los 5 sitios analizados en simultaneo durante dos años.

Tabla 7. Valores de V_{corr} según la ISO 9223:2012, para lo sitios considerados y la evolución de V_{corr} en los mismos con el tiempo, expresado en $\mu\text{m} \times \text{año}^{-1}$.

Sitio	Categoría ISO 9223:1992	V_{corr} año1	$V_{\text{corr MAX}}$ año1	V_{corr} año2	$V_{\text{corr MAX}}$ año2	V_{corr} año5	$V_{\text{corr MAX}}$ año5
Las Pailas	C3	40,31	50	60,64	72	ND	ND
Sabana	C3	44,00	50	71,44	72	ND	ND
Toro	C4	64,26	80	94,70	115	ND	ND
Río Macho	C2	18,50	25	34,32	36	ND	ND
Moín	C4	77,00	80	143,26	115	ND	ND
Diquís	C3	34,93	50	52,60	72	ND	ND

Nota: No Disponible (ND)

CONCLUSIONES

- Al desarrollar la Ecuación 1, asociada a valores de V_{corr} del primer año, la misma presenta limitaciones importantes, teniendo altos valores de RSS y bajos de F. Se considera que esta ecuación dará un valor meramente cualitativo. La misma posee una mejor correlación con la HR que con el TDH.
- La Ecuación 2, desarrollada para cada sitio muestra buenas correlaciones de R^2 , pero los valores de $\text{Log } V_{\text{corr}}$ en el primer año no tienen relación con el valor obtenido para la constante A. Paralelamente los valores obtenidos de n se encuentran en un rango de 0,5 a 0,9, los cuales se asocian a productos de corrosión poco protectores.
- El desarrollo de la Ecuación 3, presenta un modelo de mejor ajuste para cada uno de los sitios, obteniéndose buenos valores de los parámetros de control (RSS, F y R^2), pero no así de la aplicación de las mismas en otros sitios. Las variables principales sobre V_{corr} son el Cl- y SO_2 , y TDH, dependiendo del sitio.
- La ecuación planteada por la norma ISO 9223:2012, Ecuación 4, presenta un ajuste pobre a valores asociados a la V_{corr} en el primer año, para las estaciones utilizadas, pero parece ser un valor a adecuarse a largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece de forma especial el apoyo brindado por parte del Centro de Desarrollo Tecnológico del Instituto Costarricense de Electricidad, para el desarrollo de los modelados en este trabajo.

REFERENCIAS

ASTM. (1976). ASTM G50-76 (Reapproved 2003) Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals.
 Chico, B., Otercr, E., Mariaca, L., & Morcillo, M. (1998). La corrosión en atmósferas marinas. Efecto de la distancia a la costa. Rev. Met. 34 (mayo), 71-74

Corvo, F., Perez, T., Dzib, L. M., Castaneda, A., Gonzalez, E., & Perez, E. (2008). Outdoor-indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres. *Corrosion Science*, 220-230.
 Corvo, F., Perez, T., Dzib, L., Martin, Y., Castaneda, A., & Gonzalez-Sanchez, J. (2008). Considerations on the estimation of TOW according to ISO 9223 standard. *Corrosion Science*, 206-219.
 Coto, C., & Saborio, L. (2006). *Corrosión atmosférica en plantas del Instituto Costarricense de Electricidad*. LATINCORR.
 D.D.N, S., Shyamjeet, J., & Saha, K. (2008). Role of climatic conditions on corrosion characteristics. *Corrosion Science*, 93-110.
 Davies, J. (1998). *Metals Handbook*. Ohio: ASM International.
 Díaz, V., Martínez-Luaces, V., & Guineo-Cobs, G. (2003). Corrosión atmosférica: validación de modelos empleando técnicas estadísticas. *Revista Metal*, Madrid, 244-248.
 González, J. A. & Feliu, S. (1982). *Corrosión atmosférica del Al, Cu, Fe y Zn: (III Parte)*. Posibilidades de las técnicas electroquímicas para estimar la velocidad de corrosión instantánea en atmósferas controladas", Madrid: CENIM.
 ISO. (1992). *ISO 9223 Corrosion of metals and alloys Corrosivity of atmospheres Classification*.
 ISO. (1992). *ISO 9224 Corrosion of metals and alloys Corrosivity of atmospheres guiding values for the corrosion categories*.
 ISO. (1992). *ISO 9225 Corrosion of metals and alloys corrosivity of atmosphere measurement of pollution*.
 ISO. (1992). *ISO 9226 Corrosion of metals and alloys Corrosivity of atmosphere Determination of corrosion rate of standard specimens for evaluation of corrosivity*.
 ISO. (2012). *ISO 9223 Corrosion of metals and alloys Corrosivity of atmospheres, classification*.
 Mathworks. (2013). Matlab. Obtenido de www.mathworks.com/products/matlab/
 Meira, G., Andrade, C., Alonso, C., Padaratz, I., & Borba, J. (2008). Modelling sea salt transport and deposition in marine zone

- atmosphere zone, a tool for corrosion studies. *Corrosion Science*, 2724-2731.
- Mikhailov, A., Tidblad, J., & Kucera, V. (2004). The Classification System of ISO 9223 Standard and the Dose-Response Functions Assessing the Corrosivity of Outdoor Atmospheres. *Protection of metals*, 541-550.
- Miller, M., & Miller, M. (2002). *Estadística Quimiometría para química analítica*. Madrid: Pearson.
- Mongay, C. (2005). *Quimiometria*. Valencia: Edicucio Materials.
- Morcillo, M., & Feliu, S. (1993). *Mapas de España de Corrosividad*. Madrid: CYTED.
- Morcillo, M., Almeida, E., Rosales, B., Uruchurtu, J., & Morrocos, M. (1998). *Corrosión y Protección de metales en las atmosferas iberoamerica*, Parte 1: mapas iberoamericanos de corrosividad atmosférica. Madrid: Programa CYTED.
- Robles, J. (2013). Evaluación de la corrosión atmosférica en tres zonas geográficas de Costa Rica por medio de técnicas electroquímicas y gravimétricas. (Tesis de Licenciatura en Química Industrial). Universidad Nacional, Heredia.
- Santana, J., Santana, F., & González. (2003). The effect of environmental and meteorological variables on atmospheric corrosion of carbon steel, copper, zinc and aluminium in a limited geographic zone with different types of environment. *Corrosion Science*, 799-815.
- Solano, J., & Villalobos, R. (2000). *Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica*. San José: Instituto Meteorológico Nacional.

SOBRE LOS AUTORES:

Luis Garita Arce. Investigador en Centro de Investigación en Corrosión, Instituto Costarricense de Electricidad.
Correo electrónico: garitaluis@gmail.com

Javier Rodríguez Yañez. Investigador en Centro de Investigación en Corrosión, Instituto Costarricense de Electricidad.
Correo electrónico: urutico@gmail.com

Javier Robles Cordero. Investigador del Centro de Investigación en Corrosión, Instituto Costarricense de Electricidad.
Correo electrónico: jroblesco@ice.go.cr