

Niveles iniciales de corrosión atmosférica antes de la puesta en marcha de la Planta Geotérmica de las Pailas, Guanacaste, Costa Rica

Javier E. Rodríguez Yáñez

Centro de Investigación en Corrosión, Instituto Costarricense de Electricidad, CP 10032-1000, San José, Costa Rica, urutico@gmail.com

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

ABSTRACT: Baseline atmospheric corrosion in the Geothermal Plant Las Pailas, Guanacaste, Costa Rica. During the construction of the Las Pailas geothermal plant, atmospheric corrosion was evaluated for 5 years. Atmospheric monitoring and gravimetric analysis with low alloy steel (ASTM A36), were done according to ISO 9223 and its associated procedure. There were low values of pollution by chlorides and sulfates, around $5 \text{ mg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ and without important levels of acid rain, despite the proximity of an active volcano, which indicates an atmosphere of "rural type". TDH's level was 60 %, initial corrosion speed was $40 \text{ } \mu\text{m year}^{-1}$, and this stabilized after 3 years in $20 \text{ } \mu\text{m year}^{-1}$, with protective oxides. The accumulated corrosion estimated by the model meet ISO Corroag of ISO 9226. The Matlab model produced a best adjustment exponential model with a time dependence factor of 0,89.

Key words: Atmospheric corrosion, steel ASTM A36, ISO 9223, ISO 9224, ISO 9225 and ISO 9226.

RESUMEN: Durante la etapa de construcción de la planta geotérmica de Las Pailas, en las faldas del volcán Rincón de la Vieja, se evaluó de la corrosión atmosférica del sitio durante 5 años. El monitoreo de las características atmosféricas y el análisis gravimétrico con acero de baja aleación (ASTM A36), se realizó según la norma ISO 9223 y normas asociadas. Se obtuvieron valores bajos de contaminación por cloruros y sulfatos, del orden de $5 \text{ mg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y sin niveles importantes de lluvia ácida, a pesar de estar cerca de un volcán activo, lo que indica una atmósfera de tipo rural. Adicionalmente el nivel de tiempo de humectación fue del orden de 60%, con lo que se puede estimar que las características corrosivas del ambiente según la norma ISO 9223 y 9225, obteniendo una clasificación atmosférica de categoría tipo C3 (corrosividad media). Los valores de la velocidad de corrosión obtenidos para acero muestran niveles iniciales del orden de los $40 \text{ } \mu\text{m año}^{-1}$, estabilizándose al cabo de 3 años en niveles de $20 \text{ } \mu\text{m año}^{-1}$, asociados a la formación de óxidos protectores. La corrosión acumulada cumple con los valores estimados por el modelo ISO Corroag de la ISO 9226. La aplicación de modelado para la velocidad de corrosión por Matlab en función de los parámetros climáticos planteó un modelo de mejor ajuste exponencial, obteniéndose un factor dependencia con el tiempo de 0,89.

Palabras claves: Corrosión atmosférica, acero ASTM A36, ISO 9223, ISO 9224, ISO 9225 e ISO 9226.

La corrosión atmosférica en los países tropicales es un factor importante dentro de las consideraciones de deterioro de materiales metálicos, especialmente si se encuentra cerca de un volcán activo como el Rincón de la Vieja en Costa Rica. La evaluación de la corrosión atmosférica se torna de especial interés para el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), al proyectar instalar en dicho lugar una Planta Geotérmica (Mayorga Jimenez, 2010; Morcillo, Almeida, Rosales, Uruchurtu, & Marrocos, 1998).

La corrosión en los entornos volcánicos presenta afectación dependiente de factores asociados a la actividad volcánica existente, así como la dirección y la dispersión

de los contaminantes emitidos por el volcán. En el caso de los volcanes de Costa Rica los vientos alisios actúan como el principal dispersante de contaminantes en dirección oeste a suroeste (Solano & Villalobos, 2000; CNE, 2013).

Las normas ISO 9223 a 9226, generan un marco base para la realización de una clasificación inicial de la corrosividad atmosférica, según parámetros atmosféricos generales y algunas consideraciones sobre niveles de iones atmosféricos, en especial cloruros y dióxidos de azufre. (ISO 9223:1992, 1992; ISO 9225, 1992). Esta clasificación inicial se realizó en paralelo con una evaluación general de la corrosividad atmosférica por métodos

gravimétricos, con base en las normas ASTM G1, G33 y G50, que permiten determinar una velocidad de corrosión para los materiales tipo considerados en la normativa. (ASTM G1-03, 2003; ASTM G33-99 (2010), 1999; ASTM G50-76 (Reapproved 2003), 1976)

En Costa Rica los estudios de corrosión atmosférica se asocian en general a proyectos con financiamiento externo, tales como el Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica (MICAT), proyecto de Corrosión de Metales de uso electrónico en Ambientes agresivos (TROPICORR), la red temática de Protección anticorrosiva de metales en atmósferas iberoamericanas (PATINA), el proyecto de Duración de concretos (DURACON), realizándose en muy pocos casos en la cercanía de un volcán (Morcillo, Almeida, Rosales, Uruchurtu, & Marrocos, 1998; Alvarez-Castro & Pridyballo-Chekan, 2006; Troconis de Rincon, 2006).

MÉTODOS

Se instalaron en los alrededores del proyecto Geotérmico Las Pailas 3 estaciones de monitoreo de la corrosión por método gravimétrico, dos en pozos de extracción de vapor (pozo 01 y pozo 06) y uno en el Parque Nacional del Volcán Rincón de la Vieja, siguiendo las consideraciones de la norma ASTM G92-86 (ASTM G92-86 (Reapproved 2003), 1986).

Dichas estaciones se elaboran bajo la norma ASTM G 50-76, instalando probetas de acero estructural de baja aleación (ASTM A36). La composición del acero fue evaluada mediante espectrometría de descarga eléctrica luminiscente, empleando un espectrómetro marca LECO, modelo GDS 500A. Encontrando que la composición del mismo cumple con las especificaciones (ASTM G50-76 (Reapproved 2003), 1976; ASTM A36/A36M, 2012; Davies, 1998). Así mismo se controló los niveles de contaminación atmosférica en las estaciones del Parque Nacional Rincón de la Vieja (PNRV) y en el Pozo 06 del Proyecto Geotérmico Pailas (PGP 06), evaluando mensualmente cloruros y dióxido de azufre según lo especificado en la norma ISO 9225. (ISO 9225, 1992).

Se obtuvieron los parámetros meteorológicos de la estación meteorológica 74036 del ICE, con los cuales se realizó las estimaciones del tiempo de humectación (TDH) según la norma ISO 9223. Posteriormente y en base a los datos climáticos y de contaminantes atmosféricos, se aplican las normas ISO 9223 y 9224, para estimar la clasificación atmosférica y de esta los niveles de corrosión esperados. (ISO 9223:1992, 1992; ISO 9224, 1992).

Se realiza como comparación el cálculo de la velocidad de corrosión a largo plazo según la norma ISO 9224, considerando la velocidad de corrosión al final del primer año y el parámetro B2 de aproximación con 95 % de confianza según el programa ISO Corrag a 100 años (ISO 9224, 1992).

La ubicación de los puntos de control y la estación meteorológica se describen en el Cuadro 1, ubicándose los mismos en la zona sur oeste del Volcán Rincón de la Vieja.

CUADRO 1
Ubicación de las estaciones de muestreo
y de la estación meteorológica

Estación	Coordenadas	
PNRV	10°46'27.97"N	85°20'59.96"W
PGP 01	10°45'45.19"N	85°21'33.79"W
PGP 06	10°45'16.62"N	85°21'53.12"W
Meteorológica 74036	10°45'54.68"N	85°20'52.98"W

La preparación de las muestras para análisis gravimétrico siguió las condiciones de la norma ASTM G1-03 y ASTM G 50-76, tanto para la exposición como para la medición del deterioro de las mismas como pérdida de masa, los ensayos se realizaron por triplicado (ASTM G1-03, 2003; ASTM G50-76 (Reapproved 2003), 1976; ISO 9226, 1992).

El análisis de lluvias se realizó bisemanalmente durante la época de lluvias, como lluvia total, evaluando volumen, pH y bicarbonatos para valores de pH inferiores a 5,6. (EPA, 2013; Secretaria del Medio Ambiente, 2008) Adicionalmente se consultaron parámetros de la actividad volcánica en la Red Sismológica Nacional y con la Comisión Nacional de Emergencias (CNE, 2013; UCR, 2013).

El modelado de la velocidad de corrosión (V_{corr}) se realizó en base al modelo exponencial simple propuesto por Santana (González Sánchez, 2009; Santana Rodriguez, Santana Hernandez, & Gonzalez Gonzalez, 2003), en el cual se define la V_{corr} acumulada en función del tiempo de exposición, según la ecuación:

$$\log V_{corr} = a + n \times \log t + b \times Cl + c \times SO_2 + d \times TDH \quad (1)$$

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

El proceso de cálculo de los modelos se realiza en base a la herramienta "optimtool" de Matlab, seleccionando el sistema "lsqin" asociado a sistemas lineales con restricciones. Considerando la restricción de que $0 < n \leq 1$. (Mongay, 2005; MATLAB, 2013)

Se calculan como parámetros de control relaciones entre los valores obtenidos por las ecuaciones y los valores reales. Inicialmente se calcula el Error Medio Cuadrático (MSE), buscando que sea mínimo, calculado como:

$$MSE = \sum |Ec(t) - Valor(t)|^2 \quad (2)$$

Donde:

Ec(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

Se realizan difractometrías y micrografías para analizar la composición cualitativa de los óxidos formados, utilizando un difractor marca BRUKER axs, modelo d4 ENDEAVOR en el Laboratorio de Geología del Centro de Servicios de Recursos Geotérmicos y un microscopio electrónico de barrido marca Hitachi, modelo S 2360, en el Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas, de la Universidad de Costa Rica (UNED, 2013; Fontana M., 1986; Schweitzer, P. A., 1986).

Las evaluaciones se llevaron a cabo por 5 años desde abril del 2006 a abril del 2011, antes del inicio de actividades del Centro Geotérmico (ver apéndice).

RESULTADOS

Parámetros atmosféricos: Los siguientes cuadros presentan las principales variables climatológicas y de contaminación consideradas por la norma ISO 9223 para clasificar la categoría de corrosión y el modelado de la V_{corr} en el ambiente en Las Pailas.

El valor promedio de pH de las lluvias fue de 5,8 por lo cual no se considera afectación por lluvias ácidas (Secretaría del Medio Ambiente, 2008; EPA, 2013).

No hubo actividad volcánica de importancia en el periodo considerado.

La climatología de la región plantea dos épocas marcadas en el año, entre enero y abril una época seca, mientras que de mayo a diciembre una época lluviosa. La temperatura tiende a ser estable y cálida en un entorno de los 20°C, disminuyendo ligeramente al ascender en la montaña. Los vientos alisios del noreste, predominan durante la época seca, mientras que los del sudoeste durante la época lluviosa. La lluvia promedio anual esperada es de 2500 mm, por lo que los años 2006 y 2009 se consideraron secos, mientras que los años 2007, 2008 y 2010 se consideraron lluviosos (Solano & Villalobos, 2000).

CUADRO 2
Resumen de los datos meteorológicos y los contaminantes

Año	Precipitación (mm año ⁻¹)	TDH (% del año)	Cloruros (mg m ⁻² día ⁻¹)	Sulfatos (mg m ⁻² día ⁻¹)
2006	1478	54,5	4,12	3,97
2007	3384	56,6	5,74	6,35
2008	3961	59,0	4,52	4,22
2009	1644	52,4	4,49	4,73
2010	3648	72,4	4,44	4,83

CUADRO 3
Clasificación de TDH y contaminantes por año y la categoría de clasificación de corrosividad atmosférica según ISO 9223

Año	Clasificación TDH	Clasificación Cloruros	Clasificación Sulfatos	Categoría Corrosividad
2006	T4	S1	P0	C3
2007	T4	S1	P0	C3
2008	T4	S1	P0	C3
2009	T4	S1	P0	C3
2010	T5	S1	P0	C3 ó C4

A partir de los datos climatológicos se obtiene que el tiempo de humectación medio es de 4000 a 5000 horas al año, lo que representa del 50 al 60% del tiempo anual, dando una clasificación por tiempo de humectación de T4. La concentración de humedad en la época de lluvias plantea un nivel de tiempo de humectación del orden de T5 (80 %), mientras que durante la época seca sería de T3 (25 %). Mientras que los niveles promedio de contaminantes, evaluados como cloruros y sulfatos, se encuentran en promedio en el orden de 5 mg/m² día, lo que los ubica en categorías leves tipo P0 para sulfatos y S1 para cloruros (ISO 9225, 1992).

Estos parámetros plantean una atmósfera tipo rural o de baja contaminación, con una clasificación primaria, según la norma ISO 9223, de niveles de corrosión dentro de la categoría de corrosividad tipo C3 (media) para el acero, con valores de corrosión para el primer año del orden de (200 a 400) g m⁻² año⁻¹ ó (25 a 50) μm año⁻¹.

Mientras que para periodos de más de un año se utiliza la norma ISO 9224, la cual plantea como estimación para periodos de 5 años en atmosferas categoría tipo C3, una pérdida máxima de masa por corrosión de unos 928 g m⁻² para el acero de baja aleación (ISO 9223:1992, 1992; ISO 9224, 1992).

Velocidad de Corrosión Atmosférica: La figura 1 muestra la evolución de la velocidad de corrosión en las probetas de ensayo con el tiempo

El acero de baja aleación presentó una velocidad gravimétrica de corrosión inicial de 40 μm año⁻¹, la cual

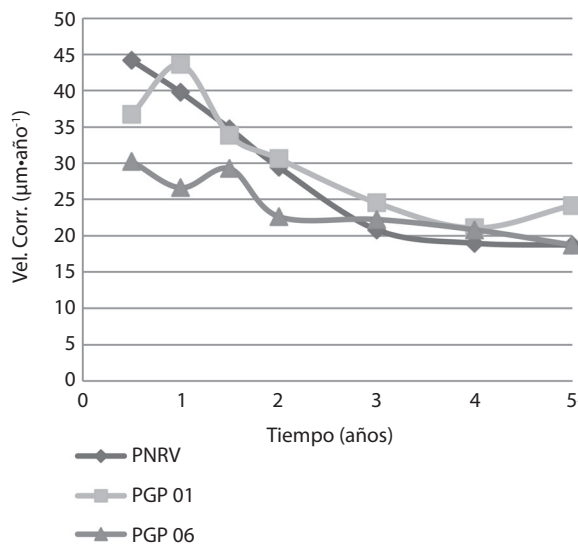


Fig. 1. Variación de la velocidad de corrosión con el tiempo para acero ASTM A36.

disminuye por la formación de óxidos superficiales, estabilizándose al cabo de 3 años en unos 20 μm año⁻¹.

La curva de velocidad de corrosión o de corrosión gravimétrica vista en el PN, es muy suave, teniendo un comportamiento más estable que los otros puntos de muestreo.

Mientras que el PGP 06, presenta valores iniciales menores, asociado quizás a una situación de protección natural por pequeñas elevaciones circundantes.

En tanto que el PGP 01, siendo el más expuesto a los vientos y lluvias, así como a la actividad de desarrollo del proyecto geotérmico, es el que presenta más variabilidad en los valores obtenidos de velocidad de corrosión o pérdida de masa por corrosión.

Modelos de corrosión: Los valores de pérdida de masa son en el primer año de unos 370 g/m², mientras que para el periodo de 5 años es del orden de los 800 g/m². Esto coincide con una atmosfera corrosiva tipo C3, con valores esperados de corrosión del primer año entre 200 y 400 g m⁻² y una corrosión máxima a los 5 años de 928 g m⁻². A partir de las estimaciones por el ISO Corrag se obtiene una velocidad de corrosión del orden de los 760 g m⁻², similar a los valores obtenidos en campo del orden de los 800 g m⁻² (1160 μm de espesor) de pérdida en 5 años. (ISO 9226, 1992; Singh, Yadav, & Saha, 2008)

El modelado de mejor ajuste a partir de valores promedio de la Vcorr acumulada, es de tipo exponencial, con un factor de dependencia con el tiempo de 0,89, asociado a la formación de películas de óxidos de baja protección inicial. (Morcillo , Almeida, Rosales, Uruchurtu, & Marrocos, 1998)

$$\log V_{corr} = -1,0343 + 0,8909 \log t - 9,2026E-5 P + 1,4409E-4 S - 2,6063E-5 TDH \quad R^2 = 0,99 \quad (3)$$

Difractometría: El análisis difractométrico y las micrografías sobre los productos de oxidación en el acero de baja aleación, presentan en los tres puntos composiciones similares, obteniéndose que las mismas constan principalmente de óxidos del tipo *Lepidocrocita* (γ-Fe⁺³O(OH)) y *Goethita* (α-Fe⁺³O(OH)). (UNED, 2013)

Los óxidos encontrados plantean una oxidación de tipo rural y con óxidos que evolucionan de *Lepidocrocita* (L) a *Goethita* (G), el cual es un oxido más protector. (Singh, Yadav, & Saha, 2008; Morcillo , Almeida, Rosales, Uruchurtu, & Marrocos, 1998; Miller & Miller, 2002)

Las relaciones estimadas de L/G pasan de valores iniciales de 60/40 a valores de 50/50 al año y 40/60 posteriormente.

DISCUSIÓN

La atmosfera en Las Pailas es de tipo rural dado los bajos niveles de contaminantes, donde la corrosión atmosférica está asociada principalmente a los niveles de TDH del orden del 60%. Esto se relaciona con niveles tipo C3 (de 25 a 50 $\mu\text{m a}\text{\u00b0}^{-1}$), según la ISO 9223. La velocidad de corrosión anual coincide con este nivel (promedio 37 $\mu\text{m a}\text{\u00b0}^{-1}$), mientras que las medidas a largo plazo nos muestran un decaimiento con el tiempo asociado a la formación de óxidos protectores, que se estabiliza luego del tercer año en valores de 20 $\mu\text{m a}\text{\u00b0}^{-1}$.

Los modelos de estimación a largo plazo de la ISO 9226 (ISO Corroag) presentan buen ajuste a esta situación, donde adicionalmente el modelado exponencial tiene una dependencia del tiempo de 0,89, asociado a la formación de óxidos de baja protección inicial que se vuelven más protectores con el tiempo.

Los valores obtenidos de nivel de corrosión, velocidad de corrosión, pérdidas gravimétricas y modelados se ajustan con los esperados y visualizados para otros estudios en Centroamérica y Costa Rica, donde no hay una afectación importante de los contaminantes atmosféricos. (Mariaca, Genesca, Uruchurtu, & Salvador, 1999; Garita, Rodríguez Yáñez, & Robles, 2014; Morcillo, Almeida, Rosales, Uruchurtu, & Marrocos, 1998)

AGRADECIMIENTOS

Se agradece de forma especial el apoyo brindado por el Centro de Servicios de Recursos Geotérmicos del ICE.

REFERENCIAS

- Alvarez-Castro, J., & Pridybailo-Chekan, G. (2006). Corrosión atmosférica en el Volcán Poás, proyecto TROPICORR. *Tecnología en Marcha*, v. 18, no. 2 Especial, 126-133.
- ASTM A36/A36M. (2012). *Especificación Normalizada para Acero al Carbono Estructural*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- ASTM G1-03. (2003). *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- ASTM G33-99 (2010). (1999). *Standard Practice for Recording Data from Atmospheric Corrosion Tests of Metallic-Coated Steel Specimens*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- ASTM G50-76 (Reapproved 2003). (1976). *Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- ASTM G92-86 (Reapproved 2003). (1986). *Standard Practice for Characterization of Atmospheric Test Sites*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- CNE. (2013). *Comisión Nacional de Emergencia*. Obtenido de Amenazas naturales al cantón de Liberia, Costa Rica: <http://www.cne.go.cr/Atlas%20de%20Amenazas/LIBERIA.htm>
- Davies, J. (1998). *Metals Handbook*, . Ohio, USA: ASM International.
- EPA. (enero de 2013). *Environmental Protection Agency*. Obtenido de Lluvia Ácida: <http://www.epa.gov/acidrain/spanish/measure/index.html>
- Fontana M. (1986). *Corrosion Engineering*. USA: 3ª Ed. Custom Publishing, Mac Graw Hill.
- 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.
- González Sánchez, P. (2009). *Estudio de la modelación matemática de la Corrosión atmosférica del cobre en la provincia de Las palmas. Caracterización de la velocidad de Corrosión mediante técnicas electroquímicas*. Las Palmas de Gran Canaria, España: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería de Procesos.
- ISO 9223:1992. (1992). *Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres - Classification*. Ginebra, Suiza: ISO.
- ISO 9224. (1992). *Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres - Guiding values for the corrosion categories*. Ginebra, Suiza: ISO.
- ISO 9225. (1992). 6. *Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres - Measurement of pollution*. Ginebra, Suiza: ISO.
- ISO 9226. (1992). *Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres - Determination of corrosion rate of standard specimens for de evaluation of corrosivity*. Ginebra, Suiza: ISO.
- 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/>
- Mayorga Jimenez, G. (2010). *Primer Taller Regional de Energía, ELEC2010, Asunción, Paraguay*. Obtenido de Perspectivas de la utilización de energías renovables, Sección 6, La geotérmica: caso de Costa Rica: <http://www.olade.org/electricidad/Documents/ponencias/Dia%2027%20>

de%20mayo/Sesion%206/Geoterminia_%20Caso%20de%20Costa%20Rica.pdf

Miller, J., & Miller, J. (2002). *Estadística y Quimiometría para química analítica*. Madrid, España: Prentice Hall, 4ª Edición.

Mongay, C. (2005). *Quimiometría*. Valencia, España: Universitat de Valencia, Edicucio Materials.

Morcillo, M., Almeida, E., Rosales, B., Uruchurtu, J., & Marrocos, M. (1998). *Corrosión y Protección de Metales en las Atmosferas de Iberoamérica, Parte I: Mapas Iberoamericanos de Corrosividad Atmosférica*. Madrid, España: Editor Programa CYTED.

Rincón, O. T. (2015). Concrete Carbonation in Ibero-American Countries DURACON Project: Six-Year Evaluation. *Corrosion*, Vol. 71, No. 4, pp. 546-555.

Santana Rodriguez, J., Santana Hernandez, F., & Gonzalez Gonzalez, J. (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*, (45) 799-815.

Schweitzer, P. A. (1986). *Corrosion Resistance Tables*. USA: Marcel Dekker.

Secretaria del Medio Ambiente. (2008). *Estado de la Lluvia Ácida en la Zona Metropolitana del Valle de México*. Mexico, Mexico: SEMARNAT.

Singh, D., Yadav, S., & Saha, J. (2008). Role of climatic conditions on corrosion characteristics of structural steels. *Corrosion Science*, (50) 93-110.

Solano, J., & Villalobos, R. (2000). *Regiones y Subregiones Climáticas de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.

Troconis de Rincon, O. (2006). Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results. *Building and Environment*, 41, 952-962.

UCR. (2013). *Red Sismológica Nacional*. Obtenido de Volcán Rincón de la Vieja, Costa Rica: <http://www.rsn.ucr.ac.cr/index.php/vulcanologia/informacion-general/27-rincon-de-la-vieja>

UNED. (2013). *UNED España*. Obtenido de Mineralogía Descriptiva: http://www.uned.es/cristamine/min_des-cr/busqueda/alf_mrc.htm

APÉNDICE

La metodología utilizada para cloruros es por candela húmeda en solución de glicerina al 40% m/m, mientras que para dióxidos de azufre se utilizaron candelas de PbO₂ en goma tragacanto (8 g de PbO₂ /1g de goma). Los análisis de las mismas se realizan por ión selectivo para cloruros y para sulfatos por formación de complejos con BaCl₂ y retro valorando con EDTA.

Las probetas de acero ASTM A36 son de 15 cm x10cm x 4 mm de espesor, expuestas a 30° de inclinación y separadas por aisladores plásticos. (ASTM G50-76 (Reapproved 2003), 1976; ASTM A36/A36M, 2012)

Especificaciones de acero ASTM A36 se expresa en el cuadro 4.

CUADRO 4
Composición porcentual del acero ASTM A36 (ASTM A36/A36M, 2012; Davies, 1998)

Tipo de acero	Composición (peso %)				
	C	S	Mn	P	Si
A-36	0,26	0,05	0,8 a 1,2	0,4	0,4

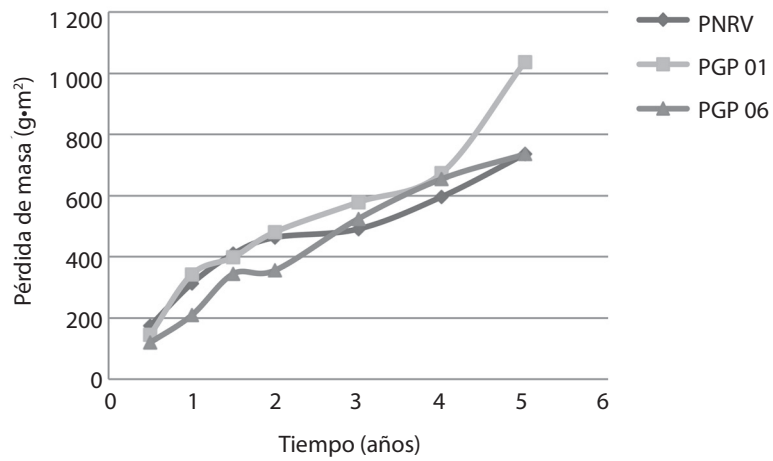


Fig. 2. Variación de la pérdida de masa por corrosión con el tiempo para acero ASTM A 36.

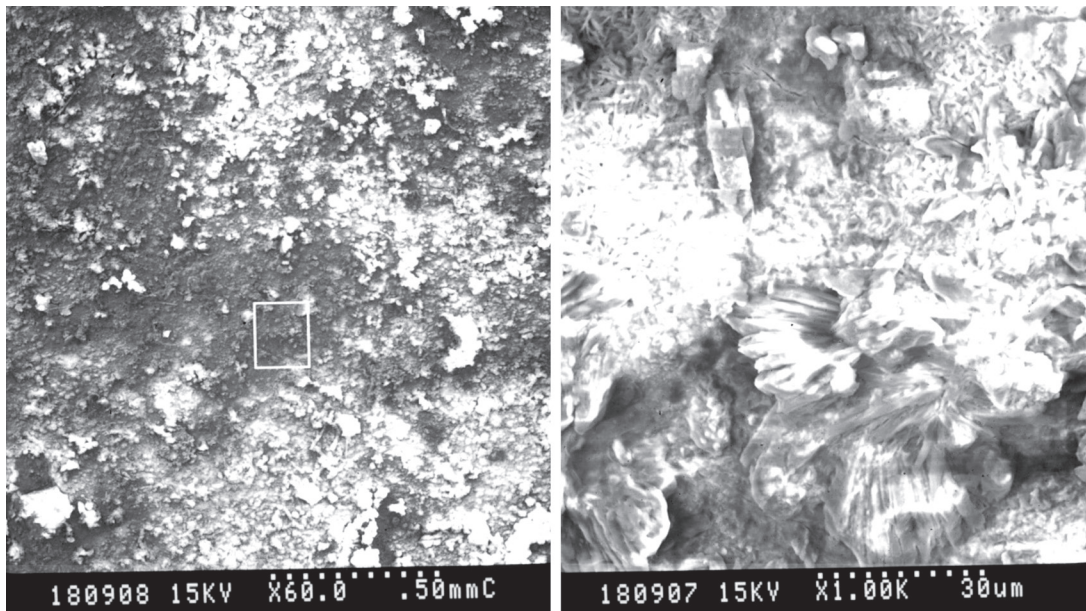


Fig. 3. Microscopia de acero ASTM A36 luego de un año de exposición en el Centro Geotérmico Las Pailas, a) barrido general, b) detalle con óxidos de *Goethita*.

