

# Corrosión atmosférica del acero al bajo carbono, a diferentes ángulos de exposición, en un ambiente tropical

## Atmospheric corrosion of low carbon steel, at different exposure angles, in a tropical environment

Ronald Jiménez-Salas<sup>1</sup>, Ronald Brenes-Brenes<sup>2</sup>, Javier Rodríguez-Yañez<sup>3</sup>, Jean Sanabria-Chinchilla<sup>4</sup>

Fecha de recepción: 23 de octubre, 2021

Fecha de aprobación: 6 de marzo, 2022

Jiménez-Salas, R., Brenes-Brenes, R., Rodríguez-Yañez, J., Sanabria-Chinchilla, J. Corrosión atmosférica del acero al bajo carbono, a diferentes ángulos de exposición, en un ambiente tropical. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 76-88.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5845>

1 Centro de Investigación en Ingeniería de Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: rjimenez@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-2240-6840>

2 Centro de Investigación en Ingeniería de Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: ronald.brenes@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-0856-5298>

3 Laboratorio de Ecología Urbana, Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica. Correo electrónico: jrodriguezy@uned.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-5539-3153>

4 Centro de Electroquímica y Energía Química, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Correo electrónico: jean.sanabria@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-9597-7636>

## Palabras clave

Corrosión atmosférica; acero al bajo carbono; ángulo de exposición; región tropical; ISO 9223.

## Resumen

En esta investigación se estudió la afectación del ambiente sobre la corrosión del acero al bajo carbono, en una región tropical de la zona central de Costa Rica, con el objetivo de establecer la variación de la velocidad de corrosión en función del ángulo de exposición. Para tal fin se colocaron probetas a diferentes ángulos ( $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  y  $90^\circ$ ), en tres estaciones a lo largo del Valle Central; asimismo se midieron los parámetros medioambientales como humedad, tiempo de humectación, temperatura y la presencia de contaminantes atmosféricos, como los sulfatos y los cloruros. Como principales resultados se determinó que el acero presentó un aumento lineal de la corrosión con la disminución del ángulo con respecto a la horizontal, así mismo la corrosión es uniforme en ángulos menores a  $60^\circ$  grados, presentando corrosión parcial en ángulos elevados, en especial para caras protegidas. La corrosividad se ubica en un nivel urbano leve tipo C2, según la normativa ISO.

## Keywords

Atmospheric corrosion; exposure angle; low carbon steel; tropical region; ISO 9223.

## Abstract

In this research, the effect of the environment in a tropical region of central Costa Rica on the corrosion of low carbon steel was studied, with the objective of establishing the variation of the corrosion rate as a function of the exposure angle. For this purpose, specimens were placed at different angles ( $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  and  $90^\circ$ ) in three stations along the Central Valley; environmental parameters such as humidity, wetting time, temperature and the presence of atmospheric pollutants, such as sulfates and chlorides, were also measured. As main results it was determined that the steel presented a linear increase of corrosion with the decrease of the angle with respect to the horizontal, likewise the corrosion is uniform in angles less than  $60^\circ$  degrees, presenting partial corrosion in high angles, especially for protected faces. Corrosivity is at a mild urban level, type C2, according to ISO standards.

## Introducción

La corrosión atmosférica es un fenómeno que se produce por efecto de la exposición de los materiales metálicos a las condiciones ambientales y que es una de las principales causas por las cuales se deterioran los metales y las aleaciones [1]; esta es responsable del detrimento de estructuras, equipos y componentes, y ocasiona anualmente muchas pérdidas económicas a empresas y gobiernos en todo el mundo, tanto por el reemplazo de elementos corroídos, como por el mantenimiento que es necesario aplicar para disminuir el efecto sobre ésta [2].

El grado de afectación de la corrosión atmosférica sobre un determinado tipo de material expuesto, depende de muchos factores que se pueden dividir en, los que corresponden propiamente al material, los relacionados con el entorno en el que está inmerso el material y la interacción que se da entre la superficie del material con el entorno. En el primer caso se considera el tipo de material, elementos de aleación, inclusiones no metálicas, tensiones mecánicas, productos de corrosión, etc. [3]; para el entorno influyen principalmente la humedad, temperatura, contaminantes ambientales, dirección de los vientos y finalmente, con respecto a la interacción, se consideran sobre todo el tiempo de humectación (TDH) y el ángulo de incidencia [4].

Con lo que respecta a los metales, los aceros al carbono son las aleaciones que más se ven afectados por la corrosión atmosférica, en particular los de bajo carbono, ya que son los tipos de aceros más utilizados en la fabricación de estructuras como edificios, puentes, entre otros [5]. Los aceros al bajo carbono presentan excelentes propiedades como su resistencia mecánica, conformabilidad, soldabilidad, sin embargo, una de sus debilidades radica en su resistencia media a la acción del medio ambiente, ya que se ve afectado por las condiciones ambientales como la humedad, la lluvia y agravadas cuando los electrolitos poseen contaminantes que aceleran esos procesos corrosivos [6].

Los contaminantes que mayoritariamente influyen el deterioro de los materiales por la corrosión atmosférica son los cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), cuyo origen se relaciona con la salinidad de los océanos [8], el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), que puede tener un origen diverso, como podría ser la contaminación por emanaciones de automóviles, actividades industriales o incluso por la emisión de gases durante las erupciones volcánicas [7]. En el caso de los cloruros, estos actúan principalmente de dos formas sobre la superficie del acero; en primer lugar, afecta la pasivación en la superficie del acero, al competir con el oxígeno en la formación de los productos de corrosión; pero también los cloruros, por su capacidad higroscópica, se disuelven en el agua superficial (humedad) y forman un agresivo medio de ataque sobre el acero, al mejorar la conductividad del electrolito [9].

El dióxido de azufre también influye de diferentes maneras la corrosión de un metal; primero actúa como un agente despolarizante catódico sobre la superficie metálica, lo que ocasiona una mayor corriente y por lo tanto una mayor velocidad de corrosión. Este contaminante también posee una excepcional solubilidad en el agua, y por poseer una mayor capacidad reductora que el oxígeno, ejerce sobre el acero un mayor efecto en la disolución del hierro, aun cuando esté presente en pequeñas cantidades [8,10]. Por otro lado, el  $\text{SO}_2$  también puede reaccionar en la atmósfera, formando  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , que genera condiciones ácidas y, por lo tanto, mayor efecto corrosivo sobre el acero [11].

Con lo que respecta a los aspectos ambientales circundantes, la humedad relativa sobre la superficie, la lluvia (tanto en su frecuencia, como en su intensidad), el rocío nocturno y la niebla proporcionan el electrolito que favorece el proceso corrosivo, y cobra mucha importancia en países tropicales, donde los periodos lluviosos pueden abarcar más de 7 meses al año y la humedad relativa anual supera el 70 %, en una buena parte del año. Esto también, aunado a condiciones de temperatura ambiental, donde en muchas zonas se alcanzan temperaturas durante el día de hasta 30 °C, bajando en las noches a unos 15 °C a alturas cercanas a los 1000 m s.n.m [13].

El ángulo de inclinación de la superficie metálica es otro de los factores que también puede tener influencia en el grado de afectación por la corrosión atmosférica, algunas investigaciones [3,4,10] ya han establecido que al aumentar el ángulo al cual está expuesto el metal, se produce un decrecimiento de la velocidad de corrosión en los aceros al carbono, así misma influencia la zona de ubicación de las misma y también la velocidad de los vientos que inciden sobre su superficie. Estos estudios sobre todo se realizaron en atmósferas marinas, donde se concluye además, que existe mayor afectación con mayor cantidad de contaminantes, en particular por la exposición a alta concentración de cloruros [10].

El Valle Central, donde se realizó el estudio, se ubica en la región central de Costa Rica y alberga la mayor concentración poblacional e industrial del país [15,16]. Tiene una extensión de 3250 km<sup>2</sup> y una altura que va de los 800 hasta los 1500 m s.n.m., una temperatura que oscila entre 12°C y 35 °C, dependiendo de la época del año y la altura. El Valle Central esta circundado por montañas, volcanes y presenta un clima sobre todo de tipo monzónico [18].

En esta investigación se estudió la influencia del ángulo de exposición sobre la corrosividad de un acero al bajo carbono, en tres estaciones y el posible efecto sumidero de los contaminantes en una cuenca urbano-rural del Valle Central de Costa Rica.

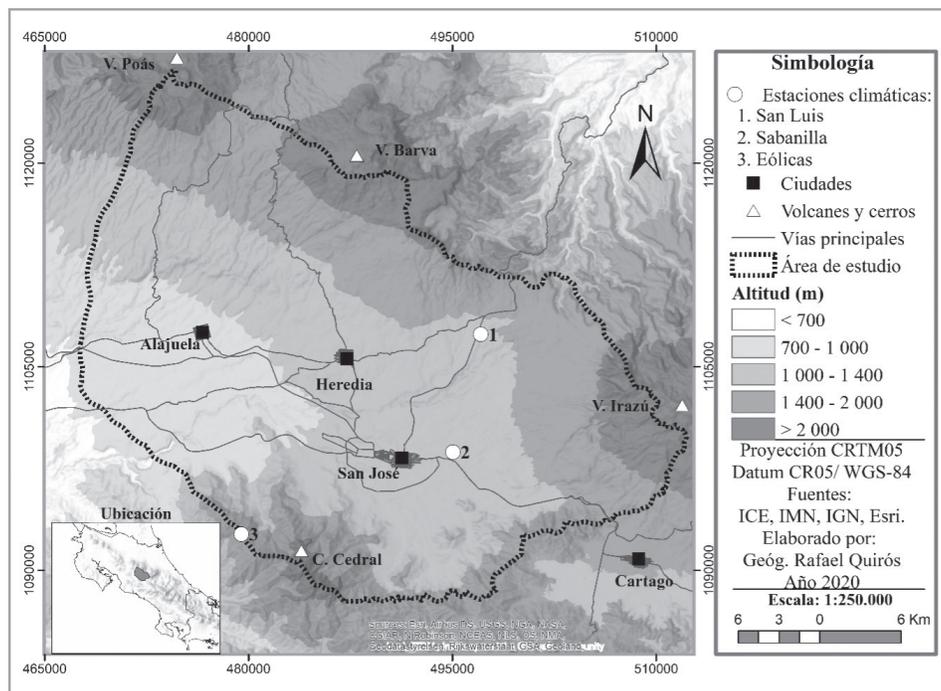
## Procedimiento experimental

### Preparación del material

El material en estudio fue un acero al bajo carbono y cuya composición era 0,055 %C; 0,266 %Mn; 0,031 %Si; 0,007 %S y 0,011 %P, determinada mediante un espectrómetro de emisión óptica, marca Leco, modelo GDS 500A. Las placas de estudio eran de 1 mm de espesor y se cortaron a un tamaño de 10 cm x 15 cm. Luego se limpiaron, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM G-1, donde, en un primer momento se les aplicó limpieza mecánica con un cepillo rotatorio cerdas de acero, para la eliminación del óxido, y poderlas llevar hasta la condición de metal blanco. Después se lavaron cuidadosamente con agua y jabón y se introdujeron en acetona, para luego secarlas con aire caliente y finalmente se identificaron, pesaron y se colocaron en bolsas hasta poderlas ubicar en el sitio de exposición.

### Condiciones de exposición atmosférica

La exposición de los especímenes se realizó en tres estaciones a lo largo del Valle Central, en la zona central de Costa Rica, como se puede observar en la figura 1. Una de las estaciones se ubicó en San Luis de Santo Domingo de Heredia (1) (estación San Luis); la otra en la Ciudad de la Investigación, en la Universidad de Costa Rica, en Sabanilla de Montes de Oca (2) (estación Sabanilla), y la última en el parque eólico, en los cerros de Escazú (3) (estación Eólicas), en la zona suroeste del Valle Central.



**Figura 1.** Ubicación de las estaciones de exposición de especímenes

En el cuadro 1 se presentan la ubicación más precisa de las estaciones, así como la altura y tipo de zona.

**Cuadro 1.** Características de estaciones de exposición atmosférica

Estación	Ubicación geográfica		Altura (m s.n.m.)	zona
	Latitud Oeste	Longitud Norte		
San Luis	84°01'53"	10°00'33"	1345	Rural
Sabanilla	84°02'49"	9°55'59"	1205	Urbana
Eólicas	84°11'14"	9°52'54"	1772	Rural

En los sitios de exposición, las placas se fijaron en bastidores de acero utilizando roldanas de acrílico, para garantizar un aislamiento eléctrico de éstas con respecto a la estructura metálica. Los bastidores se giraron y fijaron de tal manera que las placas quedaran expuestas a ángulos de 0°, 30°, 45°, 60° y 90°, con respecto a la horizontal. En la colocación de las placas también se consideró la afectación del viento, por lo que la orientación de éstas fue de frente a la dirección de los vientos. Para cada ángulo se dispusieron 4 probetas, 3 para determinar la afectación de la corrosión por medio del análisis de pérdida de peso y la otra fue utilizada para el análisis de composición de los óxidos por medio de difracción de rayos X.

#### Determinación de contaminantes ambientales

Con lo que respecta a la determinación de los contaminantes ambientales se siguió la norma ISO 9225:2012 [22], mediante la colocación de velas de plomo para determinación de SO<sub>2</sub> y velas húmedas para la determinación de los cloruros. Estas se ubicaron en casetillas a menos de 5 m de donde se expusieron las placas. La colocación y la extracción se realizó mensualmente durante el periodo de estudio. También se ubicaron medidores pasivos de contaminantes para corroborar las informaciones de los contaminantes. La clasificación de la corrosividad de las atmósferas se realizó según los criterios de la norma ISO 9223:2012[19].

#### Datos medioambientales

Los datos medioambientales tales como: temperatura promedio, precipitaciones, porcentaje de humedad relativa y vientos, se obtuvieron de estaciones meteorológicas cercanas a los sitios de estudio y pertenecientes del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica; en dos de las estaciones la distancia era menor a 200m, con excepción de las Eólicas donde se ubican a una distancia de aproximadamente 2 km.

#### Procesamiento de probetas corroídas

Las probetas se recolectaron después de 12 meses de exposición y se colocaron en bolsas plásticas para el procesamiento. Para la estimación de la velocidad de corrosión se siguió la norma ISO 9226:2012 [23]. Para los análisis difractométricos, se cortaron cuidadosamente las placas mediante cizallado. En el análisis de los productos de corrosión por XRD se usó un difractómetro de rayos X PANalytical EMPYREA.

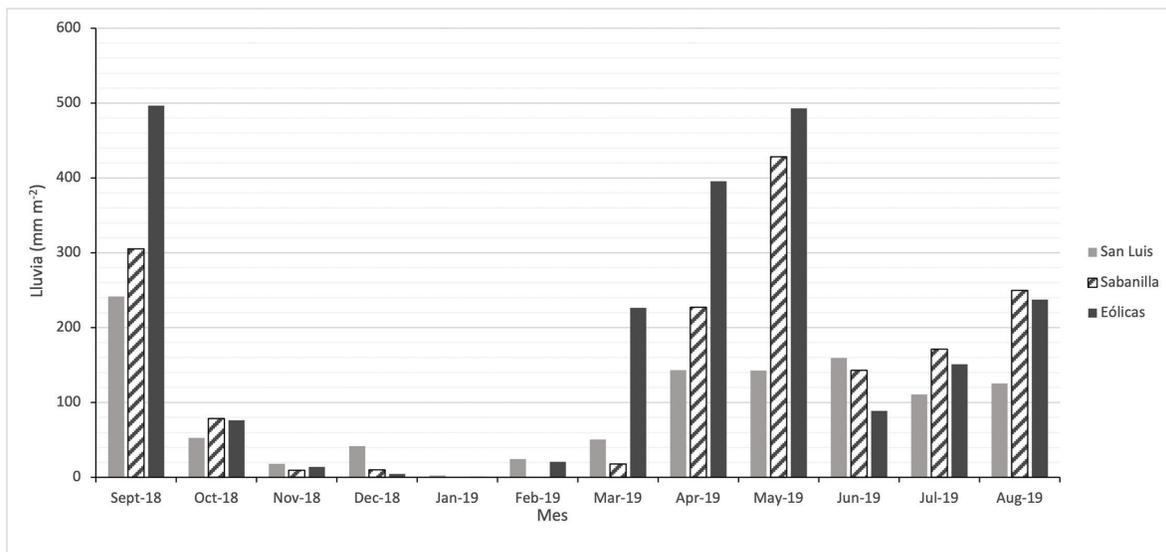
#### Resultados y discusión

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos después de un año de exposición de las probetas al medio ambiente.

### Datos ambientales

Costa Rica es un país tropical donde las estaciones se pueden dividir en época lluviosa y época seca. La época lluviosa abarca de mayo a noviembre y la época seca de diciembre a abril aproximadamente, ya que en algunos años esos periodos se ven afectados por los denominados fenómenos de El Niño y La Niña, que incrementan o reducen esos periodos [20].

Como se observa en la figura 2, donde se muestran los promedios de las precipitaciones en las estaciones durante el año de estudio, en setiembre se presentó una alta precipitación, principalmente en la estación Eólicas, donde el promedio estuvo cercano de 500 mm\*m<sup>-2</sup> y en una menor medida, en las estaciones San Luis y Sabanilla, donde se precipito un promedio entre 250 y 300 mm\*m<sup>-2</sup>. Luego, hay un descenso durante la época seca, hasta llegar prácticamente a cero en enero. En mayo, que corresponde a la época donde normalmente se consolida la época lluviosa, se produce un pico de precipitaciones, sobre todo en la zona de las eólicas, para luego seguir con una menor cantidad en los demás meses. El promedio anual de lluvia es mayor en la región de las eólicas y menor en la estación San Luis, donde las precipitaciones solo alcanzan el 53 % de las precipitaciones que se produjeron en las eólicas. Para el caso de estación Sabanilla, las precipitaciones casi corresponde a un valor promedio entre las estaciones de Eólicas y San Luis, como se observa en el cuadro 2.



**Figura 2.** Promedio de precipitaciones mensuales en estaciones de estudio.

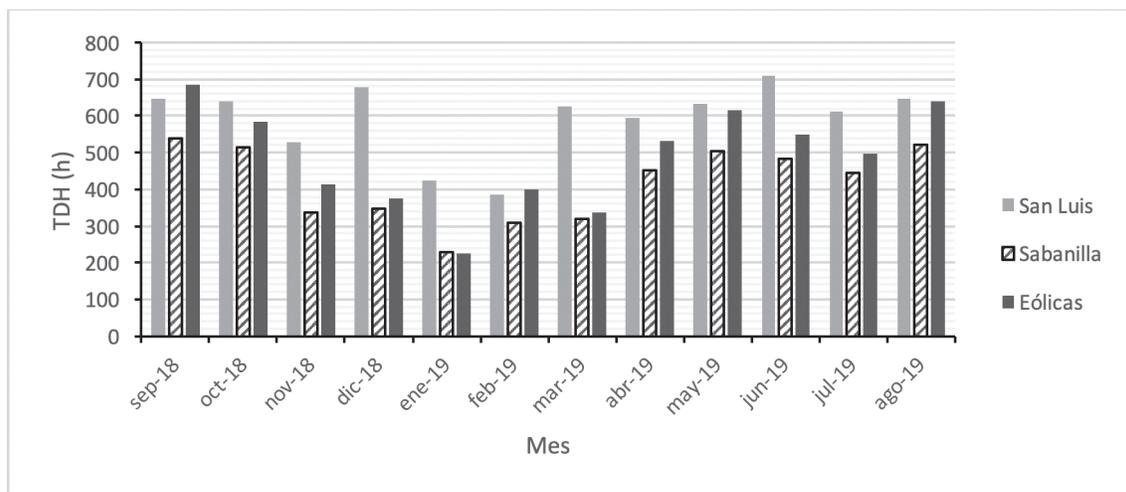
**Cuadro 2.** Resumen de datos medioambientales para las estaciones

Parámetro / Estación	Eólica	Sabanilla	San Luis
T m (°C)	19 °C (16 °C-23 °C)	22 °C (17 °C-27 °C)	21 °C (16 °C-26 °C)
HR (%)	83	80	90
Lluvia acumulada (mm m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> )	2122	1641	1134
Velocidad del viento promedio (m s <sup>-1</sup> )	3,10	2,04	3,00

Con respecto a la temperatura promedio, los valores son muy similares en las tres estaciones durante el año; aspecto que está más determinado por la altura en que se ubican éstas y no tanto por los cambios estacionales, como si ocurre en regiones más alejadas del Ecuador en el hemisferio norte y sur. Así también se produce una variación de la temperatura que fluctúa entre el día y la noche, con promedios de día de hasta 26 °C y en la noche descendiendo hasta valores de 16 °C.

El porcentaje de humedad relativa es bastante alta en las tres zonas, alcanzando valores de 80 % o más, factor de mucha importancia en la corrosión de los aceros y otros metales, al actuar como electrolito en el proceso electroquímico, lo cual ha sido determinado en los estudios que se han hechos en varias regiones del planeta [24,25], sobre todo cuando se combina con contaminantes ambientales como los sulfatos y los cloruros.

Con lo referente al tiempo de humectación (TDH), los valores obtenidos se muestran en la figura 3. Estos valores se ubican en una categoría  $\tau_5$  (TDH > 5500 h/a) para la estación de San Luis, con excepción de los meses de enero y febrero, donde descienden a  $\tau_4$  (2500 > TDH < 5500), según la clasificación de ISO 9223:2012. Para el caso de Sabanilla, la mayoría de los meses en la época lluviosa alcanza valores de  $\tau_5$ , pero de noviembre a abril desciende a  $\tau_4$ , que es concordante aproximadamente con la época seca. En el caso de las eólicas, su comportamiento es similar al de Sabanilla, pero presenta picos más altos de TDH en algunos meses del año. Con estos valores altos de tiempo de humectación, donde los promedios anuales son 5916h/a, 4992h/a y 5856h/a para las estaciones de San Luis, Sabanilla y Eólicas respectivamente, la corrosión se ve favorecida dada la alta exposición a electrolito durante todo el año, como se mencionó anteriormente con respecto a la humedad relativa; esta es una condición que se presenta y caracteriza a muchas zonas tropicales ecuatoriales.

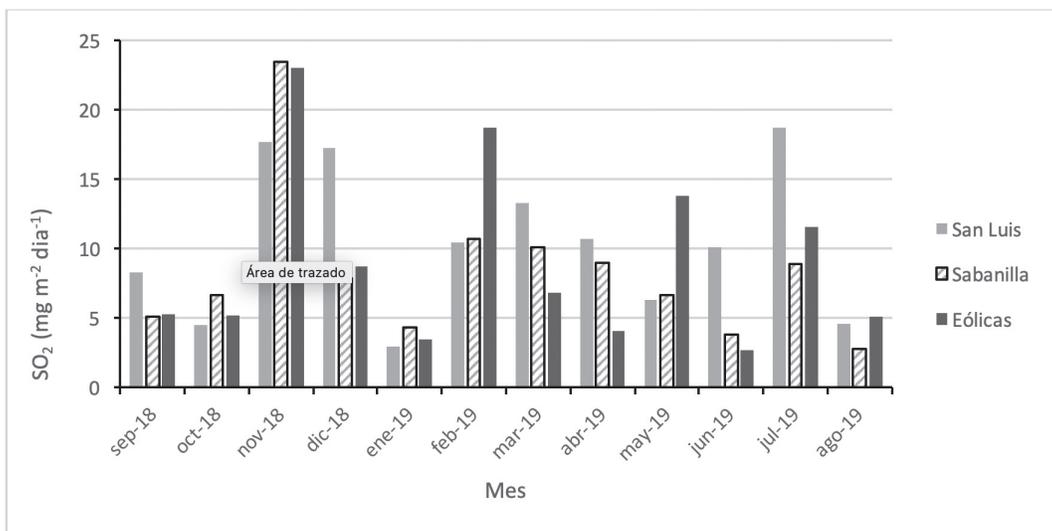


**Figura 3.** Tiempo de humectación mensual (TDH) en las diferentes estaciones.

### Contaminantes atmosféricos

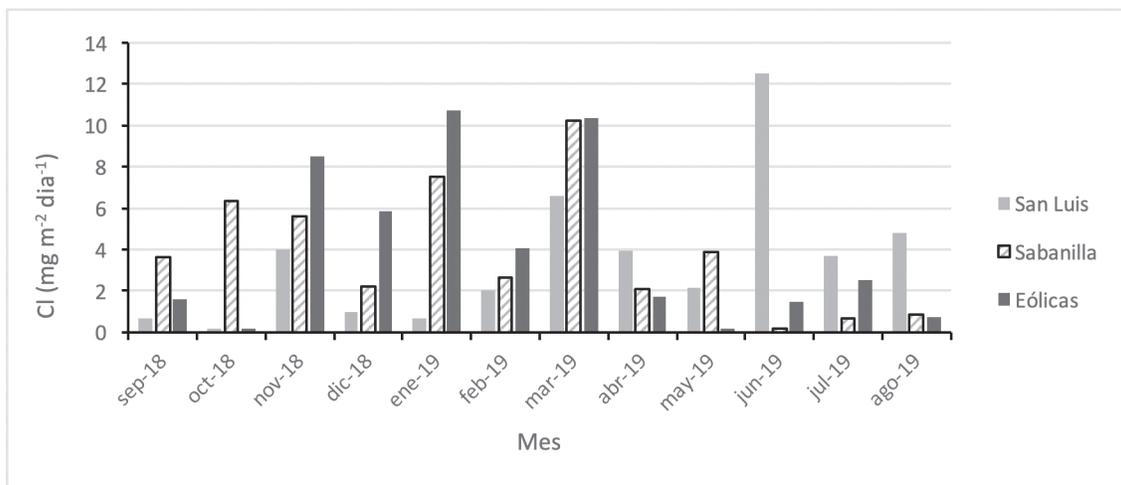
La presencia de dióxido de azufre en la atmósfera se muestra en la figura 4. Como se observa, existe bastante variación entre los diferentes meses de estudio, donde en meses como noviembre se alcanzan valores arriba de 20 mg m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, pero en enero bajan a menos de 5 mg m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, lo que representa una disminución de más de 80%, sin embargo promediando

los valores obtenidos, se tiene una concentración anual de  $10,4 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  para la estación San Luis,  $8,3 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  para Sabanilla y  $9,1 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  para la estación Eólicas, lo que las ubicaría como nivel  $P_1$ , correspondiente con una atmósfera urbana en los tres casos, según las normas ISO 9223:2012. Con estos resultados se puede anotar que la zona de San Luis presenta la mayor contaminación por dióxido de azufre, aspecto que podría ser contradictorio con lo esperado, ya que esta estación se ubica en una zona agrícola rural, donde se esperaría una menor contaminación por efecto de las emisiones de automóviles, sin embargo, al analizar con más detalle la figura 4, se observan algunos picos de concentración, que concuerdan con erupciones volcánicas de cenizas y gas originadas por el Volcán Turrialba en los periodos de tiempo en que se realizó la investigación, donde dicho volcán estuvo muy activo. Por la variación en la dirección de los vientos se podría hipotetizar que estas emisiones también pudieron afectar las otras estaciones, ya que éstas también ofrecen variaciones importantes entre los diferentes meses.



**Figura 4.** Determinación mensual de bióxido de azufre en las diferentes estaciones.

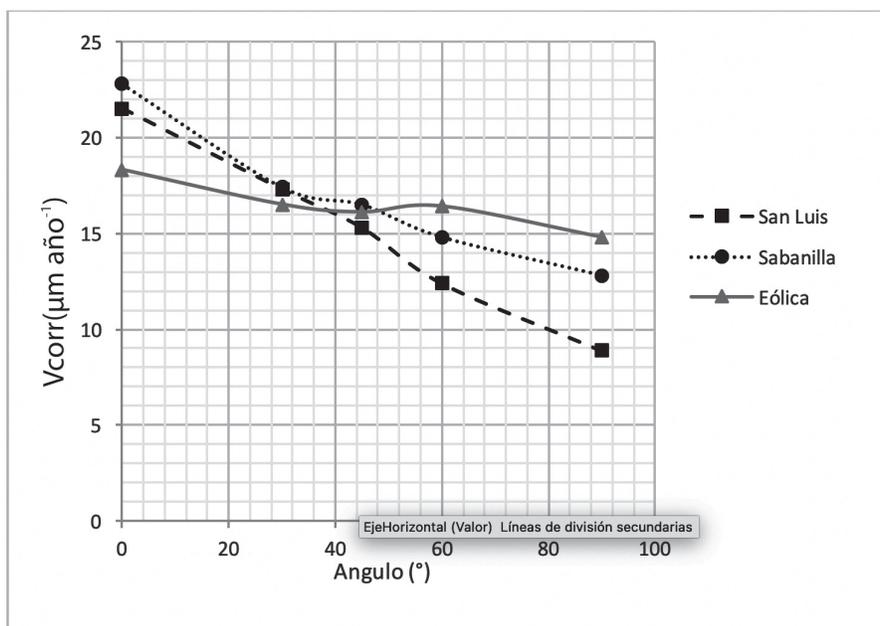
En la figura 5 se muestra la variación mensual de los cloruros. Al igual que para los sulfatos, existe bastante variación entre los meses. Los valores promedio anuales muestran una concentración de  $3,52 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  para la estación San Luis,  $3,82 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  para Sabanilla y  $4,00 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  para la estación eólica, lo que las ubicaría como nivel  $S_1$ , pero estos valores están muy cercanas al límite inferior, ya que este nivel el rango de la norma ISO 9223:2012 esta entre  $3 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  y  $\text{mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , lo que podría asociarse con un nivel bajo de cloruros.



**Figura 5.** Determinación de Cloruros en las diferentes estaciones mensualmente.

### Velocidades de corrosión del acero

Las velocidades de corrosión en función de los ángulos de exposición se muestran en la figura 6. Para todos los casos, la corrosividad se ubica en un nivel bajo, que correspondería a una categoría C2, según la norma ISO 9223:2012.



**Figura 6.** Velocidad de corrosión del acero para diferentes ángulos de exposición en las estaciones de estudio.

Para los diferentes ángulos hay una pequeña variación entre los valores obtenidos para las diferentes estaciones, siendo mayor para los ángulos mayores ( $90^\circ$ ) y menores ( $0^\circ$ ) y más cercanos entre sí, para los ángulos que comúnmente se usan para evaluar la corrosión atmosférica, como son los ángulos de  $45^\circ$  y  $30^\circ$ . Los valores promedio para cada ángulo de las tres estaciones fueron de 21, 17, 16, 15, 12  $\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$  para los ángulos de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente.

### Productos de corrosión

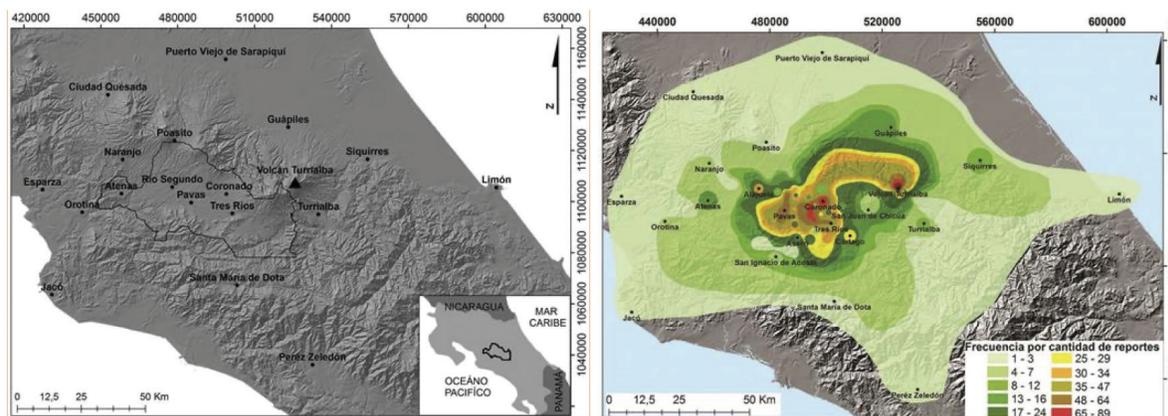
Los análisis difractométricos realizados a los productos de corrosión a diferentes ángulos, mostraron la presencia de dos compuestos, como son la lepidocrocita ( $\gamma\text{-FeOOH}$ ), como componente en mayor proporción (65 %) y la geothita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ) (35 %). Estas sustancias fueron muy similares para los diferentes ángulos y estaciones.

### Discusión de resultados

La corrosión producida sobre el acero, en las tres estaciones de estudio, se ubica en el rango de corrosión bajo (C2) para todos los casos, a pesar de que de tiempos de humectación indican valores medios y altos ( $\tau_4\text{-}\tau_5$ ); sin embargo, la presencia de contaminantes es baja, ya que los promedios obtenidos se ubican en un nivel  $P_1$  para sulfatos y  $S_1$  para cloruros. Este nivel de clasificación de atmósferas sería concordante con una de tipo urbano [21], que coincide con una de las zonas donde se ubica una de las estaciones, como lo es la estación de Sabanilla, no tanto así para las estaciones de San Luis y Eólicas, que están en una zona rural.

Aunque los promedios anuales de sulfatos son bajos, en algunos meses se presentaron valores altos de hasta  $24 \text{ mg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ , aspecto que se atribuye a las erupciones de gases y ceniza del volcán Turrialba, que durante el año de estudio mostro mucha actividad, y por la intensidad de las erupciones y la variación en la dirección de los vientos, afecto diversas zonas del valle central, como se ver en figura 7, donde se muestra la zonas afectadas por erupciones entre el 2010-2017, y aunque corresponde a un periodo anterior, durante el 2018 siguieron ocurriendo erupciones de importante magnitud [28].

En caso de los cloruros, la presencia de éstos se atribuye a la relativa cercanía de la Costa Atlántica y Pacífica; para el caso de la costa atlántica los cloruros pueden ser transportados por los vientos que atraviesan los pasos ubicados entre montañas, principalmente el paso de la Palma, y que circulan en el Valle Central normalmente en dirección noroeste. Para el caso de la costa pacífica, también estos pueden ingresar al valle por las direcciones variantes de los vientos que se presentan entre el día y la noche [26]. Estos vientos son muy variables en intensidad y en dirección, por lo que pudieron ser los responsables de los picos que dan en algunos meses, ya que como se observa en la figura 5, no se mantienen constantes en el tiempo [27].



**Figura 7.** Erupción del volcán Turrialba, zonas de afectación e isofrecuencias por caída de cenizas entre el 2010-2017 [28].

Al analizar las variaciones de la velocidad de corrosión con respecto a los ángulos de exposición, en todos los casos se observa una menor corrosividad a medida que se aumenta el ángulo de exposición. Este es un comportamiento que se ha visto en otros estudios y que se atribuye a una mayor acumulación de humedad y contaminantes [4,14] en los ángulos más bajos, ya que por la posición los contaminantes permanecen más tiempo en contacto con la superficie metálica y resulta más difícil su remoción por efecto de las lluvias, que si se produce a ángulos más horizontales.

La estación que presentan mayor variación entre los valores de corrosión con respecto a los ángulos es la de San Luis, ya que la velocidad de corrosión en la superficie expuesta a 90°, con respecto a la colocada a 0°, disminuye en aproximadamente en un 60 %. Para el caso de Sabanilla y eólicas, las variaciones son de entre 45 % y 20 %, respectivamente. Otro aspecto importante de anotar es que la variación de velocidad de corrosión, que se presenta en las placas colocadas a 30° con respecto a las colocadas a 45°, son variaciones relativamente pequeñas (dentro de los rangos de incertidumbre de las tres placas analizadas que ronda el 5% para el proceso de decapado) y que tiene su importancia, ya que estos ángulos son los mayormente usados para los estudios estandarizados de la velocidad de corrosión atmosférica. Otro aspecto por resaltar es que la inspección visual de las placas indica una corrosión generalizada en la cara expuesta a la dirección de los vientos, pero la cara opuesta muestra grados de afectación distintos a mayores ángulos, donde la corrosión solo afecto una cierta proporción de la placa. Con respecto a los óxidos formados, los óxidos obtenidos son la lepidocrosita y la goethita. Estas dos especies son consecuentes con los resultados que se han obtenido en otras investigaciones [12,17], y que son las formas químicas, de los productos de corrosión de los aceros al bajo carbono, prevalecientes en atmósferas rurales y urbanas después de un año de exposición.

## Conclusiones

La corrosividad en los lugares de muestreo corresponde a una atmósfera urbana leve, de tipo C2, a lo largo de todo el Valle Central, ya que en las tres estaciones se obtuvo un comportamiento muy similar.

Los niveles de contaminación son bajos, pero con variabilidad asociada tanto con las erupciones volcánicas, en el caso de dióxido de azufre, como a los vientos para el cloruro. Debido a esto se considera que el factor controlante parece ser el tiempo de humectación, el cual es elevado (usualmente  $\tau_5$ ).

En esta investigación se ha corroborado que la exposición del acero a la atmósfera, a diferentes ángulos de exposición genera variaciones en las velocidades de corrosión, siendo mayor en las posiciones más horizontales y disminuyendo hasta la posición vertical, esto debido principalmente a la mayor permanencia del electrolito y de los contaminantes atmosféricos sobre la superficie metálica.

Se determinó que no existe una variación significativa de la corrosión entre sitios en los rangos usuales de evaluación de la corrosión atmosférica a 30° y 45°, así como que la corrosión es uniforme en ángulos menores a 60°, presentando corrosión parcial en ángulos elevados, en especial para caras protegidas (lado mirando al suelo).

Finalmente, se puede establecer que la colocación de materiales con ángulo más horizontales traería consigo un mayor impacto corrosivo, aunque esto no necesariamente coincide con las necesidades de diseño, pero si es un aspecto importante para tomar en cuenta con respecto a las necesidades de sistemas de protección en componentes y estructuras fabricadas de acero al bajo carbono.

## Agradecimientos

Se agradece especialmente al Instituto Nacional de Meteorología y al Instituto Costarricense de Electricidad por facilitar los datos meteorológicos del Valle Central Occidental. Los datos reales de corrosión se obtuvieron de los sitios de medición ubicados en las instalaciones de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz y del Ministerio de Seguridad. Este estudio fue financiado por el Consejo Nacional de Presidentes de Universidades (CONARE) de Costa Rica, como parte de un proyecto de colaboración entre la Universidad Estatal a Distancia (UNED-VINVES-6-10-50), la Universidad de Costa (UCR-VI-805-B8-650), el Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT-VI-269-2017), la Universidad Nacional (UNA- SIA: 0600-17) y el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR-VIE 1490-021)

## Referencias

- [1] NACE International Impact. International measures of prevention, application and economic of corrosion technology study. Houston, TX, USA: NACE International, 2016. Available from: <http://impact.nace.org/executive-summary.aspx> [Accesed 15th december 2019]
- [2] Hansson, C.M."The Impact of corrosion on Society". In *Metallurgical and Materials Transactions A*. Volumen 42A, October, 2011.
- [3] Morcillo M., Chico B., Díaz I., Cano H., de la Fuente D. "Atmospheric Corrosion Data of Weathering Steels. A Review". *Corrosion Science*. Volume 77, 2013, pp 6-24
- [4] Vera, R., Rosales, B., Tapia, C. "Effect of the exposure angle in the corrosion rate of plain carbon steel in a marine atmosphere. *Corrosion Science*, 45, 2003, pp 321–337.
- [5] Murkute Pratik, Kumar Ravi, Choudhary S., Maharana H.S., Ramkumar J., Mondal K. "Comparative Atmospheric Corrosion Behavior of a Mild Steel and an Interstitial Free Steel". In *Journal of Materials Engineering and Performance*. Volume 27(9), 4497. 2018.
- [6] Alcántara Jenifer, de la Fuente Daniel, Chico Belén, Simancas Joaquín, Díaz Iván, Morcillo Manuel. "Marine Atmospheric Corrosion of Carbon Steel. A Review". In *Materials*. MDPI, Publisher of Open Access. 2017.
- [7] J. Tidblad, V. Kucera, F. Samie, S. N. Das, C. Bhamornsut, L. C. Peng, K. L. So, Z. Dawei, L. T. H. Lien, H. Schollenberger, C. V. Lungu and D. Simbi, ""Exposure Programme on Atmospheric Corrosion Effects of Acidifying Pollutants in Tropical and Subtropical Climates". In *Water Air Soil Pollut-focus*. 2007, pp 241-247.
- [8] Wenjuan Chen, Long Hao, Junhua Dong, Wei Ke. "Effect of Sulphur dioxide on the corrosion of a low alloy Steel in simulated coastal industrial atmosphere".in *Corrosion Science*, 83, 2014. pp 155-163.
- [9] Zhao-liang Li, Kui Xiao, Chao-fang Dong, Xue-qun Cheng, Wei Xue, Wei Yu. "Atmospheric corrosion behavior of low-alloy steels in a tropical marina environment" in *J. Iron Steel Res. Int.* 26, 2019, pp 1315–1328.

- [10] Groysman A.) "Corrosion in Natural and Industrial Environments" In: *Corrosion for Everybody*. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3477-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3477-9_3). 2010
- [11] Xinran Li, Xiutong Wang, Liyuan Wang, Yuanyuan Sun, Binbin Zhang, Hongling Li, Yanliang Huang, and Baorong Hou. "Corrosion Behavior of Q235 Steel in Atmospheres Containing SO<sub>2</sub> and NaCl". In *Journal of Materials Engineering and Performance*. 28. 2019
- [12] Qing-he Zhao, Wei Liu, Jian-wei Yang, Yi-chun Zhu, Bin-li Zhang, and Min-xu Lu. "Corrosion behavior of low alloy steels in a wet-dry acid humid environment", In *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Volume 23, Number 9, 2016.
- [13] Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica Segunda Comunicación sobre Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. San José, Costa Rica: MINAET, IMN, PNUD, CRRH. 2008 Available from: [http://users.clas.ufl.edu/prwaylen/geo3280articles/el\\_clima\\_variabilidad\\_y\\_cambio\\_climatico\\_en\\_cr\\_version\\_final.pdf](http://users.clas.ufl.edu/prwaylen/geo3280articles/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf) [Accesed 22 december 2020]
- [14] Santana Juan J., Cano Víctor, Vasconcelos Helena C., Souto Ricardo M. "The Influence of Test-Panel Orientation and Exposure Angle on the Corrosion Rate of Carbon Steel". In *Mathematical Modelling. Metals*. 10, 2020.
- [15] PRUGAM. Planificación Regional Urbana del Gran Área Metropolitana, San José, Costa Rica, Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos, 2009. Available from Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos: <http://www.mivah.go.cr/PRUGAM.shtml> [Accesed 23th december 2019]
- [16] INEC. Anuario Estadístico 2010. San José, Costa Rica: Instituto Nacional de Estadística y Censos, Ministerio de Hacienda, 2011. Available from: [https://www.inec.cr/sites/default/files/documentos/anuario\\_estadistico\\_publicaciones/reanuarioestad2010-02.pdf](https://www.inec.cr/sites/default/files/documentos/anuario_estadistico_publicaciones/reanuarioestad2010-02.pdf) [Accesed 20th november 2019]
- [17] Chen Pan, Wei Han, Zhenyao Wang, Chuan Wang, and Guocai Yu. "Evolution of initial Atmospheric Corrosion of Carbon Steel in an Industrial Atmosphere", in *ASM International*. Vol 25(12). 2016.
- [18] Solano, J., & Villalobos, R. Regiones y Subregiones Climáticas de Costa Rica. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional, 2000. Available from: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica#:~:text=Esta%20misma%20disposici%C3%B3n%20monta%C3%B1osa%2C%20junto,cual%20pertenece%20la%20Regi%C3%B3n%20Valle> [Accesed 12th june 2019]
- [19] Corrosion of metal and alloys, Classification of corrosivity of atmospheres, ISO DIS 9223, ISO, Geneva. 2012.
- [20] National Oceanographic and Atmospheric Administration, National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center. Available from: <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2019&basin=atl> [Accesed 14th may 2021]
- [21] Corrosion of metal and alloys, Guiding values for the corrosivity categories of atmospheres, ISO DIS 9224, ISO, Geneva. 2012.
- [22] Corrosion of metal and alloys, Corrosivity of atmospheres, methods of measurement of pollution ISO DIS 9225, ISO, Geneva. 2012,
- [23] Corrosion of metal and alloys, Corrosivity of atmospheres, Determination of corrosion rates of standard specimens for the evaluation of corrosivity, ISO DIS 9226, ISO, Geneva, 2012,
- [24] Morcillo M. "Fundamental and research frontier of atmospheric corrosion". Madrid, Spain: Materials, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-03842-642-4>.
- [25] Wei Han, Chen Pan, Zhenyao Wang and Guocai Yu Initial. "Atmospheric Corrosion of Carbon Steel in Industrial Environment". In *Journal of Materials Engineering and Performance*. Volume 24(2), 2015.
- [26] Xiao Kui, Dong Chao-fang, Li Xiao-gang, Wang Fu-ming. "Corrosion Products and Formation Mechanism During Initial Stage of Atmospheric Corrosion of Carbon Steel". In *Journal of Iron and Steel Research International*. 15(5), 2008. pp42-48.
- [27] Muñoz AC, Fernández W, Gutiérrez JA, & Zárate, E. 2002. "Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia". *Tópicos meteorológicos y oceanográficos* 9 (1): 1-13.
- [28] Campos D, Alvarado G.(2018) "Análisis de la distribución espaciotemporal de la caída de cenizas del volcán turrialba (2010 - 2018), costa rica: isofrecuencia, volumen y afectación" *Rev. Geol. Amér. Central* n.59 San Pedro de Montes de Oca Jul./Dec.