

CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA DE CHILE

R. Vera⁽¹⁾, D. Delgado⁽¹⁾, R. Araya⁽¹⁾, Mónica Puentes⁽¹⁾, I. Guerrero⁽²⁾, P. Rojas⁽³⁾, G. Cabrera⁽⁴⁾, S. Erazo⁽⁵⁾ y A. M. Carvajal⁽⁶⁾

(1) Instituto de Química, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, CHILE.

(2) Instituto de Estadística, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, CHILE.

(3) Escuela de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, CHILE.

(4) Escuela de Ingeniería Informática, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, CHILE.

(5) Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, CHILE.

(6) Escuela de Construcción Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile, CHILE.

E-mail:rvera@ucv.cl

RESUMEN

La corrosión atmosférica es la causa más frecuente de deterioro que sufren los metales y sus aleaciones, ya que la gran mayoría de las construcciones, estructuras y piezas metálicas se encuentran expuestas a la acción del medio ambiente. La ocurrencia de este proceso disminuye la vida útil del metal, creando deficiencias operativas en las plantas industriales, generando inesperadas mermas en la producción y provocando elevados costos de reparación, detenciones y/o reemplazos.

Por tanto el objetivo de este trabajo es la construcción de un mapa de corrosividad atmosférica, basado en la agresividad ambiental, para los metales y aleaciones que, en su conjunto, constituyen los de mayor interés tecnológico: acero, cobre, aluminio y acero galvanizado, con el fin de seleccionar de manera óptima los materiales a utilizar en estructuras metálicas en diferentes zonas ambientales de Chile, el cual representa una importante Innovación respecto a la investigación de la corrosión atmosférica.

En una primera etapa del proyecto, se instalaron estaciones de estudio, dentro de las cuales se dispusieron bastidores para exponer las diferentes muestras metálicas a la corrosión, en 30 lugares a lo largo del país. Las muestras metálicas fueron dimensionadas de acuerdo a las normas ISO 9223 a 9226. Paralelamente, se instalaron los dispositivos para medir el contenido de contaminantes de cloruro y dióxido de azufre ambiental, y finalmente, para obtener los datos de temperatura, humedad ambiental, cantidad de agua caída, velocidad y dirección de los vientos y radiación solar se instalaron estaciones meteorológicas. Adicionalmente y con el objetivo de realizar un seguimiento simultáneo del efecto de la corrosión atmosférica en la tenacidad del material, en cada estación de estudio se instalaron probetas Charpy.

La investigación ha comenzado en Abril del año 2010 y se realizará por un período de 3 años. El deterioro de los metales será evaluado cada 3 meses por medidas de pérdida de masa y la morfología del ataque del metal por microscopía electrónica de barrido (MEB). Para la identificación de los productos de corrosión se utilizará la técnica de difracción de rayos X.

Los resultados preliminares muestran variaciones en el contenido de contaminantes y datos meteorológicos para los diferentes lugares de exposición, los cuáles en el tiempo permitirán clasificar de acuerdo a normas internacionales la agresividad del ambiente y de esa forma junto con los datos de velocidad de corrosión y de tenacidad de los materiales confeccionar modelos de comportamiento que permitan seleccionar el material más adecuado.

Tópico 6: Innovación

Palabras clave: corrosión atmosférica, mapa, cobre, acero al carbono, acero galvanizado, aluminio.

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión atmosférica es un proceso por el cual los metales y aleaciones reaccionan con especies presentes en el ambiente dando lugar a la formación de diversos tipos de productos de corrosión tales como óxidos, hidróxidos, sales etc. Las características de los compuestos químicos desde el punto de vista de la adherencia, grado de compacticidad, insolubilidad y morfología inciden directamente en el grado de protección que puedan ofrecer al metal o aleación [1-2].

La acción de la atmósfera sobre los metales o aleaciones constituye uno de los mayores problemas planteados por la corrosión. Según Tomashov [3], más del 50% de las pérdidas por corrosión se deben a la corrosión atmosférica. De ahí, la importancia de realizar estudios de corrosión atmosférica en Chile, país que se caracteriza por tener una diversidad de climas, por ser costero (contaminación de cloruro por aerosol marino) y por presentar en algunas zonas contaminación industrial por dióxido de azufre (SO_2), gas que en presencia de humedad origina lluvia ácida.

Por otra parte, los investigadores y científicos del tema de la corrosión atmosférica y los responsables del diseño de sistemas de protección y mantención de estructuras expuestas a la atmósfera, han intentado disponer de mapas de corrosión atmosférica que para unos les permita tener un dato visual de la corrosión atmosférica y para los otros, disponer de una herramienta informativa sobre los alcances que un fenómeno en un determinado punto geográfico pueda ocasionar y así elegir y seleccionar el material metálico más adecuado, tanto del punto de vista de la corrosión como del económico, además de poder así también elegir la protección anticorrosiva y la frecuencia de las operaciones de mantenimiento [4].

En 1993, Morcillo y Feliu elaboraron los mapas de corrosividad atmosférica de España a partir de datos de corrosión de probetas de acero al carbono, zinc, cobre y aluminio expuestas por un año en más de 200 estaciones. Este mapa discrimina en dos grandes áreas: una no contaminada hacia el interior del país y otra subdividida en 5 subregiones en donde se ubicaron datos puntuales de velocidad de corrosión. La construcción del mapa se hizo indicando medidas puntuales del nivel de corrosión dado que 200 estaciones no son suficientes para predecir la corrosión en otros puntos del territorio español [5].

En este contexto, en el año 2004 Rincón y colaboradores, del Centro de Estudios de Corrosión de la Universidad de Zulia, Venezuela, establecieron un mapa de corrosividad atmosférica para el estado de Zulia, en base al comportamiento de acero y cobre durante un año. La selección de las estaciones se basó en los mapas climatológicos de Koeppen y en las normas ISO para las clasificaciones de agresividad. Se analizaron 8 estaciones distribuidas en la región zuliana de Venezuela que mejor representaban los distintos climas de la zona. Con los datos obtenidos se elaboraron mapas de corrosividad atmosférica para acero y cobre utilizando gráficas de tortas en lugar de isolíneas o colores, sabiendo que el diámetro de la torta representa la agresividad real de la atmósfera y dentro de cada torta están discriminadas las cantidades de cada contaminante o parámetro atmosférico responsable de la corrosión [6].

En el año 2001, Tidblad, Kucera y otros [7], publican los resultados sobre un programa de exposición de un año a efectos de corrosión atmosférica de contaminantes ácidos en climas tropicales y subtropicales, de acero al carbono, zinc, cobre, piedra caliza y acero pintado. Son analizados los ataques corrosivos junto con los datos medioambientales (SO_2 , NO_2 , HNO_3 , O_3 , cantidad de partículas, y pH de las precipitaciones, temperatura y humedad) en 16 sitios de estudio, 12 en Asia (India, Vietnam, Tailandia, Malasia, y China incluido Hong Kong) y 4 en África (África del Sur, Zambia y Zimbawe). Los resultados a 4 años mostraron valores de corrosión bastante más altos de los esperados para piedra caliza, acero al carbono y menos de lo esperado para cinc en comparación con valores calculados usando funciones dosis/respuesta. De acuerdo a los resultados, el SO_2 es el factor más decisivo, que sumado al pH afecta a cinc y piedra caliza.

Investigaciones realizadas por Natesan et al. [8], en el 2006 publican, como parte de un proyecto para generar un Mapa de Corrosión de India, la evaluación por métodos de pérdida de masa, de

materiales de disponibilidad comercial en ingeniería como acero, cinc, acero galvanizado y aluminio. Estos materiales fueron expuestos en zonas marinas, industriales, urbanas y rurales en 10 estaciones experimentales de la India por un periodo de 5 años. Sus resultados demostraron que acero galvanizado, cinc, y aluminio fueron varias veces más durables que el acero. Por otra parte, Morales y colaboradores [9], proponen una ecuación semi-empírica que permite predecir los valores de velocidad de corrosión en cinc tras su exposición de 3 años en diferentes atmósferas de 35 sitios distribuidos en las Islas Canarias localizadas frente al continente africano. La ecuación la correlacionan con datos experimentales obtenidos al 4^o año de exposición lográndose una alta concordancia.

Vera y col. evaluaron cobre, aluminio, aleación base Al 6201 y acero galvanizado en 18 estaciones en la región de Valparaíso por un período de 2 años. Esta investigación comparó en conjunto el efecto de ambientes marinos y contaminantes atmosféricos industriales en la resistencia a la corrosión de alambres metálicos empleados para la transmisión eléctrica de alto poder. Los resultados mostraron que en ambiente marino el aluminio y su aleación presentan corrosión localizada, pero el ataque fue mayor en el aluminio puro. Con respecto a la corrosión atmosférica del cobre, como una función del tiempo de exposición ésta mostró dependencia con las características morfológicas y protección de los productos de corrosión en conjunto con el efecto combinado de las contaminantes más abundantes y frecuentes del ambiente. También los resultados mostraron que la presencia de altas concentraciones de SO₂ influye en las películas de productos de corrosión formados y su rol protector tanto en el cobre como en el acero galvanizado [10]. Paralelamente se realizó también un estudio de la variación de las propiedades mecánicas en alambres de aluminio y de aleación AA 6201 obteniéndose como resultado una relación inversa entre la fuerza de ruptura a la tracción para ambos materiales y los valores de pérdida de masa obtenidos [11].

Teniendo presente los antecedentes anteriores este trabajo está inserto dentro del Proyecto INNOVA-CORFO 09CN14-5879 “Construcción de mapas de corrosividad atmosférica de Chile para los metales y aleaciones de mayor interés tecnológico, que permitan seleccionar de manera óptima los materiales a utilizar en las diferentes zonas ambientales del país”.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La investigación ha comenzado en Marzo del año 2010 y se realizará por un período de 3 años. En la primera etapa del proyecto se seleccionaron los sitios de investigación del proyecto basándose en la perspectiva de la variabilidad climática del territorio nacional. Considerando esta información se seleccionaron 30 estaciones que correspondieron a: Arica, Putre, Pampa del Tamarugal, Antofagasta, San Pedro de Atacama, Copiapó, Huasco, Coquimbo, Vicuña, Valparaíso, Isla de Pascua, Curauma, Quilpué, Quintero, Los Andes, Casablanca, Río Blanco, Santiago 1, Santiago 2, Rancagua, Coronel, Laja, Temuco, Puerto Varas, Valdivia, Ensenada, Puerto Montt, Puerto Chacabuco, Coyhaique y Punta Arenas.

En cada sitio se instalaron 4 bastidores confeccionados con acero galvanizado que contenían las muestras metálicas de acero al carbono, cobre, aluminio y acero galvanizado, respectivamente. Las dimensiones de las probetas de estudio eran de 10 cm de ancho, 10 cm de largo y 0,4 cm de espesor, todas ellas expuestas en un ángulo de 45° en los bastidores y separadas por aisladores plásticos de acuerdo a las normas ISO 9223 a 9226. El análisis químico de los materiales empleando espectrometría de rayos X informa que el cobre y aluminio tienen una pureza de 99,9%, el acero al carbono un 99,2 % de Fe y la capa de cinc superficial del galvanizado un 98,5% de Zn, 1,0% de Fe y un 0,5% de Al.

Paralelamente, en los sitios de estudio, se instalaron los dispositivos para medir bimensual el contenido de contaminantes de cloruro y dióxido de azufre ambiental. Para la medición de cloruros atmosféricos se utiliza la metodología de la candela húmeda, que consiste en enrollar una tira de

gasa alrededor de un tubo de vidrio, los extremos de la gasa se encuentran sumergidos en una solución al 20% de glicerina en agua destilada. Los cloruros depositados se determinan por valoración mercurimétrica en presencia de los indicadores difenilcarbazona y azul de bromofenol; los resultados se expresan como $\text{mgCl}^-/\text{m}^2 \text{ día}$. Con respecto a la medición de SO_2 se utiliza la metodología de la candela de peróxido de plomo, en la cual el SO_2 se deposita en una gasa impregnada en PbO_2 formando sulfato de plomo, este último compuesto se solubiliza en Na_2CO_3 al 5% y luego el ion sulfato se determina gravimétricamente precipitándolo como BaSO_4 ; este resultado se expresa como $\text{mgSO}_2/\text{m}^2 \text{ día}$.

Adicionalmente en algunos lugares de estudio donde no se disponía de información meteorológica se instalaron estaciones meteorológicas para obtener los datos de temperatura, humedad ambiental, cantidad de agua caída, velocidad y dirección de los vientos y radiación solar. Los datos obtenidos mensualmente permitirán confeccionar las cartas de isotermas e isoyetas necesarias para la mejor comprensión de las condiciones meteorológicas locales y regionales las que servirán de base para la construcción de los mapas.

Previo a la exposición a la atmósfera de las probetas estas fueron desengrasadas con acetona, lavadas con agua de pureza elevada, secadas con aire frío y guardadas en desecadora. Las probetas limpias y secas deben ser medidas y masadas con precisión, norma ASTM G1-03. El deterioro de los metales y aleación será evaluado cada 3 meses por medidas de pérdida de masa por triplicado (norma ASTM G50) y la morfología del ataque del metal por microscopía electrónica de barrido (MEB) utilizando un equipo JEOL 5410 asociado a un analizador EDAX 9100 para caracterización elemental. Para la identificación de los productos de corrosión se utilizará la técnica de difracción de rayos X empleando un instrumento SIEMENS D 5000 con radiación α de CuK y monocromador de grafito 40KV/30mA con un rango de barrido de 0,5-70°.

Con el objetivo de realizar un seguimiento simultáneo del efecto de la corrosión atmosférica en la tenacidad del material, en cada estación de estudio se instalaron probetas Charpy estándar de 10 mm x 10 mm x 55 mm de cada material, según las especificaciones del ensayo de impacto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación mensual de los parámetros climáticos y ambientales y el uso de las normas ISO 9223 permiten clasificar la agresividad de las atmósferas de las estaciones de ensayo. En la Tabla 1 se muestran para 11 estaciones de ensayo los valores promedio período Abril-Agosto 2010 de las variables de tiempo de humectación (τ , TDH) que corresponde al tiempo que realmente el material se encuentra húmedo y la deposición de los contaminantes en el ambiente (salinidad, S y compuestos sulfurados, P). Considerando los valores y clasificación de las 3 variables de acuerdo a norma se obtiene la categoría de agresividad para cada lugar que se nomina CA y corresponde a 1 (menor agresividad) hasta 5 (mayor agresividad). Tal como se observa en la Tabla 1 los lugares que presentan un mayor índice de agresividad son Quintero e Isla de Pascua. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de las variaciones encontradas según la estación evaluada.

Por otra parte, en la Figura 2 se muestra la variación de la deposición de cloruro ambiental en la mayoría de las estaciones en función de la distancia del lugar de exposición a la costa. En ella cada círculo corresponde a la información de una estación donde la estación más cercana al mar es Quintero y en esta figura se observa que a mayor cercanía a la costa mayor es el contenido de cloruro. Las variaciones entre los valores de cloruro obtenidos para distancias similares dependen principalmente si el lugar se encuentra en altura, apantallado por edificios o la dirección de los vientos es hacia la costa. El lugar más lejano a la costa (220 Km) corresponde a San Pedro de Atacama, sin embargo en esta estación el contenido de cloruro es mayor que en otros lugares más cercanos al mar debido a la cercanía de un salar.

En la Figura 3 se presentan los datos de velocidad de corrosión obtenidos para acero al carbono, cobre y galvanizado en 4 estaciones con diferente índice de agresividad, ellas son: Quintero (CA 5), Valparaíso (CA 4), Puerto Montt (CA 3) y Los Andes (CA 2). En todos los casos el acero al carbono es el que presenta un mayor deterioro considerando los 3 meses de evaluación de las muestras, en menor grado y similares entre ellos son los resultados de velocidad de corrosión para cobre y galvanizado.

Tabla 1. Categoría de agresividad (ambiental) de 11 estaciones de ensayo.

Estación (N°)	TDH		Cl ⁻		SO ₂		CA
	%	τ	mg m ⁻² día ⁻¹	S	mg m ⁻² día ⁻¹	P	
Quilpué (4)	44,9	τ4	2,77	S ₀	5,64	P ₀	3
Antofagasta (5)	100	τ5	23,49	S ₁	9,41	P ₀	3 o 4
Huasco (8)	63,7	τ5	57,81	S ₁	7,45	P ₀	3 o 4
Coquimbo (9)	83,8	τ5	7,13	S ₁	2,21	P ₀	3 o 4
Valparaíso (12)	48,1	τ4	85,35	S ₂	7,31	P ₀	4
Quintero (13)	84,2	τ5	151,92	S ₂	11,89	P ₁	5
Los Andes (14)	24,7	τ3	6,01	S ₁	2,30	P ₀	2 o 3
Rancagua (19)	26,8	τ3	3,12	S ₁	5,36	P ₀	2 o 3
Valdivia (24)	84,0	τ5	5,62	S ₁	10,68	P ₁	3 o 4
Puerto Montt (26)	54,3	τ4	7,77	S ₁	4,98	P ₀	3
Isla de Pascua (30)	98,9	τ5	71,72	S ₂	2,41	P ₀	5*

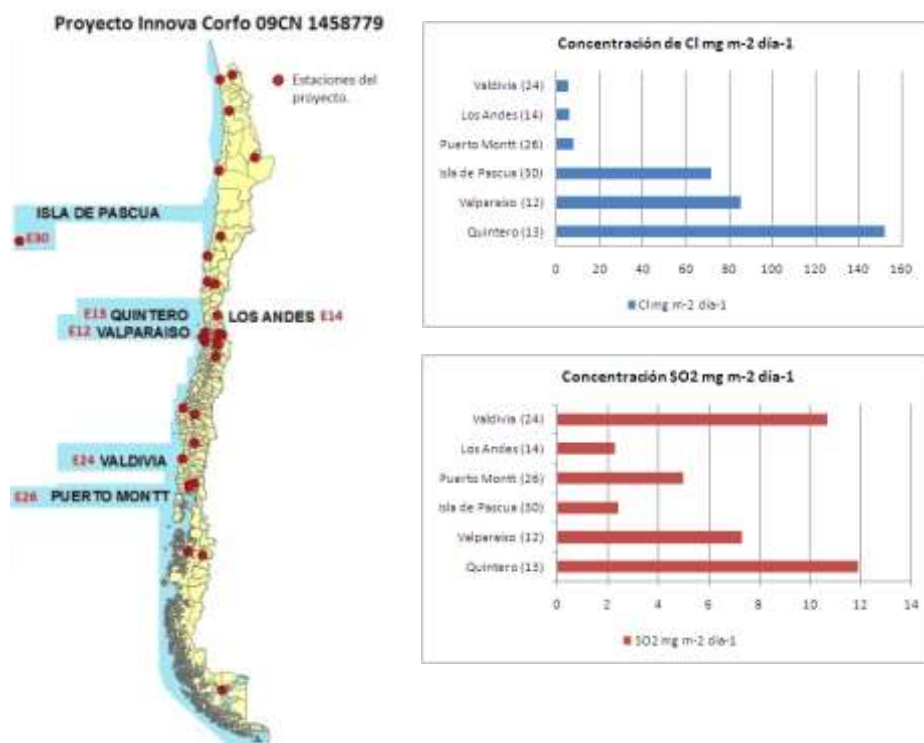


Figura 1. Ejemplo de la diversidad de concentraciones de Cl⁻ y SO₂ según la localización de la Estación.

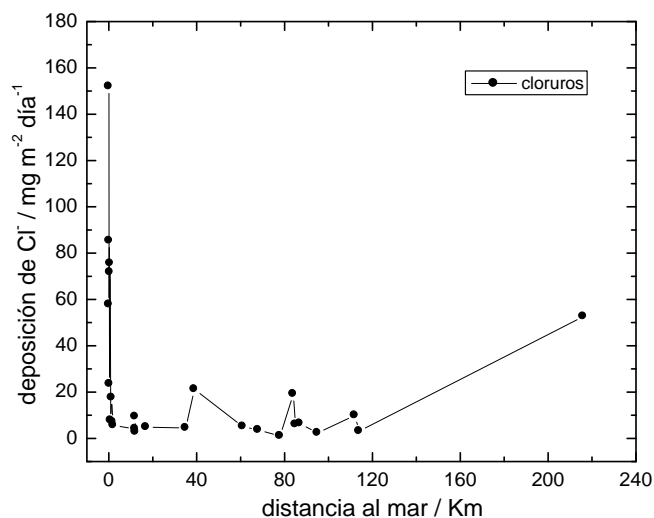


Figura 2. Variación del contenido de deposición de cloruro ambiental en función de la distancia al mar.

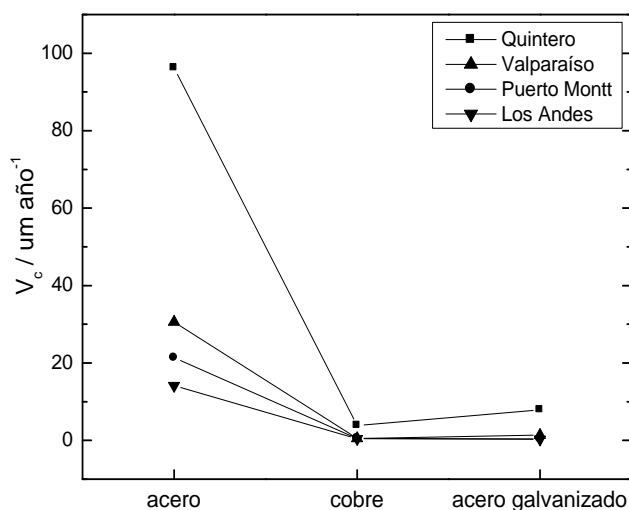


Figura 3. Velocidad de corrosión de acero, cobre y galvanizado en 4 lugares.

RESULTADOS ENSAYOS DE TENACIDAD AL IMPACTO

Con el objetivo de correlacionar los datos químicos con algún ensayo mecánico, se realizaron ensayos de tenacidad al impacto, o Charpy, tras 3 meses de exposición. En la Figura 4 se presentan los resultados de los ensayos realizados en los aceros SAE 1020 expuestos en 13 de las 30 estaciones a lo largo del país. A pesar del poco tiempo de exposición, los resultados muestran una tendencia hacia la disminución de la tenacidad al impacto, que varía en función de la estación, desde un 70% hasta un 36% de la tenacidad original del acero. En busca de una correlación entre la tenacidad a la fractura obtenida y las categorías de agresividad, Figura 5, se ha observado al menos con estos primeros resultados, que la correlación no se puede hacer directamente, dado que, nuevamente las muestras procedentes de Isla de Pascua (E30) no permiten señalar que, al tener una mayor categoría tendremos necesariamente una reducción mayor de la tenacidad, hecho que si se observa en los aceros expuestos en Quintero (E13) y Valparaíso (E12).

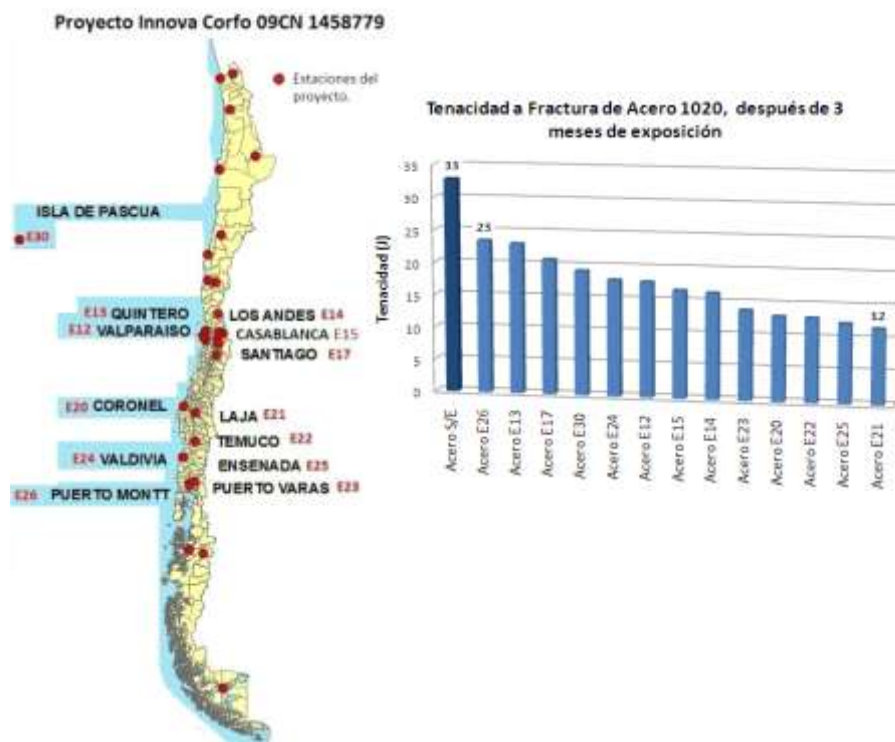


Figura 4. Tenacidad de fractura de aceros SAE 1020 expuestos durante 3 meses en 13 estaciones de estudio.

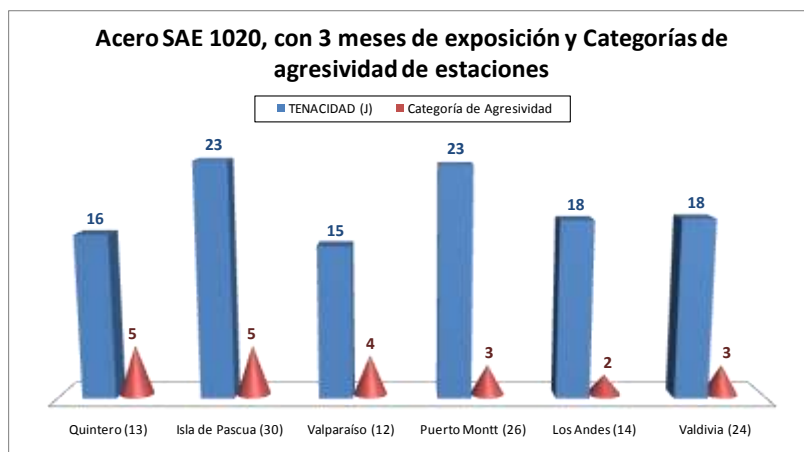


Figura 5. Valores de tenacidad a fractura de los aceros SAE1020 de 6 estaciones y su categoría de agresividad.

Tratando de encontrar otra correlación, esta vez en función de los contaminantes medidos y la tenacidad a la fractura, se obtuvieron los valores que se muestran en la Figura 6. De acuerdo a estos resultados, las estaciones con mayor concentración de Cl^- y SO_2 son también donde se registró la mayor pérdida de tenacidad al impacto, Quintero y Valparaíso. En las probetas de Isla de Pascua, la tenacidad después de tres meses no se vio afectada mayormente, pese a la gran concentración de

cloruros. En estaciones donde la concentración de cloruros fue baja, Puerto Montt, Los Andes y Valdivia, se advierte que la tenacidad varió pero en menor medida, aún cuando la concentración de SO₂ fuese mayor que el resto de las estaciones, como en Valdivia, pero su clasificación está entre P₀ y P₁.

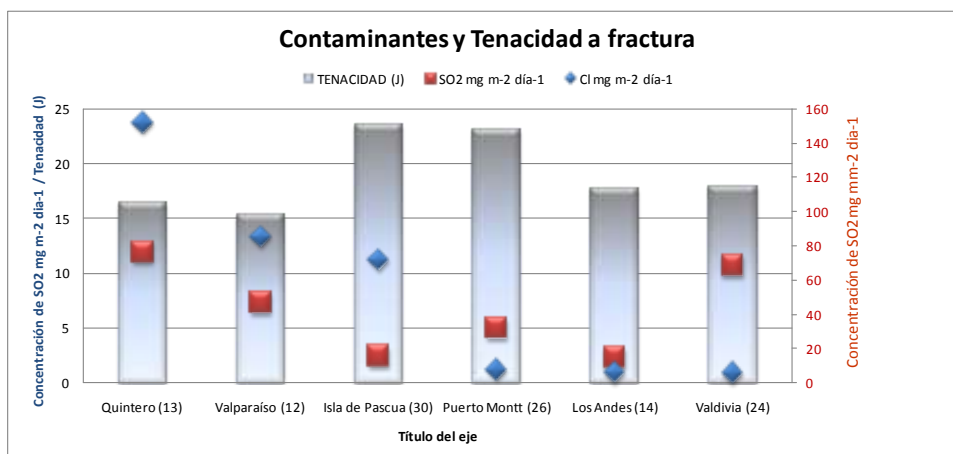


Figura 6. Concentración de Cl⁻, SO₂ en diferentes estaciones, comparadas con la tenacidad a fractura de Acero SAE1020.

Finalmente, y para comparar los resultados de los aceros con y sin protección, en la Figura 7 se muestran los resultados del ensayo Charpy a probetas expuestas en la misma estación de aceros SAE 1020 con y sin galvanizado. Los resultados muestran que no en todas las estaciones se produjo mayor reducción de la tenacidad donde el acero no fue galvanizado, por el contrario, en varias estaciones se determinó que la tenacidad a fractura estaba más afectada en las probetas con galvanizado que las sin este método de protección.

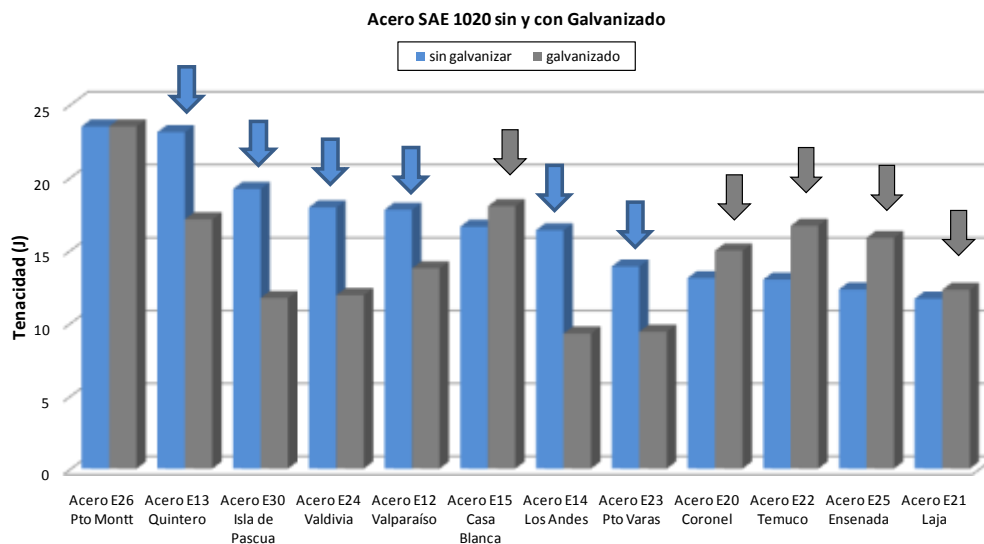


Figura 7. Valores de tenacidad a fractura de los aceros SAE1020 en diferentes estaciones, con y sin galvanizado.

4. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares después de 5 meses de exposición de los materiales al medio atmosférico muestran variaciones en el contenido de contaminantes y datos meteorológicos para los diferentes lugares de exposición y el contenido de cloruro atmosférico se relaciona directamente con la cercanía del lugar al mar.

El acero al carbono es el material más activo frente a la corrosión atmosférica en las condiciones de este estudio. Su tenacidad a fractura fue más afectada en ambientes con elevadas concentraciones de iones cloruro y no fue la misma al comparar aceros galvanizados con sin galvanizar, mostrando que en algunos casos es favorable el empleo de este método de protección y en otros no tanto.

Se espera que con una mayor cantidad de datos, sea posible correlacionar adecuadamente la agresividad del ambiente, los datos de velocidad de corrosión y de tenacidad de los materiales, permitiendo confeccionar modelos de comportamiento que permitan seleccionar el material más adecuado en cada localidad.

REFERENCIAS

1. B. M. Rosales, "Mapas de corrosividad atmosférica de Argentina" CITEFA, 1997, ISBN: 987-96600, Buenos Aires, Argentina. (*libro*)
2. R. Vera, B. M. Rosales, G. Moriena, "Evaluation of the protective properties of natural and artificial patinas on copper. Part. 1. Patinas formed by immersion", Corrosion Science, Vol. 41 (1999), p. 625-651. (*paper*)
3. N. D. Tomashov, "Theory of corrosion and protection of metals", MacMillan Co., 1966, N. York, 367. (*libro*)
4. M. Morcillo, M. E. Almeida, B. M. Rosales, J. Uruchurtu, y M. Marrocos, "Corrosión y protección de metales en las atmósferas de Iberoamérica" CYTED, 1998, ISBN: 1ª 84-930448-1-4, Madrid, España. (*libro*)
5. M. Morcillo y S. Feliu, "Mapas de España de corrosividad atmosférica", 1993, ISBN: 84-604-6673-6, Madrid, España. (*libro*)
6. A. Rincón, O. T. de Rincón, R. Rodríguez, N. Romero, A. I. de Rincón, "The atmospheric corrosivity maps in Zulia region", Rev Téc Ing Univ Zulia, Vol. 27 (2004), p. 55-64. (*paper*)
7. J. Tidblad, V. Kucera, F. Samie, S. Da, C. Bhamornsut, L. C. Peng, Z. Dawe, LT Hong Lien, H. Schollenberge, C. V. Lungu, and D. Simbi, "Exposure programme on atmospheric corrosion effects of acidifying pollutants in tropical and subtropical climates" Water Air soil Pollut: Focus Vol. 7 (2007), p. 241-247. (*paper*)
8. M. Natesan, G. Venkatachari, N. Palaniswamy, "Kinetics of atmospheric corrosion of mild steel, zinc, galvanized iron and aluminium at 10 exposure stations in India", Corrosion Science, Vol. 48 (2006), p. 3584-2608. (*paper*)
9. J. Morales, F. Díaz, J. Hernandez-Borges, S. Gonzalez, V. Cano, "Atmospheric corrosion in subtropical areas. Statistic study of the corrosion of zinc plates exposed to several atmospheres in the province of Santa Cruz de Tenerife (Canary Islands, Spain)", Corrosion Science, Vol. 49 (2007), p. 526-541. (*paper*)
10. R. Vera, D. Delgado, B. M. Rosales, "Effect of atmospheric pollutants on the corrosion of high power electrical conductors. Part 2. Pure copper", Corrosion Science, Vol. 49 (2007), p. 2329-2350. (*paper*)
11. R. Vera, D. Delgado, B. M. Rosales, "Effect of atmospheric pollutants on the corrosion of high power electrical conductors. Part 1. Aluminium and AA6201 alloy", Corrosion Science, Vol. 48 (2006), p. 2882-2890. (*paper*)