

## CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA DE CHILE. RESULTADOS PRELIMINARES

Rosa Vera<sup>1\*</sup>, Diana Delgado<sup>1</sup>, Raquel Araya<sup>1</sup>, Mónica Puentes<sup>1</sup>, Inés Guerrero<sup>2</sup>, Paula Rojas<sup>3\*</sup>, Guillermo Cabrera<sup>4</sup>, Sergio Erazo<sup>5</sup>, Ana María Carvajal<sup>6</sup>

1: Instituto de Química, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Av. Brasil 2950, Valparaíso, CHILE.

2: Instituto de Estadística, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Av. Brasil 2950, Valparaíso, CHILE.

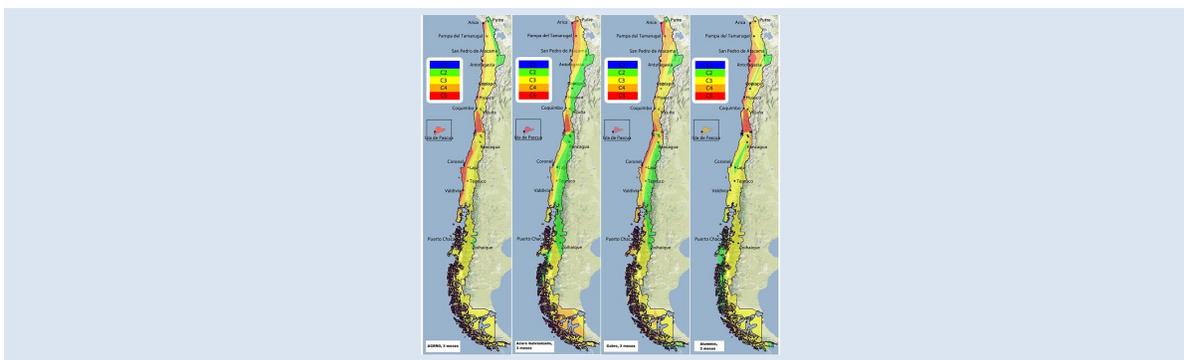
3: Escuela de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Av. Brasil 2950, Valparaíso, CHILE.

4: Escuela de Ingeniería Informática, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Av. Brasil 2950, Valparaíso, CHILE.

5: Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Av. Brasil 2950, Valparaíso, CHILE.

6: Escuela de Construcción Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile, Avda. Libertador Bernardo OHiggins 340 – Santiago, CHILE.

\* e-mail: rvera@ucv.cl, paula.rojas.s@ucv.cl



### RESUMEN

En el presente trabajo se presentan los resultados preliminares obtenidos para la construcción del mapa de corrosión atmosférica de Chile, evaluando acero al carbono, acero galvanizado, cobre y aluminio como materiales de prueba. Se instalaron bastidores con las muestras en 31 lugares localizados a lo largo del país, así como también dispositivos para medir el contenido de cloruro y dióxido de azufre ambiental, en conjunto con estaciones meteorológicas, para obtener los datos locales de temperatura, humedad ambiental, cantidad de agua caída, velocidad y dirección de los vientos y radiación solar. Los resultados después de 6 meses de exposición muestran una relación entre la velocidad de corrosión, las condiciones ambientales y meteorológicas de la zona y las propiedades mecánicas de los materiales, lo que constituye una importante innovación para las empresas del país que esperan que sus estructuras metálicas logren un mayor tiempo de vida útil.

**Palabras Claves:** Corrosión atmosférica, Mapas de corrosión, Corrosión de acero, acero galvanizado, cobre y aluminio.

### CONSTRUCTION OF ATMOSPHERIC CORROSION MAPS IN CHILE. PRELIMINARY RESULTS

#### ABSTRACT

This work show the first part of a research project towards the development of a corrosion map for Chile. In order to develop this map, the research group considered carbon steel, galvanized carbon steel, copper and aluminum as testing materials. All these materials were exposed to the atmosphere in 31 places along the country. In each one of these corrosion testing sites, the metallic samples were mounted on frameworks. Each framework station had chloride and sulfur dioxide meters as well as a weather station, to measure temperature, environmental humidity, rainfall, wind speed and solar radiation. After six months of exposition, the results show the existence of a correlation between the rate of corrosion, the environmental and meteorological conditions of the area and the mechanical properties of the materials. This information constitutes an important tool of innovation for the industries in Chile, because the obtained information will be helpful to design metallic infrastructure with a longer useful live.

**Keywords:** Atmospheric corrosion, Corrosion Maps, Steel galvanized Steel, copper and aluminum corrosion.

## 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 compactidad, insolubilidad y morfología inciden directamente en el grado de protección que puedan ofrecer al metal o aleación [1-2].

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<sub>2</sub>), gas que en presencia de humedad origina lluvia ácida.

En 1993, Morcillo y Feliú 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 [4].

Por otra parte, 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 [5].

En el año 2001, Tidblad, Kucera y otros [6], 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<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>, 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<sub>2</sub> es el factor más decisivo, que sumado al pH afecta a cinc y piedra caliza.

En este mismo contexto, Morales y colaboradores [7], proponen una ecuación semi-empírica que permite predecir los valores de velocidad de corrosión de cinc tras su exposición de 3 años en diferentes atmósferas de 35 sitios distribuidos en las Islas Canarias. La ecuación la correlacionan con datos experimentales obtenidos al 4º año de exposición lográndose una alta concordancia.

Investigaciones realizadas por Sun et al. [8] en el norte de China evaluando aluminio expuesto a la atmósfera y en ensayos acelerados en cámaras variando ciclos húmedo y seco. Los resultados muestran que el aluminio 1050 sufre un serio deterioro debido a la presencia de sales solubles sobre la superficie expuesta al medio (cloruro de magnesio).

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  $\text{SO}_2$  influye en las películas de productos de corrosión formados y su rol protector tanto en el cobre como en el acero galvanizado [9]. 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 [10].

Es sabido que para los responsables del diseño de sistemas de protección y mantenimiento de estructuras metálicas expuestas a la atmósfera es muy necesario conocer el tiempo de vida de dichas estructuras, de ahí la importancia del presente trabajo que tiene como objetivo general la "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". En este trabajo se presentan los resultados preliminares del estudio.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

En la primera etapa del proyecto se seleccionaron los sitios de investigación basándose en 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 x 10 y 0,4 cm de espesor, todas

ellas expuestas en un ángulo de  $45^\circ$  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  $\text{mgCl}^-/\text{m}^2$  día. Con respecto a la medición de  $\text{SO}_2$  se utiliza la metodología de la candela de peróxido de plomo, en la cual el  $\text{SO}_2$  se deposita en una gasa impregnada en  $\text{PbO}_2$  formando sulfato de plomo, este último compuesto se solubiliza en  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 5% y luego el ion sulfato se determina gravimétricamente precipitándolo como  $\text{BaSO}_4$ ; este resultado se expresa como  $\text{mgSO}_2/\text{m}^2$  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 se midieron y masaron con precisión, norma ASTM G1-03. El deterioro de los metales y aleación fue evaluado cada 3 meses por medidas de pérdida de masa por triplicado (norma ASTM G50).

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

#### 3.1 Estudios de Corrosión Atmosférica

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 algunas estaciones de ensayo seleccionadas los valores promedio período Marzo-Agosto 2010 de las variables de tiempo de humectación ( $\tau$ , 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 a modo de ejemplo se presenta una comparación de algunas estaciones con la finalidad de mostrar que el contenido de cloruro ambiental es generalmente mayor que el contenido de dióxido de azufre ambiental, especialmente en la estación de Quintero donde la relación entre ambas variables es de una proporción 10:1. Es de esperar que en estas condiciones el efecto del cloruro influyera principalmente en la velocidad de corrosión de los materiales expuestos en la estación de Quintero.

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 este lugar a un salar, como ocurre generalmente en el norte de Chile.

En la Figura 3 se presentan los datos de velocidad de corrosión a los 3, 6, 9 Y 12 meses obtenidos para acero al carbono y aluminio en 30 estaciones con diferente índice de agresividad. En todos los casos el acero al carbono es el que presenta un mayor deterioro (los valores se indican fuera de escala). El orden de velocidad de corrosión para cada uno de los materiales coincide con la agresividad y categoría del lugar: Quintero>Valparaíso>Puerto Montt>Los Andes, lo que corrobora los datos mostrados en Tabla 1.

**Tabla 1.** Categoría de agresividad ambiental de 11 estaciones de ensayo.

Estación (N°)	TDH		Cl		SO <sub>2</sub>		CA
	%	$\tau$	mg m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup>	S	mg m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup>	P	
Quilpué (4)	44,9	$\tau_4$	2,77	S <sub>0</sub>	5,64	P <sub>0</sub>	3
Antofagasta (5)	100	$\tau_5$	23,49	S <sub>1</sub>	9,41	P <sub>0</sub>	3 o 4
Huasco (8)	63,7	$\tau_5$	57,81	S <sub>1</sub>	7,45	P <sub>0</sub>	3 o 4
Coquimbo (9)	83,8	$\tau_5$	7,13	S <sub>1</sub>	2,21	P <sub>0</sub>	3 o 4
Valparaíso (12)	48,1	$\tau_4$	85,35	S <sub>2</sub>	7,31	P <sub>0</sub>	4
Quintero (13)	84,2	$\tau_5$	151,92	S <sub>2</sub>	11,89	P <sub>1</sub>	5
Los Andes (14)	24,7	$\tau_3$	6,01	S <sub>1</sub>	2,30	P <sub>0</sub>	2 o 3
Rancagua (19)	26,8	$\tau_3$	3,12	S <sub>1</sub>	5,36	P <sub>0</sub>	2 o 3
Valdivia (24)	84,0	$\tau_5$	5,62	S <sub>1</sub>	10,68	P <sub>1</sub>	3 o 4
Puerto Montt (26)	54,3	$\tau_4$	7,77	S <sub>1</sub>	4,98	P <sub>0</sub>	3
Isla de Pascua (30)	98,9	$\tau_5$	71,72	S <sub>2</sub>	2,41	P <sub>0</sub>	5

#### 3.2 Resultados de Tenacidad a 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

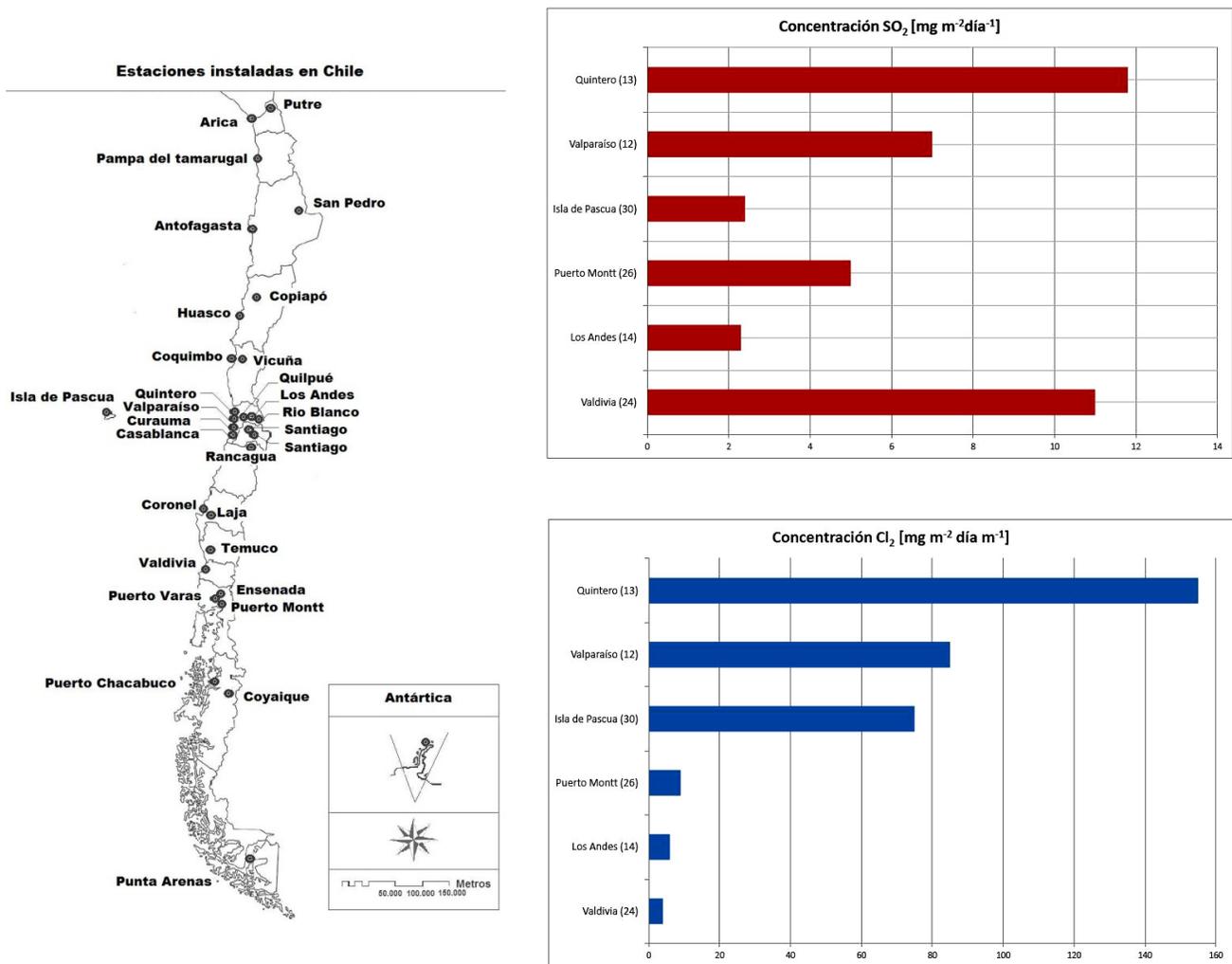


Figura 1. Ejemplo de la diversidad de concentraciones de Cl<sup>-</sup> y SO<sub>2</sub> según la localización de la Estación de ensayo.

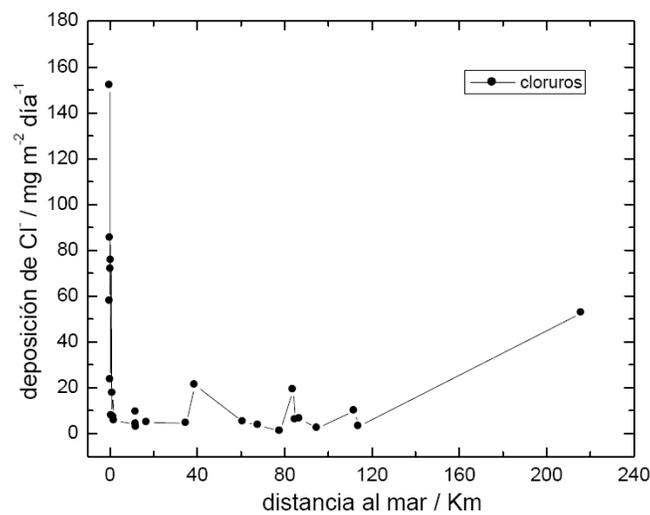
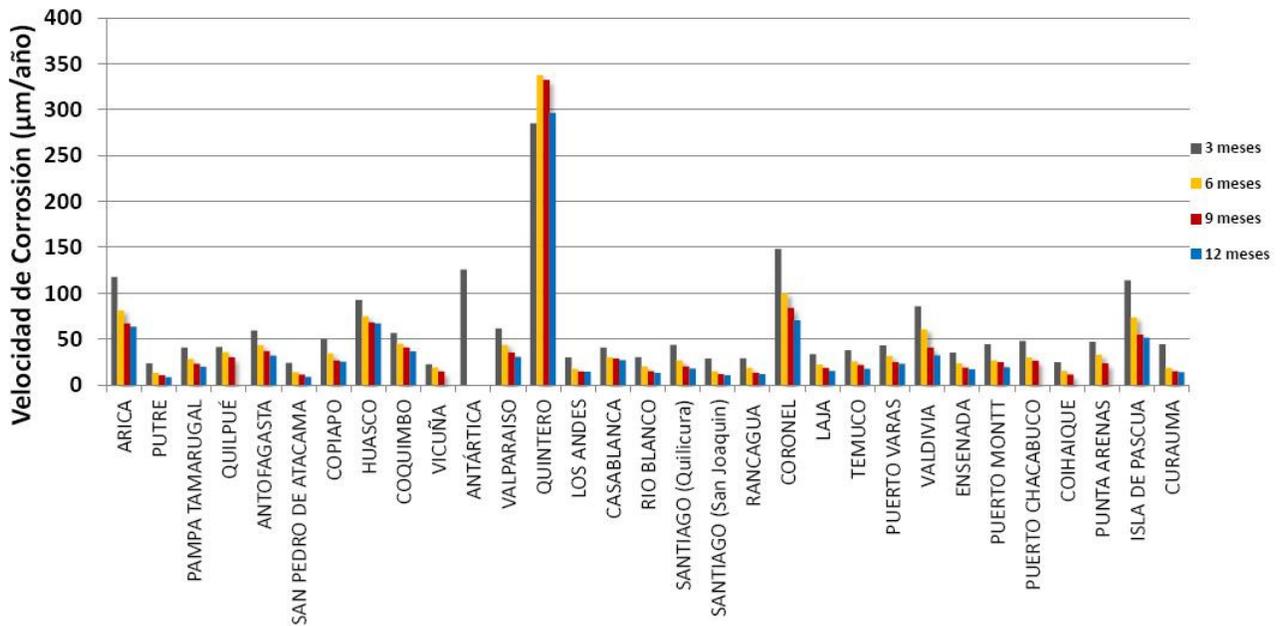


Figura 2. Variación del contenido de deposición de cloruro ambiental en función de la distancia al mar.

Acero al Carbono: Velocidad de Corrosión a 3, 6, 9 y 12 meses de Exposición



Aluminio: Velocidad de Corrosión a 3, 6, 9 y 12 meses de Exposición

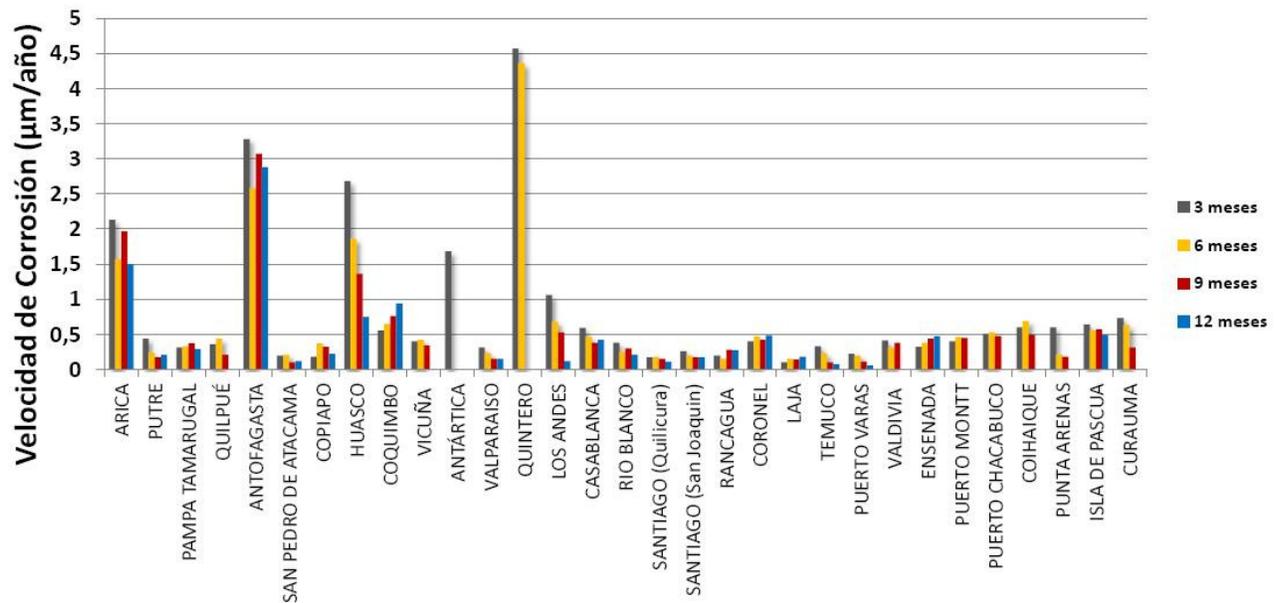


Figura 3. Velocidad de corrosión de (a) acero y (b) aluminio, en 30 Estaciones a lo largo y ancho de Chile, en materiales con exposición de 3, 6, 9 y 12 meses.

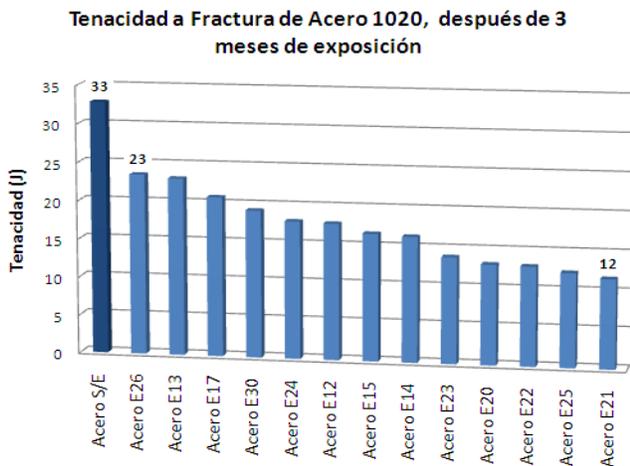


Figura 4. Tenacidad de fractura de aceros SAE 1020 expuestos durante 3 meses en 13 estaciones de estudio.

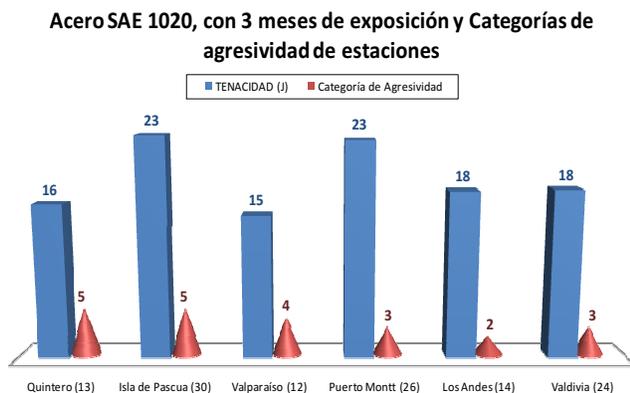


Figura 5. Valores de tenacidad a fractura de los aceros SAE1020 de 6 estaciones y su categoría de agresividad.

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). 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<sup>-</sup> y SO<sub>2</sub> 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, aun cuando la concentración de SO<sub>2</sub> fuese mayor que el resto de las estaciones, como en Valdivia, pero su clasificación está entre P<sub>0</sub> y P<sub>1</sub>.

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<sup>-</sup> y SO<sub>2</sub> 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, aun cuando la concentración de SO<sub>2</sub> fuese mayor que el resto de las estaciones, como en Valdivia, pero su clasificación está entre P<sub>0</sub> y P<sub>1</sub>.

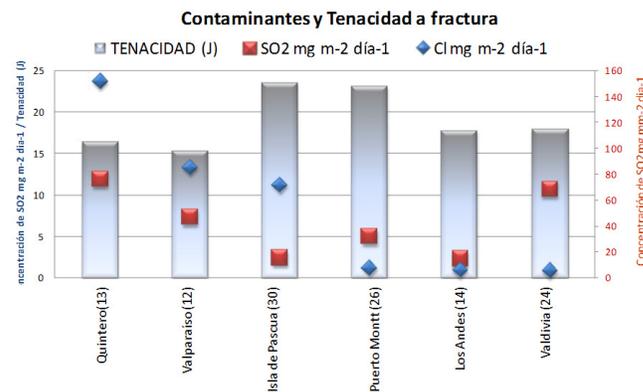


Figura 6. Concentración de Cl<sup>-</sup>, SO<sub>2</sub> en diferentes estaciones, comparadas con la tenacidad a fractura de Acero SAE1020.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares después de 6 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 o la concentración de

cloruros en el caso de San Pedro de Atacama, situado al lado del Salar de Atacama. Adicionalmente se incluyeron valores de velocidad de corrosión con 9 y 12 meses, los que demuestran que en un primer periodo la velocidad de corrosión es mayor y luego los materiales presentan menores velocidades.

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, considerando la propiedad de tenacidad a fractura, en algunos casos es favorable el empleo de este método de protección y en otros no.

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.

## 5. AGRADECIMIENTOS

El grupo de investigadores desea agradecer el apoyo de INNOVA Corfo y de la VRIEA de la PUCV.

## 6. REFERENCIAS

- [1]. Rosales B. M. *Mapas de corrosividad atmosférica de Argentina*, CITEFA, ISBN: 987-96600, Buenos Aires (Argentina), 1997.
- [2]. Vera R, Rosales B. M, Moriena G. *Corros. Sci.* 1999; **41**: 625-651.
- [3]. Tomashov N. D. *Theory of corrosion and protection of metals*, MacMillan Co., New York (EEUU), 1966, p. 367.
- [4]. Morcillo M, Feliu S, Mapas de España de corrosividad atmosférica, ISBN: 84-604-6673-6, Madrid, (España), 1993.
- [5]. Rincón A, De Rincón O. T, Rodríguez R, Romero N, De Rincón A. I, *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 1994; **27**: 55-64.
- [6]. Tidblad J, Kucera V, Samie F, Da S, Bhamornsut C, Peng L. C, Dawe Z, Hong Lien LT, Schollenberge H, Lungu C. V, Simbi D, *Water Air Soil Poll.* 2007; **7**: 241-247.
- [7]. Morales J, Díaz F, Hernandez-Borges J, Gonzalez S, Cano V, *Corros. Sci.* 2007; **49**: 526-541.
- [8]. Sun S, Zheng Q, Wen J, Li D, *Mater. Corros.* 2010; **61**: 852-859.
- [9]. Vera R, Delgado D, Rosales B. M, *Corros. Sci.* 2007; **49**: 2329-2350.
- [10]. Vera R, Delgado D, Rosales B. M. *Corros. Sci.* 2006; **48**: 2882-2890.