

DURABILIDAD DEL ACERO Y ZINC EN FUNCIÓN DE LA CORROSIÓN DE DIFERENTES ZONAS DE ÁMBITO NACIONAL

Autores: Gema Solera, Javier Solá, Carmen Caniego, Rosa Pérez, Paloma Miñana, Divina Moya, Carlos Soriano, Manuel I. Belanche.

AIDIMME Instituto Tecnológico Metalmeccánico, Mueble, Madera, Embalaje y Afines

Resumen

Este artículo es fruto de un proyecto, CORCLIM, realizado por AIDIMME en el que se han seleccionado las zonas urbanas e industriales de la Península Ibérica, así como la Comunidad Valenciana en su totalidad. Se ha creado un mapa con estas áreas seleccionadas, el cual ha servido como punto de partida para los análisis geoestadísticos mediante satélites, necesarios para determinar los factores atmosféricos más influyentes en el proceso de corrosión.

También se han generado mapas SIG (Sistema de Información Geográfica) con las variables atmosféricas analizadas para determinar la velocidad de corrosión, en un año de exposición, las cuales son la temperatura, la humedad relativa, el dióxido de azufre (SO₂) y los cloruros (Cl⁻). Esta información se ha utilizado para determinar las categorías de corrosión en las zonas seleccionadas y finalmente obtener el mapa de corrosividad para el acero y el zinc. Las principales categorías de corrosión existentes para estos metales son C2, C3 y C4.

Por otra parte, se han simulado las diferentes categorías de corrosión en laboratorio, mediante el ajuste de ciclos climáticos en las cámaras de corrosión acelerada. En el caso del acero se ha conseguido obtener las categorías C1, C2, C3 y C4, mientras para el zinc se ha conseguido reproducir C4 y C3, con el mínimo número de ciclos.

Palabras clave: Corrosión atmosférica, parámetros atmosféricos corrosión, deposición de cloruros, datos satélites, categoría de corrosión, mapa de corrosión, ensayo corrosión acelerada.

Introducción

La **corrosión atmosférica** es un proceso electroquímico por el cual un material metálico se deteriora por la acción de factores atmosféricos [1]. Para que se produzca este tipo de corrosión se debe formar una pila electroquímica, o diferencia de energía libre, en la superficie del metal, y a la vez que ésta entre en contacto con un electrolito, como puede ser una película de humedad [2] [3] [4].

Según la bibliografía [5] [6] [7] [8], la corrosión atmosférica es la principal causa del deterioro de metales en instalaciones y maquinarias. Este hecho produce altos costes y por ello es de interés conocer qué parámetros influyen en la corrosión, poniendo medidas para disminuir los efectos negativos a nivel económico, de seguridad y de conservación de materiales [9] [10]. Además, esta predicción permite seleccionar el material más idóneo y el recubrimiento de protección más adecuado en cada caso [11] [12] [13].

Los **parámetros atmosféricos** tienen un papel fundamental en la corrosión de los metales. Los niveles de humedad, temperatura y pH en el medio ambiente pueden contribuir a la degradación del metal con el tiempo. Los principales contaminantes transportados por el aire son los cloruros, el dióxido de azufre, óxido de nitrógeno (NO_x), dióxido de carbono (CO₂), ozono (O₃), así como partículas duras como la arena y minerales [14]. La deposición de partículas como cloruros o óxidos de azufre pueden causar corrosión incluso en bajas concentraciones [14] [15]. Otros factores atmosféricos influyentes en el proceso de corrosión son la radiación solar, la lluvia, el viento, la orientación y la localización.

Las condiciones y proporciones de los diferentes parámetros atmosféricos dependen del **tipo de atmósfera** de una determinada localización. En función de la exposición de los metales a estos factores, se

clasifican las siguientes atmosferas: Rural, Urbana, Industrial, Marina y Tropical [2] [14].

Los **mapas de corrosividad** se elaboran a partir de los valores de las categorías de corrosividad obtenidos para cada una de las áreas de estudio. Estos mapas proporcionan información sobre la tasa de corrosión esperada en los materiales específicos en diferentes regiones geográficas y permiten poner medidas de protección adecuadas a una zona determinada [16] [17].

Existen trabajos de mapas de corrosividad del zinc en zonas rurales de España [18], acero y zinc en Canarias, donde las condiciones atmosféricas son más corrosivas por tratarse de una isla [2]. También hay mapas de corrosión en otras localizaciones mundiales, como en Abu Dhabi [19], en Sud-África [20], en Chile [21], en Slovakia [22]. Otro estudio, localizado en Tailandia, analiza la distribución de cloruros, además del mapa de corrosión, por su gran influencia en este proceso [23].

En la actualidad, los **ensayos de corrosión acelerada** no se pueden correlacionar directamente con los efectos sobre las piezas metálicas de las condiciones reales atmosféricas, debido a que la gran cantidad de parámetros influyentes dificulta considerablemente su control.

Existen estudios previos en los que se ha intentado simular la corrosión acelerada en laboratorio, por ejemplo, mediante una solución de ácido nítrico y ácido sulfúrico [24] para simular la lluvia ácida.

Por otra parte, en la norma UNE-EN-ISO 12944-6 se describe un sistema para ensayar una muestra en condensación de agua (ISO 6270-1) y/o en pulverización de niebla salina (ISO 9227), durante un tiempo determinado, en función de la categoría de corrosión descrita en la norma UNE-EN-ISO 12944-2. Este método no se aplica a este proyecto porque se emplea para la validación de probetas recubiertas. Además, los ensayos propuestos en esta norma se alejan más de la realidad que la prueba descrita en la norma ISO 14993:2001, la cual empleó en el proyecto CORCLIM.

Así pues, los **objetivos** a alcanzar en el desarrollo del proyecto son los indicados a continuación. En primer lugar, la obtención de mapas de corrosión del acero desnudo y zinc, correspondientes a las zonas urbanas e industriales de la Península Ibérica y la Comunidad Valenciana en su totalidad. En segundo lugar, simulación de las condiciones atmosféricas en laboratorio con equipos de corrosión acelerada. Estos avances serán la base para estudiar cómo se comportarán los materiales metálicos, como el acero y el zinc, en determinados

ambientes exteriores para un año de exposición, permitiendo retrasar al máximo su corrosión, aumentar el ciclo de vida de los productos y reducir costes asociados al deterioro de materiales.

Experimental

Zonas urbanas e industriales de la península Ibérica

Se seleccionan las zonas urbanas e industriales de la Península Ibérica y la Comunidad Valenciana en su totalidad para el estudio desarrollado en el proyecto CORCLIM [25] [26] [27] [28]. Esta información se pasa a un archivo de mapas SIG. Para ello, se han empleado los siguientes datos de libre acceso pertenecientes al centro de descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG): Nomenclátor Geográfico de Municipios y Entidades de Población, Divisiones administrativas de España, CORINE Land Cover 2018 y Sistema de información de Ocupación del Suelo en España de alta resolución (SIOSE AR).

El flujo de trabajo realizado para la selección de los recintos es el siguiente:

En primer lugar, mediante un software SIG, se importan los datos espaciales referentes a los municipios y poblaciones y se aplica la metodología empleada por el ministerio de Vivienda y Agenda Urbana para la selección de las áreas urbanas de España.

A continuación, se introduce la información correspondiente al SIOSE y el CORINE, con el fin de localizar las zonas industriales de mayor superficie y con mayor proximidad a núcleos de población.

Finalmente, se realiza un filtrado de los municipios que más interesan para el objetivo del estudio. De forma manual, se ha incorporado al archivo SIG final de recintos la totalidad de las tres provincias de la Comunitat Valenciana.

El software SIG ha permitido realizar operaciones entre las diferentes capas de información, permitiendo reducir el número de municipios que cumplan los criterios de población establecidos, de proximidad a las zonas industriales y de proximidad a núcleos de población, para el estudio de la velocidad de corrosión.

Determinación velocidad de corrosión a partir de parámetros atmosféricos

Las ecuaciones (1) y (2), de la norma ISO 9223, se emplean para determinar la velocidad de corrosión del acero y el zinc, respectivamente. La función dosis respuesta de esta norma muestra el ataque por corrosión después del primer año de exposición en el exterior, en función de la deposición seca de óxido de azufre (SO_2), cloruro seco (Cl-), temperatura (T) y humedad relativa (RH).

Ecuación acero:

$$r_{corr} = 1.77 \cdot P_d^{0.52} \cdot \exp(0.020 \cdot RH + f_{St}) + 0.102 \cdot S_d^{0.62} \cdot \exp(0.033 \cdot RH + 0.040 \cdot T) \quad (1)$$

$$f_{St} = 0.150 \cdot (T - 10) \text{ when } T \leq 10^\circ C; \text{ otherwise } -0.054 \cdot (T - 10)$$

Ecuación zinc:

$$r_{corr} = 0.0129 \cdot P_d^{0.44} \cdot \exp(0.046 \cdot RH + f_{zn}) + 0.0175 \cdot S_d^{0.57} \cdot \exp(0.08 \cdot RH + 0.085 \cdot T) \quad (2)$$

$$f_{zn} = 0.038 \cdot (T - 10) \text{ when } T \leq 10^\circ C; \text{ otherwise } -0.071 \cdot (T - 10)$$

Siendo, r_{corr} la velocidad de corrosión del metal en el primer año de exposición, expresado en micrómetros por año ($\mu m/a$), T temperatura anual media, expresada en grados Celsius ($^\circ C$), RH Humedad relativa anual media, expresada en porcentaje (%), P_d deposición anual media de SO_2 , expresado en miligramos por metro cuadrado día [$mg/(m^2 \cdot d)$] y S_d deposición anual media de Cl-, expresado en miligramos por metro cuadrado día [$mg/(m^2 \cdot d)$].

Una vez se determina la velocidad de corrosión, se emplea la tabla de clasificación de corrosividad de la norma ISO 9223 para obtener la categoría de corrosividad correspondiente.

Obtención datos atmosféricos

Existen dos métodos para obtener los parámetros atmosféricos necesarios para determinar la velocidad de corrosión. Puede ser mediante estaciones climáticas (datos in situ), como AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), o mediante datos de satélites.

En España la red más grande de estaciones climática pertenece a AEMET, adscrita al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico a través de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente. A partir de esta red de estaciones climáticas se obtienen los valores

de temperatura y precipitaciones pertenecientes al territorio español, pero, debido a que los valores de dióxido de azufre y cloruros no son captados por la mayoría de las estaciones climáticas de AEMET, se decide no emplear este método para el cálculo de la velocidad de corrosión y, por consiguiente, de la obtención del mapa de corrosión.

Se emplean los datos obtenidos mediante satélites, cuyo método se explica a continuación.

Para los parámetros de **temperatura y humedad relativa** [14] [15] [29] [30], se ha empleado información proveniente del Global Land Data Assimilation System (GLDAS-2) de la NASA. GLDAS está formado de tres componentes GLDAS 2.0, GLDAS 2.1 y GLDAS 2.2. Se ha empleado el GLDAS 2.1, que tiene una resolución espacial de (0,25 x 0,25) grados de arco o, transformado a una cuadrícula homogénea, de (27,83 x 27,30) km.

Respecto a la temperatura, GLDAS ofrece la variable de la temperatura en grados Kelvin, sin embargo, GLDAS no ofrece la humedad relativa, sino la humedad específica. Para obtener la humedad relativa se ha empleado la ecuación de Clausius-Clapeyron, relacionando otras variables que GLDAS ofrece:

$$RH = 100 \frac{w}{w_s} \approx 0,263pq \left[\exp\left(\frac{17,67(T-T_0)}{T-29,65}\right) \right]^{-1} \quad (4)$$

Donde, por una parte, w es la proporción de masa mixta de vapor de agua frente a aire seco y w_s es la proporción de vapor de agua frente a aire seco en equilibrio. Por otro lado, p es la presión en Pa, q es la humedad relativa adimensional, T es la temperatura en K y T_0 es igual a 273,16 K.

En cuanto al **dióxido de azufre** (SO_2) [31] se ha empleado el instrumento TROPOMI montado en el satélite Sentinel 5p. TROPOMI adquiere imágenes globales diarias en cuatro regiones espectrales diferentes (ultravioleta, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta y el visible) que permiten la obtención de SO_2 , entre otros. En las imágenes más recientes la resolución espacial es de (3,5 x 5,5) km.

Los valores de SO_2 vienen expresados en concentración de moles (mol/m^2) y también puede ser expresado en Unidades Dobson (DU) donde $1 \text{ DU} = 2,69 \cdot 10^{16} \text{ mol}/m^2$.

Los datos de **cloruros** [32] [33] del presente trabajo se han determinado a partir de técnicas geoestadísticas. Éstas permiten predecir la variable en determinadas posiciones previamente definidas y calcular el error de la predicción, el cual depende de la densidad espacial de los datos. Este parámetro es esencial para calcular la

corrosión, pero España no dispone de datos oficiales. Por ello, AIDIMME ha realizado una colaboración de apoyo tecnológico con La Estación Experimental de Zonas Árida. Este centro de investigación español es dependiente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), el cual dispone de bases de datos con valores específicos, recogidos durante los últimos 22 años por el investigador principal de dicha colaboración, Dr. Francisco Javier Alcalá García [34] [35] [36].

Para determinar la deposición total atmosférica de cloruro (masa total de cloruro) sobre el terreno (AP), en unidades de valores acumulados $g \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$, se multiplica la precipitación acumulada en el periodo (P), en unidades de valores acumulados $mm \cdot año^{-1}$, y la concentración de cloruro disuelto en la precipitación (CP), en unidades de valores acumulados $mg \cdot L^{-1} \equiv g \cdot m^{-3}$.

$$AP = P \cdot CP \quad (5)$$

Determinación categoría de corrosividad mediante ensayo de corrosión acelerada

El objetivo de esta sección es estudiar un método estándar en laboratorio que permita calcular la velocidad de corrosión para probetas de acero desnudo y zinc y, por consiguiente, obtener la categoría de corrosividad asociada.

Se emplea el método ISO 14993:2001. Cada ciclo tiene una duración de 8 horas y combina etapas secas y húmedas, así como niebla salina. Se estudia el número

de ciclos requeridos para obtener cada una de las categorías de corrosividad.

Después de realizar el ensayo, se mide la pérdida de masa de las muestras ensayadas y limpias. Posteriormente, se aplica la fórmula 6, para determinar la velocidad de corrosión, descrita en la norma UNE-EN ISO 9226:2012. En todos los cálculos realizados, se considera que el tiempo de exposición es un año.

$$r_{corr} = \frac{\Delta m}{A \cdot t} = \frac{\Delta m}{A \cdot 1} \quad (6)$$

Siendo, r_{corr} la velocidad de corrosión, expresado en gramos por metro cuadrado año [g/(m² a)], Δm la pérdida de masa, expresado en gramos (g), A el Área superficial, expresada en metros cuadrados (m²) y t el tiempo de exposición, expresado en años (a).

Resultados y discusión

Mapa zonas urbanas e industriales de la península Ibérica

A partir del método explicado anteriormente, AIDIMME ha generado la información mostrada en la Figura 1, en un archivo SIG, que presenta la localización georreferenciada de las áreas urbanas e industriales del territorio peninsular español, marcadas en verde. Este mapa se denomina "Recintos". El área total de los 56 polígonos incluidos en el mapa de estudio es de 79.178 km², lo que supone un poco más del 16% del territorio peninsular español (494.011 km²).

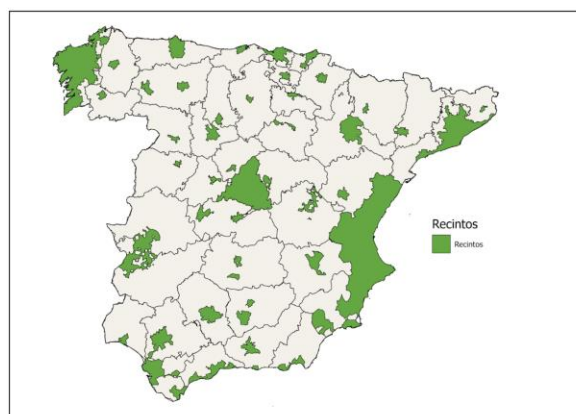


Figura 1. Mapa "Recintos" de la península ibérica con las zonas de mayor densidad de población y Comunidad Valenciana.

Las zonas marcadas en el mapa son las áreas en las cuales se analizan las condiciones atmosféricas influyentes en el proceso de corrosión en el proyecto

CORCLIM, como temperatura, humedad relativa, dióxido de azufre y cloruros.

AIDIMME ha proporcionado este mapa al CSIC para determinar los valores medios de cloruros acumulados en las áreas de interés.

Obtención de parámetros atmosféricos influyentes en la corrosión de la península ibérica mediante satélites

Temperatura y humedad relativa

Las variables de temperatura y humedad relativa se han obtenido a partir de la información proporcionada por GLDAS-2, mediante el proceso explicado anteriormente. Ambas variables son calculadas como una media anual para el año 2022 y exportadas en formato geoTIFF para su posterior importación a un software SIG.

Las imágenes resultantes son imágenes con un tamaño de píxel de aproximadamente (20 x 20) km que representan la media anual del año 2022 de temperatura y humedad relativa (Figura 2).

En la imagen de temperatura se puede observar que los valores de temperatura media en el año 2022 oscilan entre los 10 °C y 20 °C, donde los valores medios más altos se sitúan en la parte sur de España y la costa Mediterránea. En cuanto a la humedad relativa media los valores varían entre el 40 % y 80 %, donde los valores más bajos se sitúan en el interior de la península, los valores medios en las costas de Andalucía y mediterránea y los valores más altos en el norte de España.

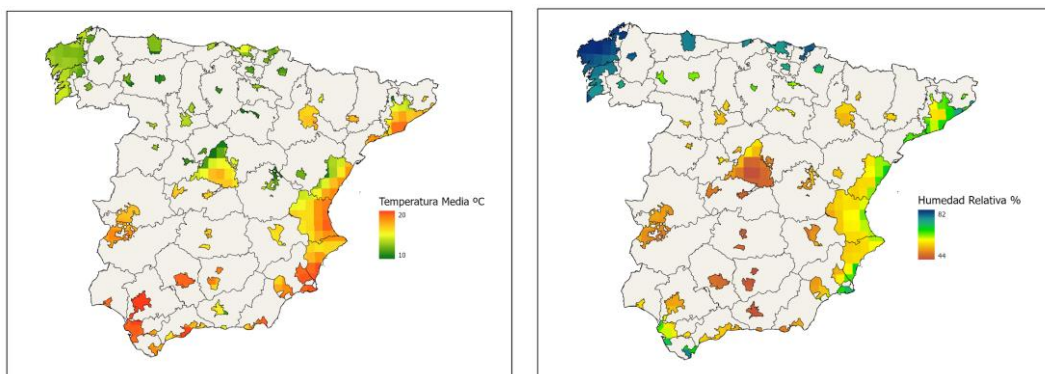


Figura 2. Mapa de Temperatura media (°C) (izda.) y Humedad relativa media (%) (dcha.) del año 2022 en los recintos seleccionados de España.

Dióxido de azufre (SO₂)

Al igual que todos los mapas generados, la información de SO₂ también representa la media anual del año 2022 en mg/m²d (Figura 3). También es exportada en formato geoTIFF, en coherencia con las demás imágenes.

Los valores finales de SO₂ varían de (0 – 41) mg/m² día, donde los valores más bajos se encuentran en zonas montañosas y zonas menos pobladas. Los valores más elevados de concentraciones de dióxido de azufre se encuentran, principalmente, en las provincias occidentales de Andalucía, Asturias y Galicia.

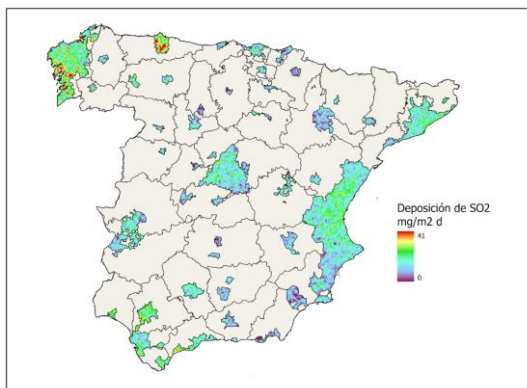


Figura 3. Mapa de SO₂ (mg/m²d) medio del año 2022 en los recintos seleccionados de España.

Cloruros (Cl⁻)

A continuación, se va a explicar en detalle cómo obtener la **masa total de cloruros sobre el terreno (AP)**, el cual ha sido desarrollado en colaboración con el Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Para ello, es necesario determinar primero las **precipitaciones (P)** y la distribución espacial de la **concentración de cloruros disueltos en la precipitación (CP)**. El producto de P y CP da como resultado el valor de AP.

- Modelo digital del terreno

Con el objetivo de generar capas de aquellos atributos geográficos que determinan parcialmente la distribución espacial de la concentración de cloruros disueltos en la precipitación (CP), en primer lugar, se ha utilizado el Modelo Digital del Terreno (MDT) de España con resolución de 25 m del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica del Instituto Geográfico Nacional (ING).

- Elevación y distancia al mar

También se ha empleado la herramienta Resample Bilineal a 2,5 km para crear dos nuevos registros para cada nodo, denominado distancia al mar (en km) y altitud (en m). El MDT con resolución de 25 m proporciona los datos de altitud, mientras que algunas capas y funciones SIG de uso convencional permiten deducir la distancia al mar a partir del contorno peninsular.

La distancia a la costa de un área determinada influye de manera significativa en la concentración de cloruros y, en consecuencia, en la agresividad del ambiente [15]. Por ello, es un parámetro que se ha tenido en cuenta en el presente estudio.

Se ha realizado un mapa de distancias nodales al mar, en este caso para una malla con resolución de 10 km. Se ha calculado como la distancia del punto central de la Península Ibérica a la línea de costa.

Para interpolar una variable, se debe realizar una verificación previa para asegurar que la técnica geoestadística empleada cumple las premisas básicas de distribución, dependencia y estacionariedad. Este análisis previo se realiza en el mismo software SIG.

- Análisis de datos

A continuación, se procede al análisis y tratamiento de componentes para determinar la **masa total de cloruros sobre el terreno (AP)**, la cual corresponde a los **datos de precipitación (P) multiplicado por la concentración de cloruros disueltos en el agua de lluvia (CP)**.

- Precipitación (P)

Este parámetro se ha obtenido a partir de la base de datos de La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Se ha recopilado esta información para elaborar los mapas de los componentes de la variable P con resolución de 2,5 km. Posteriormente, se han calculado los valores nodales de P media anual.

- Concentración de cloruros disueltos en las precipitaciones (CP)

La interpolación de **valores de CP** se ha realizado en la misma malla con resolución de 2,5 km generada para mapear los componentes de la variable P. Se ha usado los datos originales de CP de la malla con resolución de 10 km y las funciones experimentales de las principales covariantes que determinan su distribución en territorios extensos con contorno costero y fuerte contraste orográfico, las cuales son la distancia al mar y la altitud.

En el territorio continental, la distancia al mar determina la progresiva disminución de CP hacia el interior del territorio al disminuir la influencia del aerosol marino, procedente del Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo.

Por otra parte, la covariable altitud genera una nueva disminución de CP que se adiciona a la generada por la primera covariable, en este caso debida al aumento de la precipitación con el aumento de la elevación y, en consecuencia, al aumento de la dilución de un determinado contenido regional de CP en esa área geográfica conforme aumenta la altitud. Ambas covariables generan gradientes negativos de CP respecto de la distancia al mar y respecto de la altitud.

Para analizar y tratar la variable CP, se ha utilizado el MDT con resolución de 2,5 km para mapear los componentes de la variable P y se han definido las funciones experimentales de CP vs distancia al mar y CP vs altitud deducidas, siendo la función global de CP vs distancia al mar (z^*) y altitud (z):

$$CP=(0.48-(potencial(z^*,0.3215394428)\cdot 15.21234568))+(0.52\cdot((1.7739$$

$19984 \cdot \ln(z^*) + 10.305380252 + ((\exp(-0.000811936788 \cdot z^*) - 1.38183263) - 1.38183263)$.

Esta función global se ha utilizado para mapear CP en la malla con resolución de 2,5 km.

Se emplea el Krigeado para mapear CP en la malla de resolución 2,5 km [37] [38] [39].

El Krigeado es un método de interpolación, el cual consiste en encontrar la mejor estimación posible del valor de una variable. Para ello, efectúa una ponderación, es decir, atribuye un peso a cada valor medido de manera que minimice la varianza del error de estimación.

- Masa total de cloruros sobre el terreno (AP)

Los componentes de la variable de **masa total de cloruros sobre el terreno (AP)** se distribuyen en 4.976 celdas con resolución de 10 km. Se ha empleado la herramienta de Resamplado Bilineal para reducir el tamaño de celda a 2,5 km.

- Producto final en las áreas urbanas e industriales seleccionadas

A partir de la información proporcionada en la capa correspondiente a las zonas urbanas e industriales seleccionadas, "Recintos", Figura 1, se han extraído las celdas de la malla con resolución 2,5 km, cuyas posiciones nodales se localizan dentro de cada uno de los 56 polígonos catalogados como áreas urbanas e industriales. El resultado es una secuencia de capas con la información nodal de cada componente de cada variable mapeada.

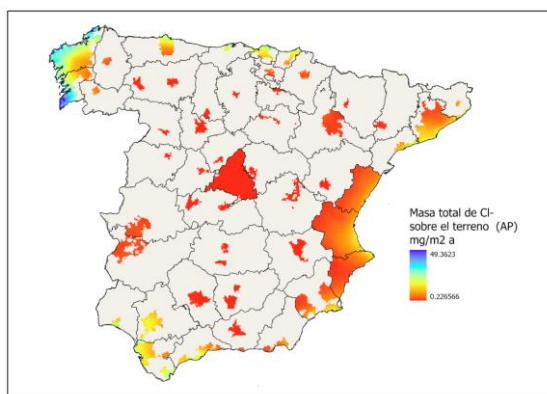


Figura 4. Extracción de la información nodal del mapa de AP media anual con resolución de 2,5 km contenida dentro de la capa representada en la Figura 1.

En la Figura 4, se representa la masa total de cloruros sobre el terreno, destacando las zonas del norte de la Península, en especial Galicia, donde la combinación de humedad y sales procedentes de la costa la convierte en una atmosfera altamente corrosiva.

Mapa de corrosividad

Para la obtención de la velocidad de corrosión del acero y el zinc se utilizan las ecuaciones (1) y (2) de la norma ISO 9223, descritas anteriormente. En ambas ecuaciones se emplean los datos de las variables que se han obtenido en el apartado anterior, temperatura (°C), Humedad relativa (%), SO₂ (mg/m²·d) y Cl⁻ (mg/m²·d).

Para la creación de los mapas de velocidad de corrosión, se importan las cuatro imágenes ráster correspondientes a las variables que participan en las ecuaciones al software SIG.

Después de calcular la velocidad de corrosión, el software SIG permite clasificar los valores en diferentes categorías de corrosividad, según los valores de la Tabla 2 de la norma ISO 9223. Como resultado se obtienen los mapas de corrosión del acero y zinc, representados en las Figura 5.

Las **categorías de corrosividad del acero** presentes en la Península Ibérica son C2, C3 y C4. C2 es la categoría más extendida en el territorio, C3 se destaca en las zonas costeras del mediterráneo, Andalucía y el norte de España, mientras en el interior también se encuentra C3

en una pequeña zona de la Comunidad de Madrid. La zona más corrosiva para el acero, perteneciente a C4, se localiza en la costa de Galicia, la cual presenta elevada humedad y alta cantidad de cloruros en el ambiente.

Las **categorías de corrosividad del zinc** presentes en la Península Ibérica son también C2, C3 y C4. La categoría C2 se localiza principalmente en las zonas del interior del territorio. Se observa que el zinc es más sensible a la

corrosión atmosférica que el acero, ya que, en las zonas costeras, tanto del Mediterráneo, como de Andalucía y norte de España, la categoría C3 está más extendida que en el anterior caso. En cuanto a la categoría C4, tal como se ha visto anteriormente, en el caso del zinc también se concentra en la costa de Galicia, donde las condiciones climáticas influyentes en el proceso de corrosión son más extremas que el resto de la Península.

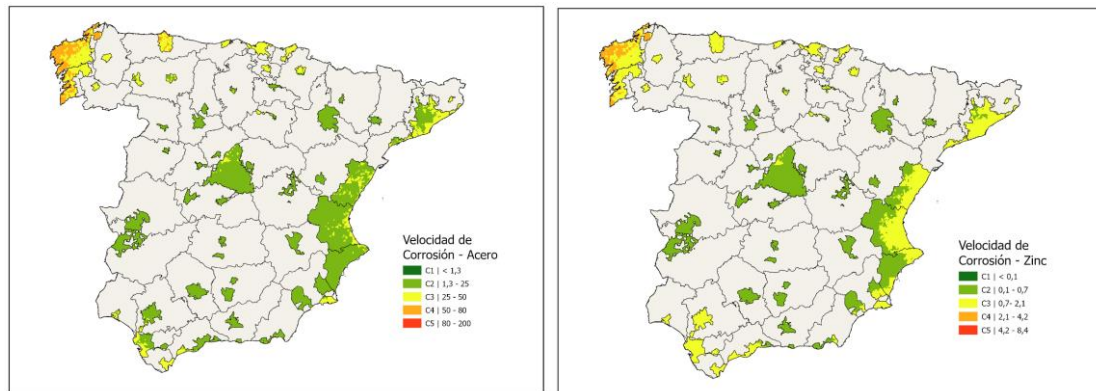


Figura 5. Mapa de Velocidad de Corrosión del acero (izda.) y zinc (dcha.) en los recintos seleccionados de la Península Ibérica.

Relación ensayos de corrosión acelerada con categorías de corrosividad

Se preparan las muestras de acero y zinc para los ensayos de corrosión acelerada. La preparación de las

muestras consiste en encintar los bordes y limpiar la superficie que se va a exponer. En las Figura 6 se muestran las probetas de acero y zinc, respectivamente, listas para introducirlas en la cámara cíclica de corrosión.



Figura 6. Muestras de acero (izda.) y zinc (dcha.) antes del ensayo de corrosión acelerada.

Una vez finalizado un determinado número de ciclos de ensayo, se sacan las probetas de la cámara de corrosión acelerada. En la Figura 7 se observa que en las probetas

de acero se ha formado una capa de corrosión roja en la superficie expuesta, mientras que la capa de corrosión que se produce en las probetas de zinc es blanca.

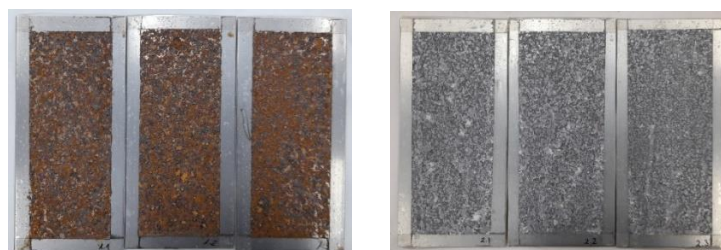


Figura 7. Probetas de acero (izda.) y zinc (dcha.) sin limpiar tras 3 ciclos de corrosión acelerada.

Después de cada ensayo de corrosión aceleradas, se limpian las muestras siguiendo el procedimiento indicado en la norma UNE-EN ISO 9226:2012 (Anexo A).

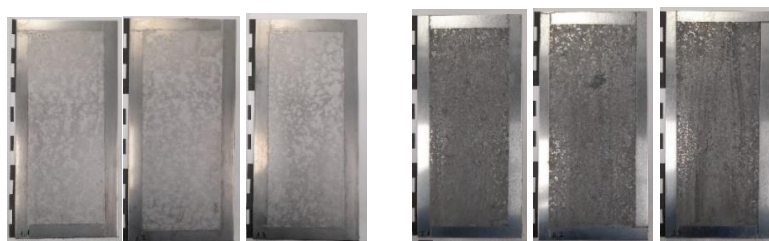


Figura 8. Probeta de acero (izda.) y zinc (dcha.) limpia tras 3 ciclos de corrosión.

Por último, se determina la pérdida de masa para poder calcular la velocidad de corrosión mediante la ecuación (6).

A continuación, se resumen los resultados obtenidos del acero y el zinc en las Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1. Resultados corrosión acelerada del Acero.

Foto	Número ciclos	Tiempo de ensayo (h)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Perdida masa (g)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (m ²)	Velocidad de corrosión (g/m ² ·a)	Categoría de corrosión
	1	8	80,96	80,90	0,07	133,47	55,19	0,0074	8,95	C1
	1	8	80,80	80,74	0,06	131,27	54,79	0,0072	8,55	C1
	1	8	80,94	80,87	0,07	132,69	56,16	0,0075	9,59	C1
	3	24	80,88	80,5893	0,29	132,09	52,37	0,0069	41,81	C2
	3	24	80,84	80,5268	0,31	133,38	52,31	0,0070	45,09	C2
	3	24	80,87	80,5519	0,32	132,15	51,12	0,0068	47,30	C2
	6	48	82,42	81,76	0,66	134,05	53,59	0,0071	92,20	C2
	6	48	82,23	81,63	0,60	134,37	53,35	0,0072	83,17	C2
	6	48	82,29	81,69	0,60	132,56	53,03	0,0070	84,91	C2
	14	112	82,28	80,24	2,04	130,69	51,63	0,0067	302,77	C3
	14	112	82,22	80,37	1,84	132,42	52,49	0,0070	265,30	C3
	14	112	82,40	80,58	1,82	133,07	53,21	0,0071	257,22	C3
	18	144	81,56	78,99	2,56	130,76	52,54	0,0069	373,19	C3
	18	144	81,36	78,67	2,68	131,34	53,87	0,0071	379,16	C3
	18	144	81,34	78,75	2,59	132,88	53,87	0,0072	362,26	C3
	22	176	81,38	77,16	4,22	133,19	53,55	0,0071	591,58	C4
	22	176	82,36	77,98	4,38	132,22	52,84	0,0070	626,36	C4
	22	176	82,34	77,98	4,36	131,83	53,20	0,0070	622,02	C4

Tabla 2. Resultados corrosión acelerada del zinc.

Foto	Número ciclos	Tiempo de ensayo (h)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Perdida masa (g)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (m ²)	Velocidad de corrosión (g/m ² ·a)	Categoría de corrosión
	1	8	74,43	74,38	0,05	132,99	54,49	0,0072	7,23	C3
	1	8	74,35	74,30	0,05	134,08	54,62	0,0073	6,16	C3
	1	8	74,59	74,55	0,04	134,60	54,46	0,0073	5,99	C3
	3	24	74,36	74,23	0,13	132,96	53,05	0,0071	18,88	C4
	3	24	74,29	74,15	0,14	133,21	56,45	0,0075	18,92	C4
	3	24	74,32	74,20	0,12	133,69	54,47	0,0073	16,87	C4

Conclusión

En el proyecto CORCLIM se han seleccionado las zonas urbanas e industriales de la Península Ibérica, así como la Comunidad Valenciana en su totalidad. El mapa con estas áreas seleccionadas ha servido como punto de partida para los análisis geoestadísticos mediante satélites, necesarios para determinar los factores atmosféricos más influyentes en el proceso de corrosión. Estas variables son la temperatura, la humedad relativa, el dióxido de azufre (SO₂) y los cloruros (Cl⁻).

En los resultados, se observa que las principales categorías de corrosión existentes para el acero y el zinc son C2, C3 y C4. En el mapa de corrosión del acero, la categoría C2 es la más extendida, también destaca la categoría C3 en las costas del Mediterráneo y de Andalucía y en el norte de España, localizando la categoría C4 en la costa de Galicia, donde los parámetros de corrosión medidos son más agresivos que en el resto de la Península Ibérica. En cambio, en el mapa de corrosión de zinc, se observa que las áreas costeras de C3 son más extensas que en el caso del acero, lo cual significa que, para las mismas condiciones ambientales y un año de tiempo de exposición, el zinc alcanzará mayor velocidad de corrosión que el acero. La categoría C2 se concentra en zonas del interior y la C4, al igual que en el mapa del acero, se localiza en la costa gallega.

En cuanto a la simulación en laboratorio, se ha ajustado los ciclos climáticos para simular las categorías de corrosión. En el caso del acero se ha conseguido obtener las categorías C1, C2, C3 y C4, pero para el zinc sólo se ha conseguido reproducir C4 y C3, con el mínimo número de ciclos. Con lo cual, el método empleado sería óptimo para la simulación del acero, pero no es conveniente emplearlo para el zinc, por lo que, para este metal, se precisa mayor investigación.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido realizado gracias a la financiación del Instituto Valenciano de Competitividad e Innovación (IVACE+i), de la Generalitat Valenciana.

References

- [1] J. & B. S. Kruger, Corrosion of Metals: Overview., 2001.
- [2] F. Díaz Rodríguez, «Estudio de la corrosión atmosférica del cinc y el acero galvanizado,» *Universidad de La Laguna (Tenerife, España)*, 2001.
- [3] J. Cuesta, Diseño y modelización de un mapa de corrosión en los polígonos industriales de Cantabria, España, 2016.
- [4] J. Cantero Cuesta, Diseño y modelización de un mapa de corrosión en los polígonos industriales de cantabria, Cantabria, España: Universidad de Cantabria, 2016.
- [5] G. Vachtsevanos, K. Natarajan, R. Rajamani y P. Sandborn, Corrosion Processes., Structural Integrity, 2020.

- [6] P. Sereda, «Weather factors affecting corrosion of metals,» *American Society for Testing and Materials Special Technical Publication*, nº 558, pp. 7-22, 1975.
- [7] E. Kusmierek y E. Chrzescijanska, «Atmospheric corrosion of metals in industrial city environment,» *Data in Brief*, vol. 3, pp. 149-154, 2015.
- [8] V. Kumar, N. Sharma y S. Tiwari, «Atmospheric corrosion of materials and their effects on mechanical properties: A brief review,» *Materialstoday:proceedings*, vol. 44, nº 6, pp. 4677-4681, 2021.
- [9] J. Salazar-Jiménez, «Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales,» 2015.
- [10] V. Sastri, E. Ghali y M. Elboudjaini, «Corrosion Prevention and Protection: Practical Solutions,» *Materials Science*, 2007.
- [11] D. Tomashov, *Theory of Corrosion and Protection of Metals*, New York: MacMillan Co, 1966.
- [12] K. Barton, «Protection against atmospheric corrosion,» Londres, Wiley and Sons, 1976.
- [13] G. Berukshtis y G. Klark, *Corrosion of Metal Alloy*, Jerusalem: Tomashov y Mirulyubev, 1966.
- [14] E. Navarrete Cueva, *Corrosión y degradación de los metales*, Escuela Politécnica Nacional, 2007.
- [15] C. Vargel, «The parameters of atmospheric corrosion,» *Corrosion of Aluminium*, pp. 545-560, 2020.
- [16] Cai, Y., Zhao, Y y X. Ma, «Influence of environmental factors on atmospheric corrosion in dynamic environment,» *Corrosion Science*, vol. 137, pp. 163-175, 2018.
- [17] D. Knotkova y K. Kreislova, «Chapter 3 Corrosivity of atmospheres – derivation and use of information,» de *Environmental Deterioration of Materials*, Prague, Czech Republic., WIT Press, 2007, pp. 73-105.
- [18] B. Chico, D. de la Fuente y J. Vega, «Mapas de España de corrosividad del zinc en atmósferas rurales,» *Revista de Metalurgia*, vol. 46, pp. 485-492, 2010.
- [19] I. Cole, W. Ganther, A. Helal y W. Chan, «A corrosion map of Abu Dhabi,» *Materials and Corrosion*, vol. 62, nº 9999, 2011.
- [20] D. T. Janse van Rensburg, L. A. Cornish y J. Van der Merwe, «Corrosion map of South Africa's macro atmosphere,» vol. 115, nº 7/8, 2019.
- [21] R. Vera, M. Puentes, R. Araya, P. Rojas y A. Carvajal, «Mapa de corrosión atmosférica de Chile: Resultados después de un año de exposición,» *Revista de la construcción*, vol. 12, nº 22, 2012.
- [22] M. Strieska y P. Kotes, «Corrosion map of zinc in Slovakia,» *An International Journal for Engineering and Information Sciences*, vol. 13, nº 2, pp. 129-136, 2018.
- [23] W. Pongsaksawad, K. Pitichin, k. Piya y S. Sorachot, «Chloride distribution model and corrosion map of structural steels for tropical climate in Thailand,» *Science of the Total Environment*, vol. 787, 2021.
- [24] H. Wu, H. Lei, Y. F. Chen y J. Qiao, «Comparison on corrosion behaviour and mechanical properties of structural steel exposed between urban industrial atmosphere and laboratory simulated environment,» *Construction and Building Materials*, vol. 211, pp. 228-243, 2019.
- [25] P. Fidalgo y J. L. Nicolás, *Las áreas urbanas Españolas. Características y tendencias*.
- [26] M. y. A. U. Ministerio de Transportes, *Áreas urbanas en España, 2021*, Secretaria General Técnica. Centro de Publicaciones, 2021.
- [27] C. y. T. Ministerio de Industria, Estructura y Dinámica Empresarial en España, *secretaria general de industria y de la pequeña y mediana empresa, 2023*.
- [28] «3. Localización y especialización,» de *NIE. Panorámica de la Industria*, pp. 33-48.
- [29] J. Castaño, C. Botero y S. Peñaranda, «Corrosión atmosférica del zinc en ambientes exteriores e interiores,» *Revista de metalurgia*, vol. 43, nº 2, pp. 133-145, 2007.
- [30] S. Rivero, B. Chico, D. de la Fuente y M. Morcillo, «Corrosión atmosférica del acero bajo en carbono en un ambiente marino polar. Estudio del efecto del regimen de vientos,» *Revista de Metalurgia*, vol. 43, nº 5, pp. 370-383, 2007.
- [31] Y. K. Cai, Y. Zhao y Z. K. Zhang, «Atmospheric and Marine Corrosion: Influential Environmental Factors and Models,» de *In Proceedings of the International Workshop on Environmental Management, Science and Engineering*, 2018, pp. 178-186.
- [32] J. Alcántara, D. De la Fuente, B. Chico y J. Simancas, «Marine Atmospheric Corrosion of Carbon Steel: A Review,» *Materials*, vol. 10, nº 406, 2017.
- [33] F.-Y. Ma, «Corrosive Effects of Chlorides on Metals,» de *Pitting Corrosion*, Shanghai, China, Prof. Nasr Bensalah, 2012, pp. 139-178.
- [34] F. Alcalá y E. Custodio, «Atmospheric chloride deposition in continental Spain,» *Hydrological Processes*, vol. 22, pp. 3636-3650, 2008.
- [35] F. Alcalá y E. Custodio, «Spatial average aquifer recharge through atmospheric chloride mass balance and its uncertainty in continental Spain,» *Hydrological Processes*, vol. 28, pp. 218-236, 2014.
- [36] F. Alcalá y E. Custodio, «Natural uncertainty of spatial average aquifer recharge through atmospheric chlorode mass balance in continental Spain,» *Journal of Hydrology*, vol. 524, pp. 642-661, 2015.
- [37] P. Goovaerts, *Geostatistics for Natural Resourced Evaluation (Applied Geostatistics)*, New York: Oxford University Press, 1997.
- [38] E. Isaaks y R. Srivastava, *An Introduction to Applied Geostatistics*, New York: Oxford University Press, 1997.
- [39] A. Journel, *Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons*, Washington DC: American Geophysical Union, 1989.