

MAPA DE CORROSIVIDAD ATMOSFERICA DE CATALUÑA-BALEARES

**ASOCIACION NACIONAL DE QUIMICOS
DE ESPAÑA (ANQUE). DELEGACION CATALUÑA-
BALEARES. — BARCELONA.**

MAPA DE CORROSIVIDAD ATMOSFERICA DE CATALUÑA-BALEARES

POR

**LA SECCION DE CORROSION
DE LA DELEGACION DE CATALUÑA-BALEARES
DE LA ASOCIACION NACIONAL DE QUIMICOS DE ESPAÑA
Y EL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES
METALURGICAS DEL C.S.I.C**

ASOCIACION NACIONAL DE QUIMICOS DE ESPAÑA (ANQUE). DELEGACION
CATALUÑA-BALEARES. — BARCELONA.

COPYRIGHT © Sección de Corrosión de ANQUE. Delegación de Cataluña y Baleares
y CENIM — Madrid

I.S.B.N. Rústica 84-85538-16-1 Lujo 84-85538-15-3
Dep. Legal Rústica B-38788-XXIV Lujo B-38790 XXIV
1981

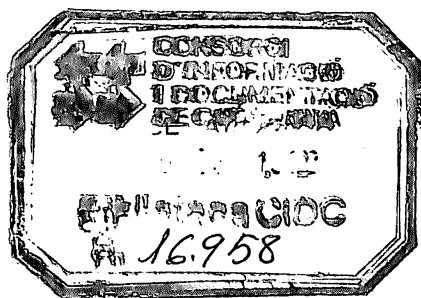


FECSA

La presente edición ha sido patrocinada por Fuerzas Eléctricas de Cataluña, S.A.

MAPA DE CORROSIVIDAD ATMOSFERICA DE CATALUÑA-BALEARES

PROYECTO COORDINADO POR LA SECCION DE CORROSION DE LA DELEGACION
DE CATALUÑA-BALEARES DE LA ASOCIACION NACIONAL DE QUIMICOS DE
ESPAÑA Y EL CENTRO DE INVESTIGACIONES METALURGICAS
DEL C.S.I.C.



OBRA EDITADA POR LA ASOCIACION NACIONAL DE QUIMICOS DE ESPAÑA
(ANQUE) — DELEGACION CATALUÑA-BALEARES.

Avda. Puerta del Angel, 24, 1.º - BARCELONA-2

PROLOGO

La elaboración de un mapa de corrosividad ambiental que abarcara la zona geográfica de Cataluña-Baleares era una ambiciosa idea que la Sección de Corrosión de esta Delegación de ANQUE venía considerando desde bastantes años atrás. Dada la diversidad de climas de esta zona, parecía especialmente justificada la realización de un estudio que informara del comportamiento de una serie de metales industriales en esas diferentes atmósferas: rural, urbana o industrial, marina, marina-industrial y marina-urbana. Esta idea, coincidente con la que el Departamento de Corrosión del CENIM pensaba desarrollar en todo el ámbito del territorio español, cristalizó en un Proyecto común entre este Organismo y nuestra Sección de Corrosión: el Mapa de Corrosividad Atmosférica de Cataluña y Baleares, proyecto que, finalizado, ve la luz en este año 1981.

Se aprovechaba en este Proyecto coordinado por las citadas entidades, la experiencia que ya poseía el CENIM, al haber realizado recientemente un estudio semejante ceñido a las cercanías de Madrid y Confederación Hidrográfica del Tajo y la excelente ubicación que para el establecimiento de las pertinentes estaciones de corrosión poseían una serie de factorías pertenecientes a diferentes Empresas radicadas en la zona geográfica a estudiar, abarcando todo el espectro ambiental citado.

Después de un, relativamente largo, período de gestación, las estaciones de ensayo distribuidas en los puntos más característicos de la geografía catalano-balear, estuvieron listas para su funcionamiento a comienzos del año 1977. Durante el período comprendido entre los años 1977 a 1979, ambos inclusive, se recogieron en estas estaciones los datos experimentales que permitieron evaluar en el año 1980 los resultados de las experiencias realizadas, los cuales han quedado plasmados en forma definitiva en el Mapa de Corrosividad Atmosférica de Cataluña y Baleares, que ahora presentamos.

En la labor común realizada han participado, tanto en la fase de preparación del Proyecto como en la de recogida de datos, una serie de personas, pertenecientes unas a la Sección de Corrosión de nuestra Delegación, otras al CENIM y otras a las diferentes Empresas que han colaborado en el mismo.

A todas estas personas, no participantes de modo directo en el Proyecto, los miembros del Grupo de trabajo que lo han llevado a cabo les expresamos nuestro más sincero agradecimiento. De modo especial, la Sección de Corrosión de esta Delegación de la ANQUE desea manifestar su profundo reconocimiento a la Empresa Fuerzas Eléctricas de Cataluña, S.A. (FECSA) por la ayuda material prestada a la edición de esta obra, reconocimiento que hace extensivo al personal de la misma que ha colaborado en esta publicación.

Confiamos en que los datos y conclusiones aportados en este estudio sirvan el objetivo principal propuesto al iniciar este Proyecto, que no ha sido otro que el de dar a conocer la susceptibilidad a la corrosión de una serie de metales en cada una de las zonas del abanico ambiental catalano-balear, para que, una vez conocida esa susceptibilidad a la corrosión, se puedan adoptar las medidas de protección más convenientes para evitarla.

Barcelona, abril de 1981

E. Julve
Presidente de la Sección de
Corrosión de ANQUE-Cataluña
Balears

INDICE

	Pág.
GRUPO DE TRABAJO QUE HA DESARROLLADO LA INVESTIGACION	9
ORGANISMOS Y EMPRESAS PARTICIPANTES EN EL PROYECTO	9
PROLOGO	11
I. INTRODUCCION	15
I. 1. Antecedentes	15
I. 2. Acción corrosiva de las atmósferas	16
I. 3. Mapas de corrosividad	17
I. 4. Criterios adoptados para la confección del mapa de corrosividad de Cataluña-Baleares	23
II. REALIZACION DEL MAPA DE CORROSIVIDAD	25
II. 1. Metales ensayados	25
II. 2. Procedimiento operatorio	25
II. 3. Características de los materiales metálicos ensayados	34
II. 4. Estaciones de corrosión y su entorno	38
II. 5. Datos de corrosión, de contaminación y metereológicos	39
III. DISCUSION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	45
III. 1. Estimación del tiempo de humectación	45
III. 2. Influencia del tiempo de humectación y de la contaminación at- mosférica en la corrosión	46
III. 3. Trazado del mapa de corrosividad de Cataluña-Baleares y tablas sobre las cotas de corrosión previsibles	55
IV. CONSIDERACIONES FINALES	61
IV. 1. Índice de corrosión	61
IV. 2. Utilización del mapa de corrosión en estimaciones a largo plazo ..	65
BIBLIOGRAFIA	67

I. INTRODUCCION

I. 1. Antecedentes

La acción de las atmósferas sobre los metales plantea uno de los más graves problemas de la corrosión. Basta hacer notar al respecto que la mayoría de los equipos y construcciones metálicas operan al aire libre.

Según Tomashov (1), más del 50 % de las pérdidas por corrosión de un país provienen de la acción agresiva de la atmósfera sobre los metales. Si se tiene en cuenta que los costes directos de la corrosión en España pueden alcanzar la cifra de los 150.000 millones de pesetas anuales (2), es posible que la acción atmosférica ocasione por sí sola pérdidas del orden de los 75.000 millones de pesetas al año.

Puesto que las pérdidas por corrosión guardan cierto paralelismo con la población y grado de industrialización del territorio, no parece aventurado pensar que en Cataluña y Baleares las pérdidas debidas a la corrosión atmosférica ascienden, por lo menos, a la importante suma de 15.000-20.000 millones de ptas/año.

Se comprende, pues, que cualquier ahorro conseguido por medio de un mejor conocimiento de los factores que influyen en la agresividad de las atmósferas hacia los metales represente una considerable suma de dinero. Según un informe del Ministerio de Tecnología del Reino Unido (3), cerca del 25 % de los costes de la corrosión son evitables. Tan solo hace falta un mejor conocimiento de los factores que influyen en la corrosión y de las técnicas de protección más apropiadas para cada situación.

Conscientes del interés del tema y de la ayuda que se puede prestar a químicos e ingenieros, proyectistas y técnicos en general, con el aporte de unos datos que, hasta el momento, no existen prácticamente, la Sección de Corrosión de la Delegación de Cataluña y Baleares de la Asociación Nacional de Químicos de España (ANQUE) y el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) han aunado esfuerzos para obtenerlos y plasmarlos en lo que se quiere sea el primer «Mapa de Corrosividad Atmosférica de Cataluña-Baleares».

Tal objetivo ha encajado plenamente dentro de uno de los programas del CENIM, cual es la confección del «Mapa Nacional de Corrosividad Atmosférica», en el que viene trabajando desde hace tiempo. Esta investigación se ha valido pues, de la experiencia ya adquirida por el CENIM en estudios previos y, por otra parte, del ejemplar entusiasmo y decisiva participación de una serie de empresas (citadas precedentemente) y de su personal, que han colaborado en la exposición de probetas y obtención de datos de contaminación, así como de la acción aglutinadora de la Sección de Corrosión de la ANQUE de Cataluña y Baleares, que ha auspiciado el proyecto cooperativo.

I. 2. Acción corrosiva de las atmósferas

El hecho de que la velocidad de corrosión de los metales en la atmósfera pueda ser decenas y hasta centenares de veces mayor en unos puntos que en otros indica el interés práctico de las estimaciones de agresividad de este medio.

En una atmósfera perfectamente seca la corrosión a temperatura ambiente es despreciable; la naturaleza electroquímica del proceso corrosivo exige que las superficies metálicas estén humedecidas, ya que, de otro modo, es imposible el funcionamiento de las minúsculas pilas locales de corrosión. Así, pues, la magnitud del proceso corrosivo es función, entre otros factores, del tiempo durante el cual la superficie permanece húmeda. El proceso global es suma de los procesos parciales de corrosión, que tienen lugar cada vez que se forma una capa de electrólito sobre el metal. En este sentido, las precipitaciones acuosas (lluvia, niebla, nieve) y la condensación de humedad por cambios de temperatura (formación de rocío) se hallan entre los principales promotores de la corrosión atmosférica. Las pulverizaciones acuosas de agua de mar o de río, resultado de la acción del aire, ejercen también un papel importante en algunos casos.

Otro factor que determina primariamente la intensidad del fenómeno corrosivo es la composición química de la atmósfera (contaminación del aire con gases, vapores ácidos y aerosoles de agua de mar).

El anhídrido sulfuroso y el cloruro sódico son los agentes corrosivos más corrientes de la atmósfera. El cloruro sódico se incorpora a la atmósfera desde el mar, siendo sus efectos muy acusados cerca de la orilla, donde el aire marino transporta grandes cantidades de sal. Lejos del mar la contaminación atmosférica depende de la presencia de industrias y de núcleos de población. En este caso, el principal contaminante, por su frecuencia e incidencia sobre el proceso corrosivo, es el SO_2 , que proviene de la combustión de combustibles sólidos y líquidos que contienen azufre. Su concentración se hace máxima cerca de la fuente de emisión (p. ej., chimenea) y decrece rápidamente al alejarse de ella; la dispersión del contaminante desde la fuente de emisión da lugar a la aparición de «microclimas». Hay que hacer constar que el grado de contaminación de un lugar puede variar a lo largo del tiempo debido a la supresión e instalación de nuevas industrias, a la adopción de medidas anticontaminantes, etc.

El tiempo de humectación es función de la meteorología. Por lo general, su magnitud es menos variable geográficamente que cuando se trata de la contaminación. Un mismo valor del tiempo de humectación puede ser aplicado, al menos a grosso modo, a una extensa zona, por ejemplo, a toda el área de una gran ciudad.

I. 3. Mapas de corrosividad

La trascendencia del fenómeno que nos ocupa justifica la continua búsqueda de relaciones, empíricas o teóricas, entre velocidad de corrosión y factores atmosféricos (meteorológicos y químicos).

Las predicciones de corrosión o de agresividad de las atmósferas servirán de orientación respecto a las medidas protectoras a adoptar para la conservación de una estructura metálica, y se tendrán en cuenta en la planificación de una obra, para especificar el metal o aleación a utilizar, tipo y características del recubrimiento protector —si es que se emplea alguno— y la frecuencia de mantenimiento. Se comprende, por tanto, el interés de los llamados «mapas de corrosividad» de países y áreas geográficas que informen directamente acerca de los riesgos de corrosión.

Para la confección de estos mapas es posible utilizar dos enfoques distintos:

A. Medida directa de la corrosividad de las atmósferas por su acción sobre ciertos metales típicos (Fe, Zn, Cu, Al...).

B. Determinación del efecto de los principales parámetros en la corrosión atmosférica y, una vez establecido, trazar el mapa de corrosividad en función de la variación geográfica de aquéllos.

Recurrir al método A obliga a disponer de una vasta red de estaciones de ensayo, que cubra prácticamente toda la superficie de un país. Hacen falta miles de estaciones de exposición. Aun así resulta arriesgado generalizar algunas conclusiones.

Recurrir al método B exige fijar previamente la influencia de los principales parámetros en la velocidad de corrosión y conocer, además, cómo varían estos parámetros a lo largo y ancho de la geografía de un país o territorio. Antes se ha dicho que la corrosividad de la atmósfera está gobernada fundamentalmente por el tiempo de humectación de la superficie metálica y por los niveles de contaminación ambiental. Si, como simplificación, se considera que el factor de contaminación no actúa, el mapa de corrosión pasa a ser función exclusiva del tiempo de humectación.

A partir de un mapa de este tipo, esto es, basado sólo en el tiempo de humectación, todo pronóstico requerirá, además, el conocimiento previo del tipo y grado de contaminación del lugar de exposición. Tendrá que saberse si la estructura metálica permanece expuesta a condiciones rurales (contaminación nula) o a los efectos de contaminantes atmosféricos estimuladores de la corrosión (generalmente SO_2 y cloruros), y en qué medida. En el supuesto de una atmósfera contaminada, habrá que multiplicar el dato leído en el mapa por el pertinente factor o coeficiente de corrección, que tome en consideración los efectos de la contaminación (4-6). Si existen industrias químicas cerca del lugar de exposición, la corrosión podrá ser excepcionalmente elevada e imprevisible a través de los mapas de corrosión y factores de corrección que tengan en cuenta, únicamente, los niveles de SO_2 y cloruros.

La «Construction Industry Research and Information Association» (C.I.R.I.A.), en el Reino Unido, y la «Rust-Oleum Corporation», en EE.UU., se han servido del método A para la confección de los mapas de corrosión de sus respectivos países.

El método B ha sido seguido por el Instituto de Física y Química de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética, que ha trazado los mapas de corrosividad atmosférica del Fe, Zn, Cu y Al en dicho país en función de datos meteorológicos. No constituye una gran desventaja el que estos mapas no reflejen directamente la acción de factores locales de contaminación en vista del carácter mudable de éstos (creación de nuevas industrias, desmantelamiento de otras, adopción de medidas anticontaminantes, etc.), y de su, a veces, excesivamente reducido ámbito de actuación (formación de microclimas o existencias de puntos singulares). El efecto de la contaminación se introduce posteriormente por medio de coeficientes correctores de los valores de corrosión leídos sobre el mapa.

Puede ser ilustrativo referirse, aunque sea someramente, a esos mapas de corrosividad de los EE.UU., Reino Unido y la URSS, con el propósito de aclarar mejor las distintas maneras de abordar el objetivo de su consecución.

El mapa de los EE.UU. se ha confeccionado con los datos de corrosión obtenidos en 500 poblaciones. El índice de corrosividad de cada lugar está dado por el número de años y meses que deben transcurrir para corroer una probeta de acero de 0,4 mm de espesor hasta prácticamente su perforación. La Rust-Oleum Corp, divide el mapa de los EE.UU. en nueve zonas, a las que corresponden los siguientes índices de corrosividad (en años y meses): 3.00-3.11; 4.00-4.11; 5.00-5.11; 6.00-6.11; 7.00-7.11; 8.00-8.11; 9.00-9.11; 10.00-14.11; y > 15.00 , que son equivalentes a las velocidades medias de corrosión anual de 133-102 μm ; 101-81 μm ; 80-68 μm ; 67-58 μm ; 57-51 μm ; 50-45 μm ; 44-41 μm ; 40-28 μm ; y 27 μm o menos. Del conjunto de las 500 poblaciones consideradas, en casi la mitad de ellas, 220 poblaciones, se alcanza el máximo nivel de corrosión (133-102 $\mu\text{m}/\text{año}$), 105 poblaciones muestran corrosiones intermedias de 67-45 $\mu\text{m}/\text{año}$, y sólo en 9 poblaciones la corrosión no rebasa las 44 $\mu\text{m}/\text{año}$. Los altos índices detectados, por lo general, deben achacarse a la notable contaminación de las atmósferas de muchas de las poblaciones donde fueron situadas las probetas.

La reconocida ambigüedad que supone la clasificación cualitativa de las atmósferas en «marinas», «costeras», «industriales», o «urbanas» impulsó a C.I.R.I.A. en el Reino Unido a promover (después de un estudio preliminar llevado a cabo por la «Central Electricity Generating Board») una amplia investigación encaminada a expresar de modo cuantitativo la agresividad atmosférica. Para la experimentación se recurrió a una profusa distribución de probetas de cinc a lo largo y ancho de las Islas Británicas, con el propósito de obtener un dato medio de corrosión por cada una de las áreas de 10×10 kilómetros cuadrados en las que fue dividido el mapa. Este enfoque obligó a situar probetas de cinc en varios miles de puntos de exposición durante el período 1968-1974. Interesa señalar que se escogió el cinc para la investigación por suponer

que con este metal se da mejor que con otros, una fuerte dependencia entre corrosión y calidad del aire.

En el mapa obtenido (*Figura 1*) se distinguen los siguientes niveles de corrosividad, expresados en mg/dm^2 año; 700-601, 600-501, 500-401, 400-301, 300-201, 200-101 y 100-0, que corresponden, respectivamente a los desgastes medios anuales: 9,80-8,41 μm ; 8,40-7,01 μm ; 7,00-5,61 μm ; 5,60-4,21 μm ; 4,20-2,81 μm ; 2,80-1,41 μm ; y 1,40 μm e inferiores. En un 32 % de la superficie del Reino Unido la corrosión del cinc no supera el nivel mínimo de 1,40 $\mu\text{m/año}$, y en otro 29 %, se sitúa dentro del siguiente escalón (entre 1,41 y 2,80 $\mu\text{m/año}$); cerca de un 12 % de la superficie del mapa exhibe corrosiones de grado intermedio (entre 4,21 y 5,60 $\mu\text{m/año}$), y sólo en un 3 % de él las corrosiones exceden de 8,40 $\mu\text{m/año}$.

En cambio, la construcción del mapa de la Unión Soviética (7) se basa fundamentalmente, como se ha dicho, en los tiempos de humectación de las superficies metálicas, deducidos de los datos suministrados por 99 estaciones meteorológicas repartidas por todo el territorio de la Unión Soviética. Con los datos de 10 a 30 años de observación se determinaron las duraciones medias anuales de los períodos de lluvia y de niebla para cada estación, y con los datos relativos a un período de tres años, se calculó el número de días de rocío y su duración. El período de deshielo, durante el cual es posible la corrosión (prácticamente no existe el fenómeno bajo una capa estable de hielo) se estimó equivalente al número de días en que la temperatura del aire se halla comprendida entre -1 y $+1^\circ \text{C}$, y se admitió, asimismo, que en las regiones meridionales, donde no se forman capas estables de hielo, los días de deshielo y, por lo tanto, de corrosión se extienden a toda la estación invernal. El total de estos tiempos configuró la cifra del tiempo anual de humectación, durante el cual la superficie metálica se mantiene recubierta por una capa de humedad. Con el conjunto de tiempos de las diferentes estaciones se construyó el mapa de humectación que muestra la *Fig. 2*, en el que la totalidad del territorio de la Unión Soviética aparece dividido en once zonas, de acuerdo con los tiempos de permanencia de la capa de humedad sobre el metal.

Finalmente, para obtener el mapa de corrosividad, por ejemplo del hierro (*Fig. 3*), en la Unión Soviética, se partió del dato experimental de que su corrosión en un área rural avanza 0,89 μm cada 100 h de humectación, dato que, incrementado en un 50 % para tomar en consideración un coeficiente de cautela o seguridad, se multiplicó por la duración del tiempo de humectación indicado en *Fig. 2*. Factores de importancia secundaria, como posibles cambios de velocidad de corrosión debidos a variaciones del grosor de la película de humedad, presencia de polvo sobre la superficie, distinta orientación de ésta, etc., se consideraron incluidos, globalmente, dentro del mencionado coeficiente de cautela.

Refiriéndose a la *Fig. 3*, el desgaste por corrosión del hierro expuesto en las atmósferas rurales de la Unión Soviética varió entre 9 y 45 $\mu\text{m/año}$. En el caso de tratarse de atmósferas contaminadas se tendrían que multiplicar esos datos por los oportunos coeficientes de intensificación del ataque, determinados previamente.

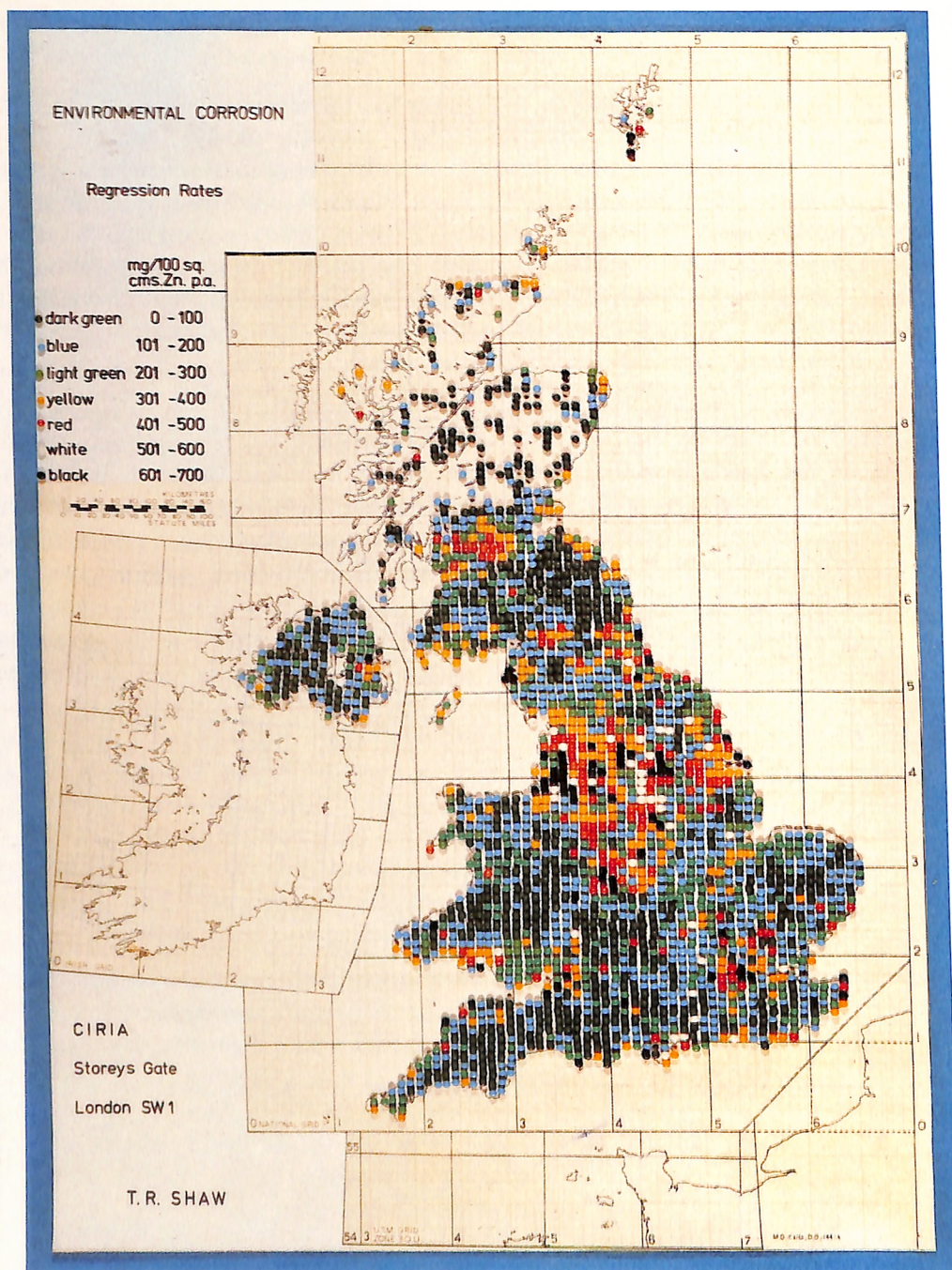


Figura 1. — Reproducción del mapa de corrosividad atmosférica del Reino Unido confeccionado por C.I.R.I.A.
Cada punto indica el nivel medio de corrosión del cinc dentro de un área de $10 \times 10 \text{ km}^2$.
Los diferentes niveles se distinguen por el color de los puntos.

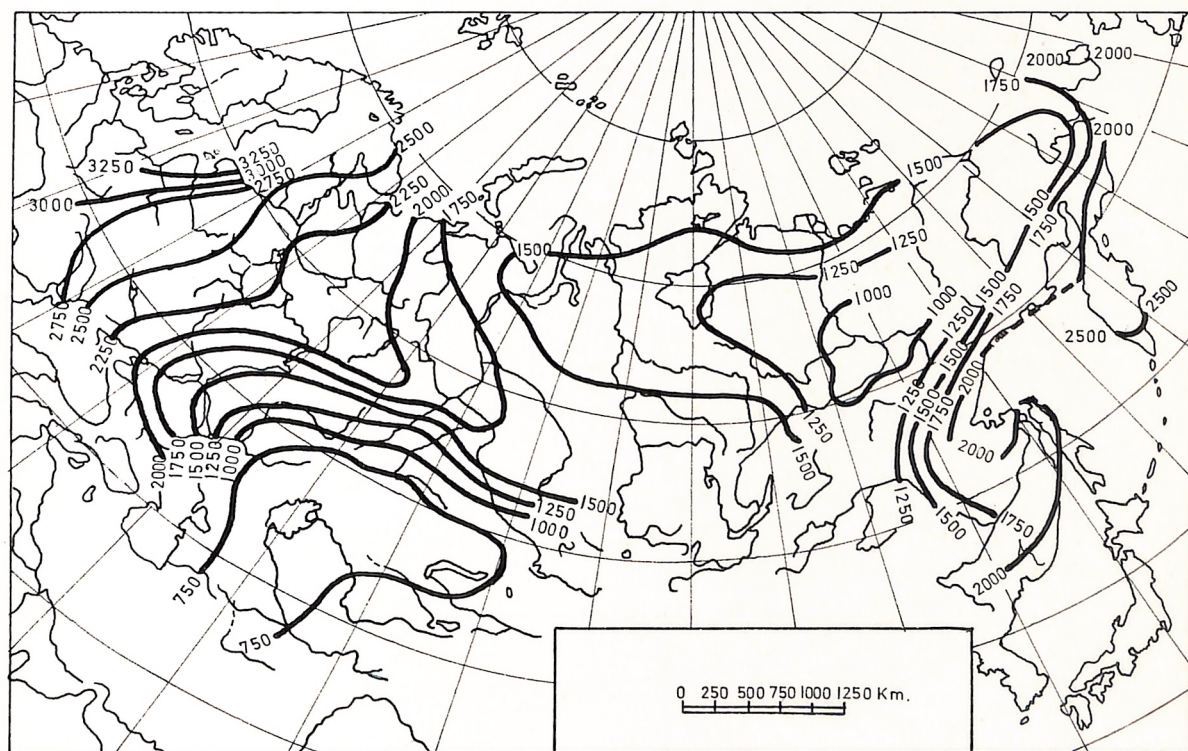


Figura 2. — Mapa de la Unión Soviética, en el que se representa la humectación de las superficies metálicas: isolinneas del tiempo anual (en horas) durante el cual una película de humedad permanece sobre la superficie del metal (según Golubev y Kadyrov [7]).

I. 4. Criterios adoptados para la confección del mapa de corrosividad de Cataluña y Baleares

Se ha renunciado a la idea de calibrar de modo directo la corrosividad de las atmósferas de Cataluña y Baleares, por exigir este planteamiento la instalación de muchos cientos, tal vez, miles, de estaciones de ensayo, labor que rebasa con creces las posibilidades experimentales del equipo investigador.

Por ello, el esfuerzo se ha centrado en medir la corrosividad atmosférica en una serie limitada de puntos, con la esperanza de llegar a generalizaciones que permitan formarse una idea acerca de los niveles de corrosión previsibles a lo largo y ancho de toda la geografía de Cataluña y parte de Baleares. Se ha considerado oportuno analizar por separado los efectos puramente meteorológicos y los de contaminación, y asociarlos después en la elaboración de las cifras finales de corrosión. O sea, el tratamiento dado al problema coincide con el antedicho método B para la confección de los mapas de corrosividad.

II. REALIZACION DEL MAPA DE CORROSIDAD

II. 1. Metales ensayados

Los materiales utilizados en el ensayo han sido los metales de mayor uso industrial, cuya preservación de la corrosión ha merecido y merece el máximo interés en todo el mundo. Estos metales son: el acero, el cinc, el cobre, y el aluminio. Ninguno de estos metales llevaba recubrimiento metálico ni ningún otro tipo de protección de su superficie, estando ésta completamente desnuda.

Correspondía cada tipo de metal al habitualmente presente en el mercado, con unas características de composición química, de estructura metalográfica y de propiedades mecánicas que se exponen más adelante.

II. 2. Procedimiento operatorio

Para la elaboración del mapa de corrosividad de Cataluña-Baleares se ha dispuesto de una serie de estaciones de corrosión distribuidas en toda esa área geográfica. En la *figura 4* se señala la distribución de todas estas estaciones en que se ha realizado la investigación.

El número de estas estaciones ha sido de 16, abarcando todo el espectro ambiental del área geográfica citada.

En cada una de estas estaciones han sido expuestas probetas de los metales citados: acero, cinc, cobre y aluminio, poseyendo forma rectangular y una superficie total de 80 cm² aproximadamente cada una.

Para su identificación (8), cada probeta llevaba una serie de muescas, como puede observarse en la *Fig. 5*, en que se muestra una de esas probetas.

Cada una de las probetas de cada uno de los materiales citados, antes de ser expuestas a la correspondiente atmósfera en cada estación, se sometieron a un tratamiento de decapado y desengrasado y fueron pesadas en balanza de precisión analítica, con objeto de conocer su peso exacto. Al cabo de un año de exposición, cada una de estas probetas se retiró de la estación de ensayo, se limpió de productos de corrosión mediante tratamiento en disoluciones especiales que disuelven esos productos y respetan el metal y se volvió a pesar. La diferencia de peso observada proporcionó el dato «pérdida de peso por corrosión» y a partir de este dato, y por medio de la densidad del metal correspondiente, se calculó el desgaste medio, expresándolo en micras o micrómetros (μm).

Para la exposición a la correspondiente atmósfera, las probetas se colocaron en unos pupitres especiales, uno de los cuales se muestra en la *Fig. 6*, sujetándolas mediante

unos ganchos roscados de aluminio o de acero inoxidable, según los casos.

Con objeto de aislar la probeta del gancho de sujeción metálico, la unión gancho-probeta se efectuó por medio de un sistema de arandelas de nylon o polietileno, como se muestra en la *Fig. 7*.

Siendo primordial el conocer la concentración del SO_2 y de los cloruros presentes en cada una de las atmósferas estudiadas, se establecieron procedimientos para la determinación de cada uno de estos contaminantes.

Para determinar la contaminación por anhídrido sulfuroso se colocaron en todas las estaciones cilindros para la captación de este gas sobre pasta de dióxido de plomo, la cual lo transforma y fija como sulfato (9). Estos cilindros iban dispuestos en el interior de casetas del tipo utilizado para las medidas meteorológicas, con libre circulación de aire, como se observa en la *Fig. 8*. Durante el período en que se realizaron estos ensayos, cada mes se sustituyó el captador y se analizó el contenido en sulfato presente en el mismo, dándose el resultado en $\text{mg SO}_3/\text{dm}^2$ día.

Para determinar el contenido en cloruros de la atmósfera se recurrió a captadores especiales de acero inoxidable, consistente cada uno en una chapa rectangular ligeramente doblada en ángulo (*Fig. 9*), diseñada así para que el agua de lluvia y, a falta de ésta, el agua destilada de un frasco lavador, transporte las partículas salinas depositadas sobre la superficie del captador hacia el interior de un matraz, al que está unido mediante un tubo de goma (10). Cada mes se valoraron químicamente los cloruros presentes en la muestra de agua recogida, dándose el resultado en $\text{mg Na Cl}/\text{dm}^2$ día.

Datos meteorológicos de interés desde el punto de vista de la corrosión metálica son los de humedad relativa (HR), temperatura y lluvia. Puesto que las estaciones de corrosión no contaron por lo general con termohigrógrafos y pluviómetros, se recurrió a los datos del Instituto Nacional de Meteorología, el cual dispone de una extensa red de estaciones meteorológicas repartidas por toda la región catalano-balear. Aunque el emplazamiento de las estaciones meteorológicas no ha coincidido exactamente con el de las estaciones de corrosión, han estado situadas lo bastante cerca de éstas para suponer que sus datos les pueden ser también aplicables, al menos en una primera aproximación.



Figura 4. — Mapa de Cataluña y Baleares donde puede observarse la situación de las estaciones de corrosión utilizadas en la presente investigación.

unos ganchos roscados de aluminio o de acero inoxidable, según los casos.

Con objeto de aislar la probeta del gancho de sujeción metálico, la unión gancho-probeta se efectuó por medio de un sistema de arandelas de nylon o polietileno, como se muestra en la *Fig. 7*.

Siendo primordial el conocer la concentración del SO_2 y de los cloruros presentes en cada una de las atmósferas estudiadas, se establecieron procedimientos para la determinación de cada uno de estos contaminantes.

Para determinar la contaminación por anhídrido sulfuroso se colocaron en todas las estaciones cilindros para la captación de este gas sobre pasta de dióxido de plomo, la cual lo transforma y fija como sulfato (9). Estos cilindros iban dispuestos en el interior de casetas del tipo utilizado para las medidas meteorológicas, con libre circulación de aire, como se observa en la *Fig. 8*. Durante el período en que se realizaron estos ensayos, cada mes se sustituyó el captador y se analizó el contenido en sulfato presente en el mismo, dándose el resultado en $\text{mg SO}_3/\text{dm}^2$ día.

Para determinar el contenido en cloruros de la atmósfera se recurrió a captadores especiales de acero inoxidable, consistente cada uno en una chapa rectangular ligeramente doblada en ángulo (*Fig. 9*), diseñada así para que el agua de lluvia y, a falta de ésta, el agua destilada de un frasco lavador, transporte las partículas salinas depositadas sobre la superficie del captador hacia el interior de un matraz, al que está unido mediante un tubo de goma (10). Cada mes se valoraron químicamente los cloruros presentes en la muestra de agua recogida, dándose el resultado en $\text{mg Na Cl}/\text{dm}^2$ día.

Datos meteorológicos de interés desde el punto de vista de la corrosión metálica son los de humedad relativa (HR), temperatura y lluvia. Puesto que las estaciones de corrosión no contaron por lo general con termohigrógrafos y pluviómetros, se recurrió a los datos del Instituto Nacional de Meteorología, el cual dispone de una extensa red de estaciones meteorológicas repartidas por toda la región catalano-balear. Aunque el emplazamiento de las estaciones meteorológicas no ha coincidido exactamente con el de las estaciones de corrosión, han estado situadas lo bastante cerca de éstas para suponer que sus datos les pueden ser también aplicables, al menos en una primera aproximación.

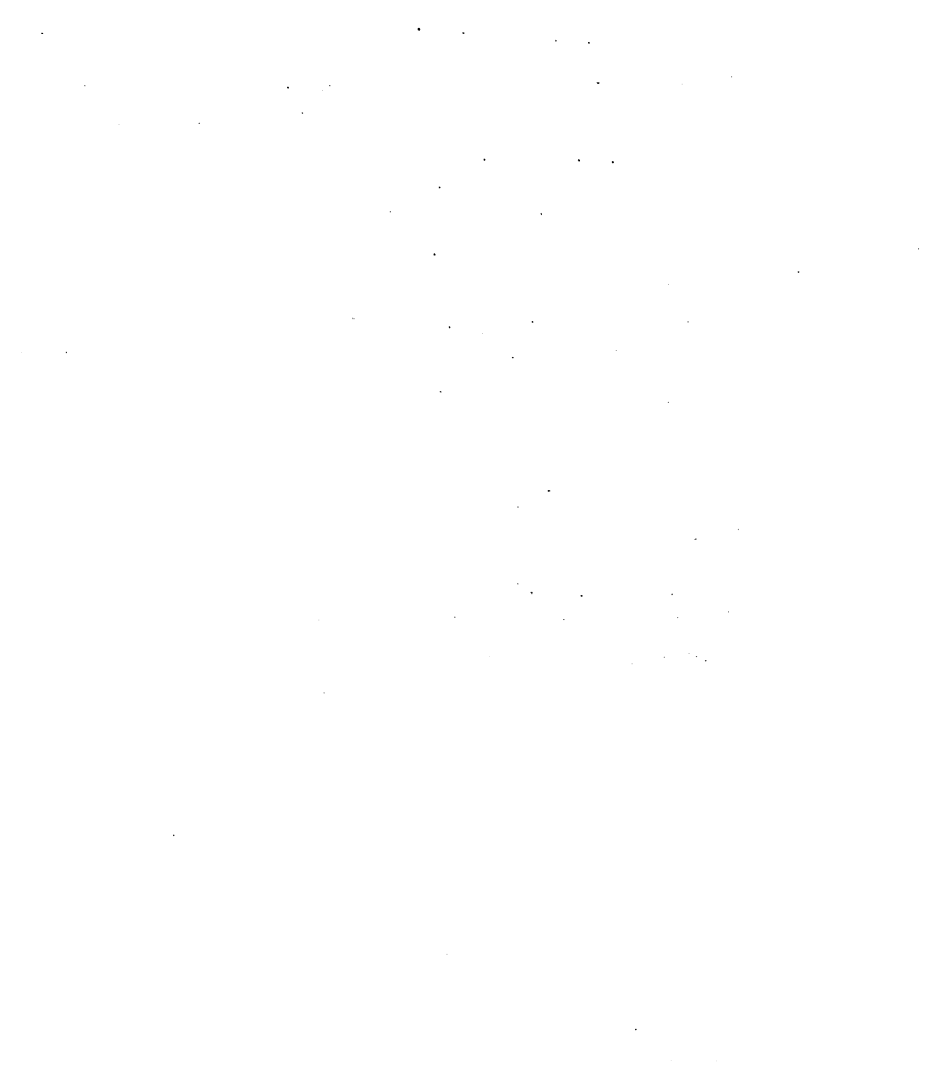
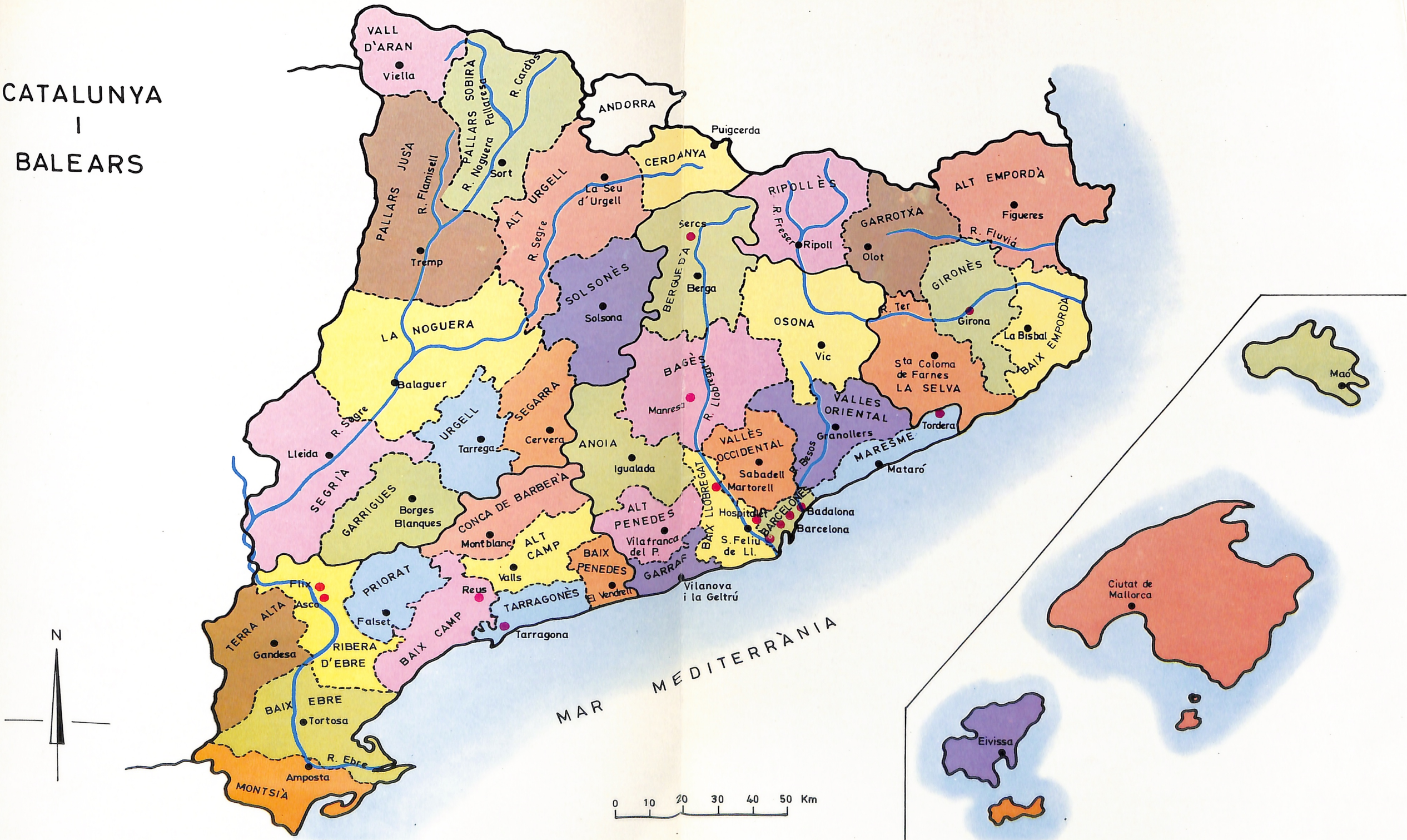
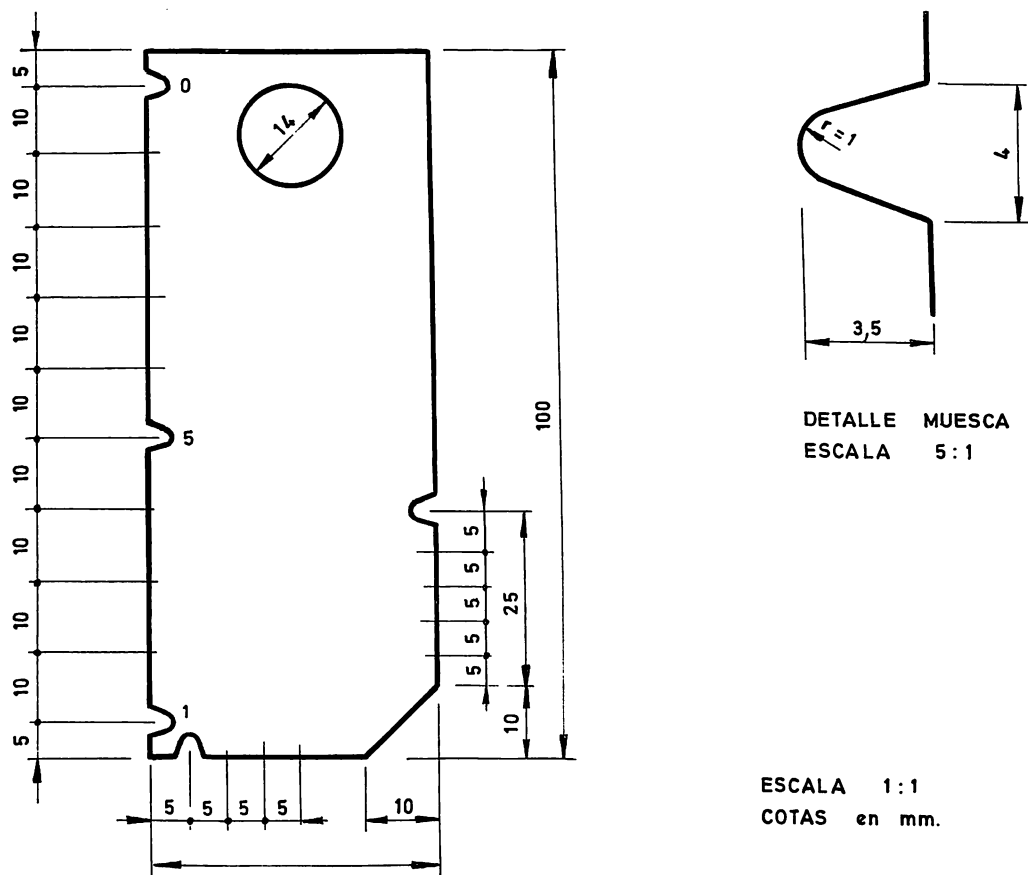


Figura 4. — Mapa de Cataluña y Baleares donde puede observarse la situación de las estaciones de corrosión utilizadas en la presente investigación.

CATALUNYA
I
BALEARS





El código para la interpretación de las señalizaciones marcadas en cada probeta es el siguiente:

Señales lado derecho: Indican el tipo de probeta. Hay cuatro y por tanto cada probeta lleva una muesca a distinta distancia del borde inferior, separadas 5 mm.

Señales lado izquierdo: A 5 mm del borde inferior se inicia la situación de las muescas, que a distancias de 10 mm indican el número de la EC.

Señales borde inferior: Indican la zona geográfica donde están situadas las EC. Sólo hay cuatro zonas previstas y según éstas la muesca se realizará a 5, 10, 15 ó 20 mm del borde izquierdo. A la Zona Catalano-Balear le corresponde la primera muesca, a 5 mm de dicho borde.

Figura 5. — Tipo de probeta utilizada en la investigación.

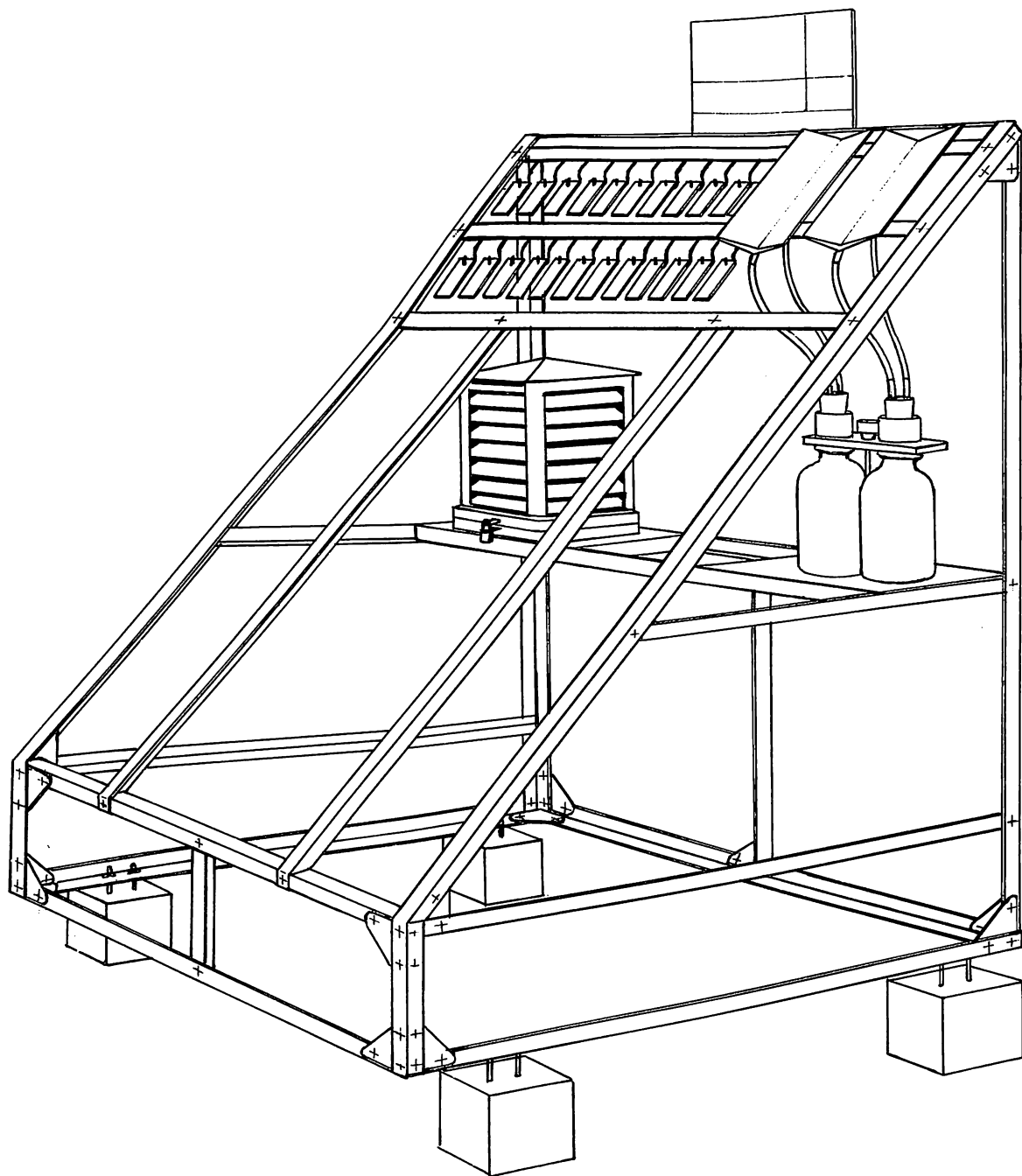
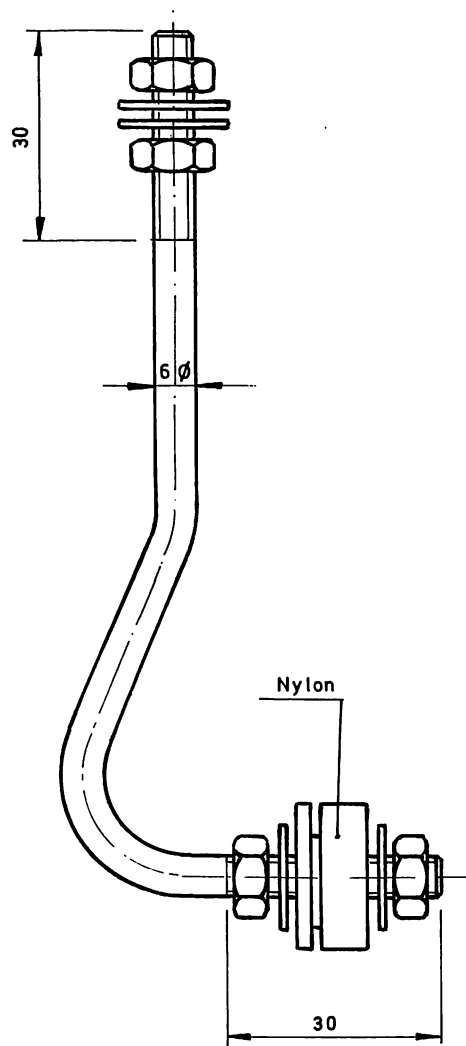


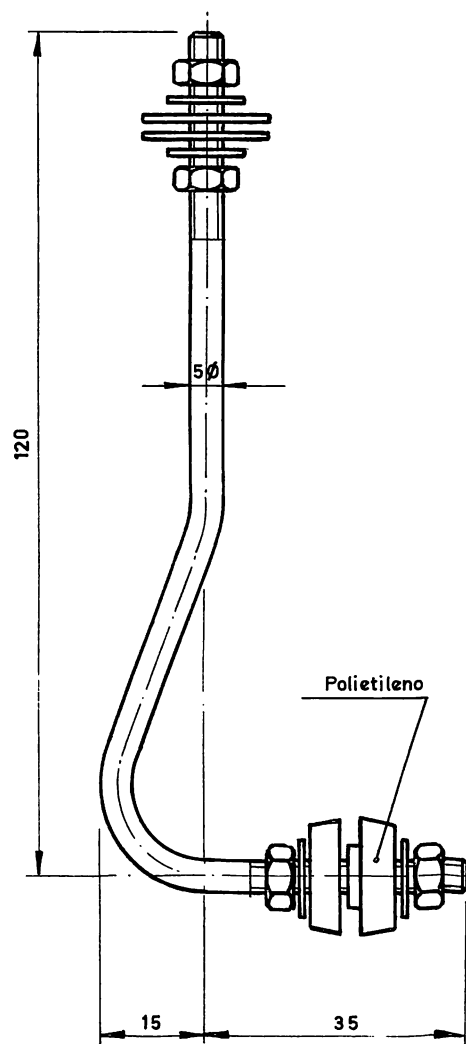
Figura 6. — Pupitre de exposición de probetas a la atmósfera.

SOPORTE CENIM



MATERIAL: Aluminio

SOPORTE FECSA



MATERIAL: Acero inox. 18.8.2
COTAS en mm.
ESCALA 1:1

Figura 7. — Dispositivo de sujeción de probetas al pupitre de exposición.

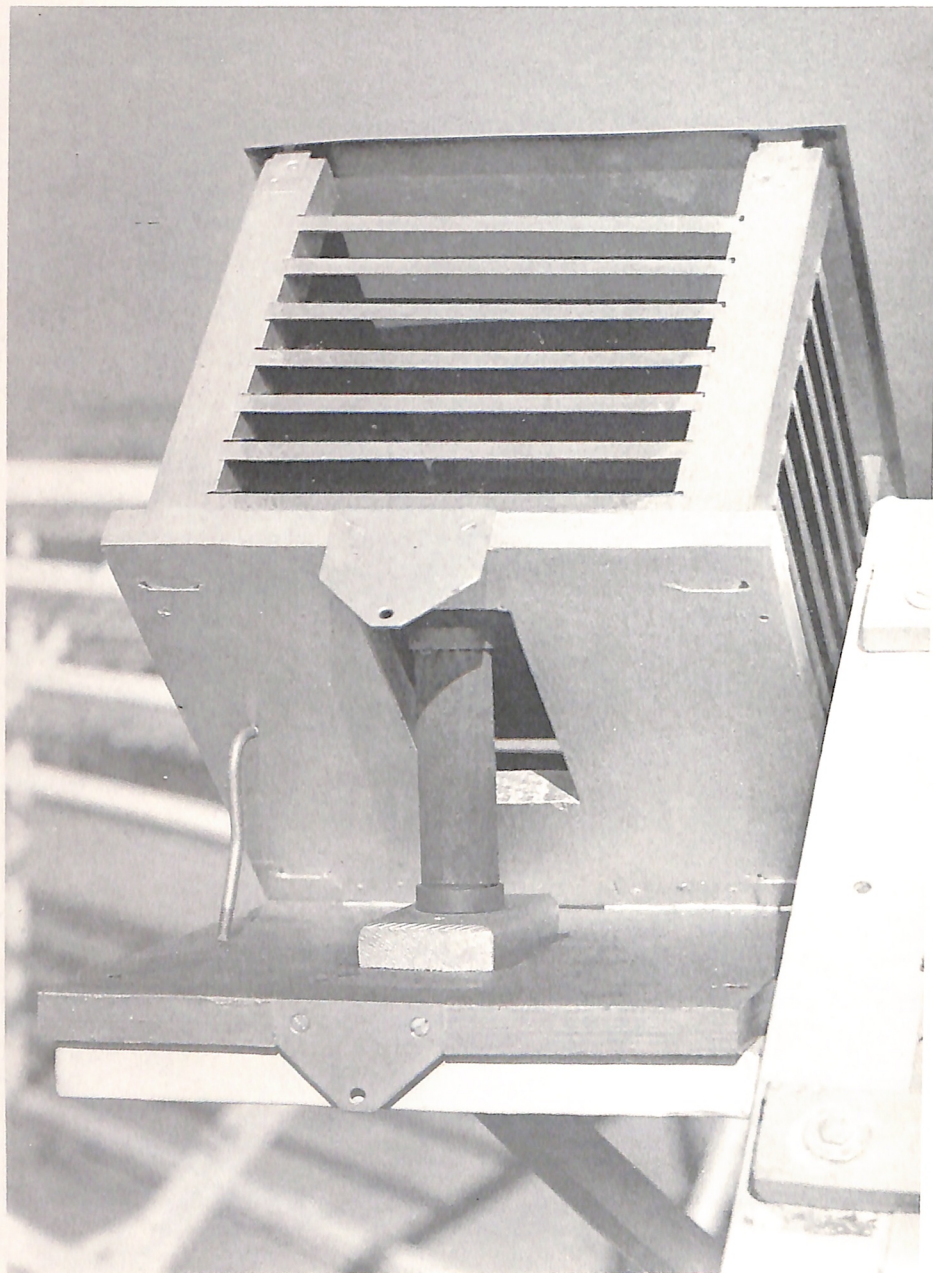


Figura 8. — Cilindro captador de SO_2 dentro de una caseta de tipo meteorológico, antes de cerrar.
(Norma BS, 1747, Parte 4, 1963).



Figura 9. — Probeta captadora de cloruros (partículas salinas de la atmósfera) tipo Hache.

II. 3. Características de los materiales metálicos ensayados

Es un hecho, comprobado a menudo, que la composición química de los materiales, en cuanto a impurezas y a algunos elementos aleantes habitualmente contenidos en ellos, no ejerce más que una influencia secundaria en la corrosión atmosférica. Este efecto es menos marcado, por lo general, que el de las condiciones ambientales. Este es el caso de los materiales acero, cinc, cobre y aluminio, en que el dato de corrosión varía relativamente poco con los cambios de composición, con desviaciones, por tal motivo, que no superan frecuentemente el diez por ciento. Caso muy distinto es cuando a esos materiales se añaden deliberadamente ciertos elementos aleantes con el fin expreso de aumentar las características anticorrosivas del material, como ocurre, por ejemplo, en la fabricación de los aceros patinables o aceros inoxidable.

Igualmente, debe considerarse pequeña o prácticamente despreciable la intervención de los parámetros estructurales (estructura metalográfica), dentro de los márgenes de variación corriente de éstos, en el establecimiento de los datos de la corrosión natural en la atmósfera de los cuatro materiales metálicos antes mencionados.

Tampoco la dureza en sí, u otras propiedades mecánicas, como pueden ser la resistencia a la tracción, límite elástico, alargamiento, etc., demuestran tener, en general, una influencia apreciable en los ensayos comunes de corrosión natural llevados a cabo en la atmósfera.

Aun así, se considera oportuno dar aquí algunas referencias acerca del tipo de acero, cinc, cobre y aluminio empleados en este estudio, que permiten su caracterización, aun cuando sea incompleta.

Con este propósito en la *Tabla I* se incluye la composición química de los mencionados materiales, y en la *Tabla II* se da información sobre el grado de dureza de las planchas metálicas de las que se cortaron las probetas metálicas sometidas a la acción atmosférica.

Finalmente, en la serie de fotografías de las *Figs. 10-13* se presentan las estructuras metalográficas, a 200 aumentos, de las secciones transversal y longitudinal de cada material, donde es posible observar la forma de los granos cristalinos e inclusiones, y la influencia de la dirección de la laminación.

TABLA I. Composición de los materiales utilizados

%	Acero	Cinc	Cobre	Aluminio
C	0,042	---	---	---
P	≤ 0,02	---	---	---
Si	≤ 0,05	---	---	0,175
Mn	0,34	---	---	0,020
S	≤ 0,02	---	---	---
Cr	≤ 0,05	---	---	---
Ni	≤ 0,05	---	---	---
Al	---	---	0,10	resto
Sn	---	≤ 0,001	0,10	---
Zn	---	resto	0,002	0,024
Pb	---	0,36	0,01	---
Fe	resto	0,015	0,02	0,48
Cu	≤ 0,05	0,0007	resto	0,006
Cd	---	0,007	---	---
Mg	---	---	---	0,014

TABLA II. Valores medios de dureza Brinell de la superficie de las probetas empleadas en el estudio

Material metálico	Dureza Brinell	Condiciones del ensayo de dureza
Acero	98	HB 187,5/2,5
Cinc	65	HB 62,5/2,5
Cobre	44	HB 62,5/2,5
Aluminio	43	HB 62,5/2,5

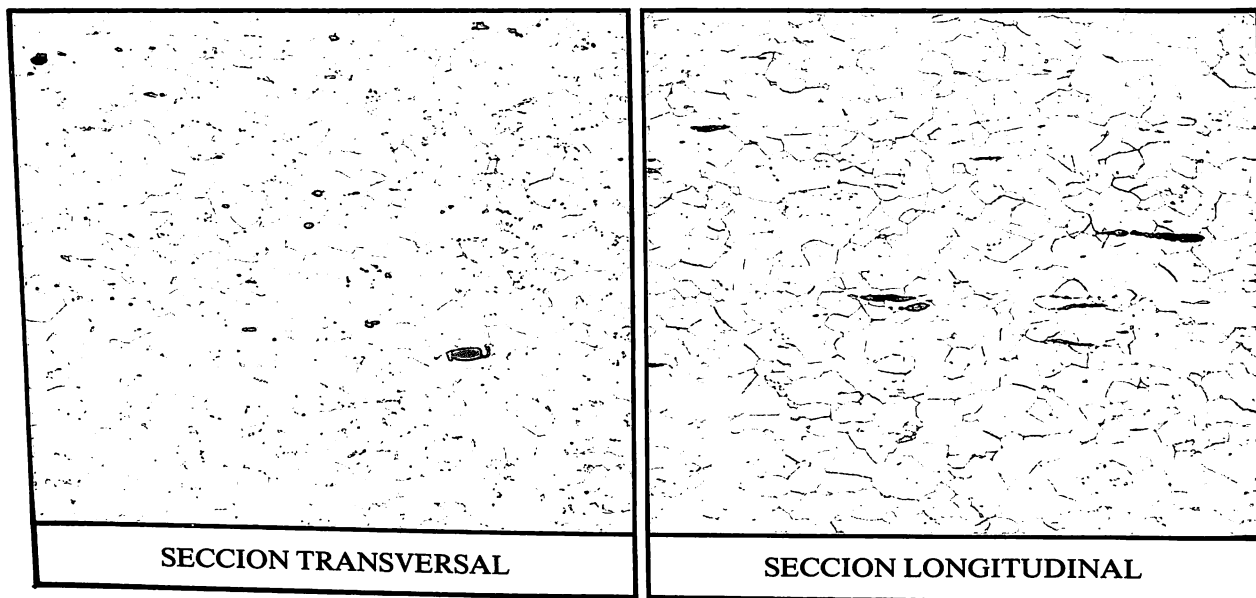


Figura 10. — Microestructura típica correspondiente a las probetas de acero ($\times 200$).

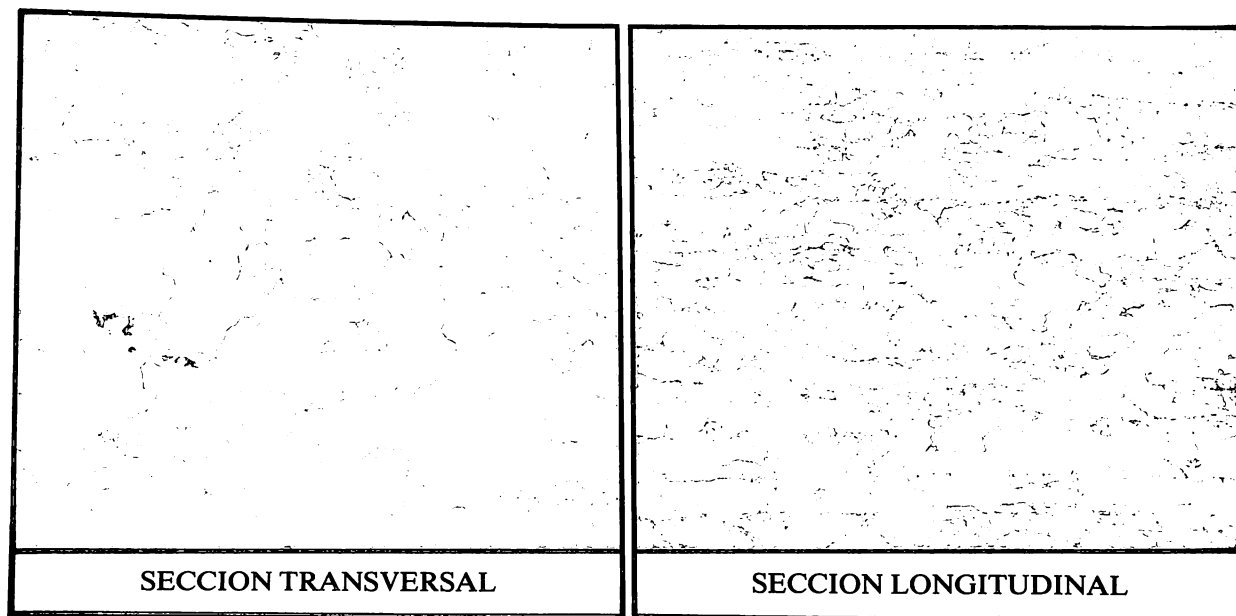


Figura 11. — Microestructura típica correspondiente a las probetas de cinc ($\times 200$).

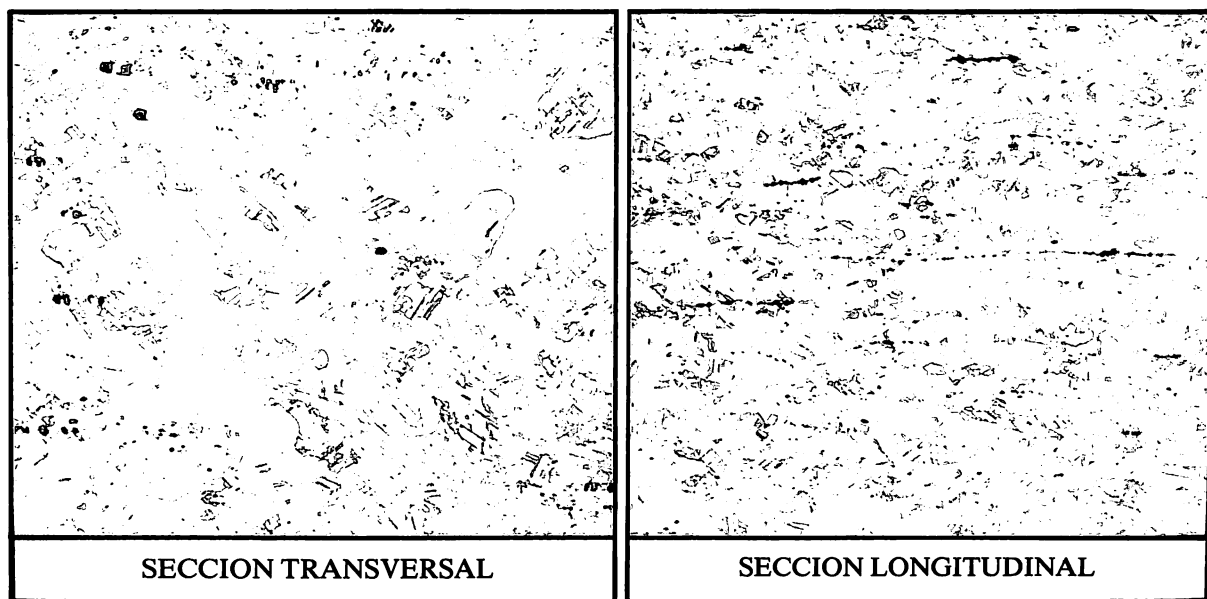


Figura 12. — Microestructura típica correspondiente a las probetas de cobre ($\times 200$).

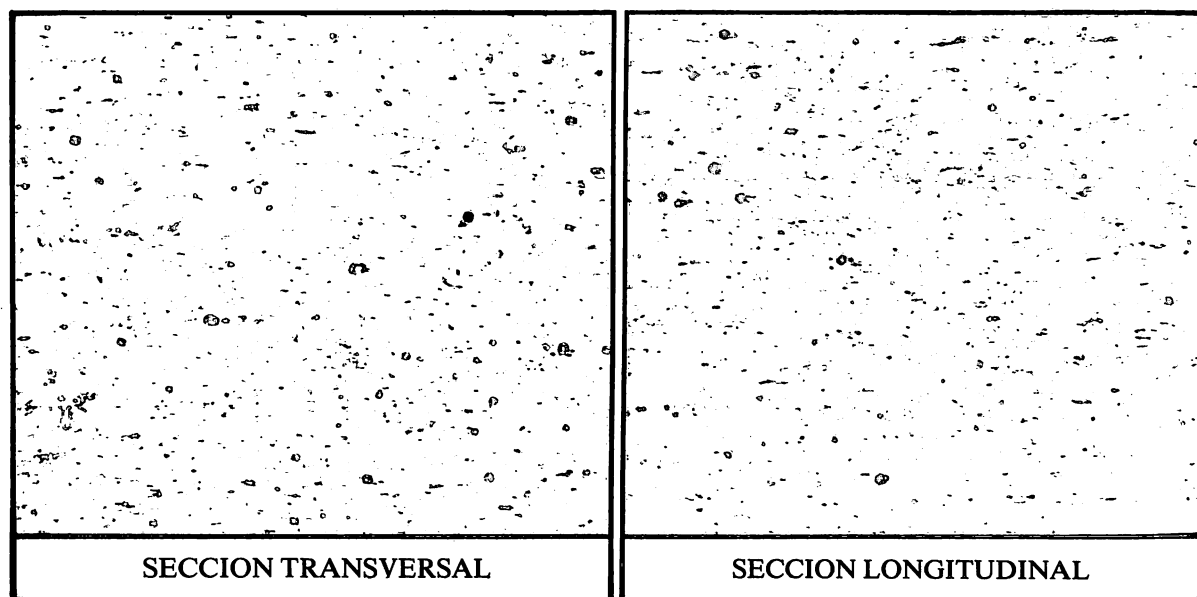


Figura 13. — Microestructura típica correspondiente a las probetas de aluminio ($\times 200$).

II. 4. Estaciones de corrosión y su entorno

En orden a una mejor definición de la zona donde está ubicada cada estación experimental de corrosión y, por tanto, mejor interpretación de los resultados en ellas obtenidos, se ofrece, a continuación, información adicional sobre su entorno y sobre fuentes de posible contaminación existentes en las cercanías de cada estación, que pueden haber influido en la corrosividad detectada.

Estación de Ascó (FECSA). Está situada esta estación en la prov. de Tarragona cerca de una planta nuclear, en zona con bosques y río Ebro.

Estación de Badalona-San Adrián (FECSA). Está situada esta estación a unos 50 m del mar, cerca de un complejo industrial (fábricas de pinturas, productos químicos, etc.). A escasa distancia, existe una tubería de purga de central térmica y colectores por los que discurre agua caliente exhalando vapor, a cielo abierto.

Estación de Barcelona (FECSA). Se halla situada esta estación a unos 600 m del mar. Cerca de ella existen: central térmica en servicio, quemando fueloil, y avenida urbana intensamente transitada.

Estación de Barcelona-Sagrera (ENASA). Esta estación está situada en el casco circundante de Barcelona. En los alrededores existe una industria de colorantes y explosivos.

Estación de Flix (FECSA). Esta estación está situada en la prov. de Tarragona. A 600 m de la estación existe una industria electroquímica.

Estación de Gerona (FECSA). Esta estación está situada en el casco de la ciudad, y lindante con dos carreteras de intenso tráfico. A cierta distancia existe una fábrica de productos químicos.

Estación de Hospitalet de Llobregat (FECSA). Esta estación está situada a 1700 m del mar. A unos 1000 m existe una fábrica de ácido sulfúrico. También existen cercanos a la estación fábricas de productos químicos, pinturas y detergentes.

Estación de Hospitalet de Llobregat (FEMSA). Esta estación está situada en esta localidad cercana a Barcelona y, prácticamente, no es previsible que exista más contaminación que la del SO_2 .

Estación de Manresa (FECSA). Esta situación está situada en la prov. de Barcelona y a menos de 50 m existe una carretera fuertemente transitada. Más lejos, está ubicada una fábrica de productos químicos para la industria.

Estación de Martorell (SOLVAY). Esta estación está situada en la prov. de Barcelona en los alrededores de la localidad de Martorell y ubicada dentro de un complejo industrial de tipo químico, a unos 150 metros del río Llobregat.

Estaciones de Palma de Mallorca (GESA). Una de estas estaciones está situada en la fábrica de gas. No existen otras industrias a su alrededor. Una de las estaciones se halla a unos 500 m del mar y la otra, más alejada de la fábrica de gas, a unos 50 m del mar.

Estación de Reus (FECSA). Esta estación está situada en la prov. de Tarragona. A cierta distancia de la estación existe una fábrica de cerámica.

Estación de Sercs (FECSA). Esta estación está situada en la prov. de Barcelona. Cerca a ella existe una torre de refrigeración (a menos de 50 m), y una fábrica de cemento, además de escombreras apagadas y otras en ignición.

Estación de Tarragona (FECSA). Esta estación está situada a 1800 m del mar y a 200 m de una carretera intensamente transitada. En la vecindad de la zona existen numerosas fábricas de productos químicos.

Estación de Tordera (FECSA). Esta estación está situada en la prov. de Barcelona, a menos de 50 m de la carretera nacional. Más lejos existen urbanización y fábricas de tejidos.

II. 5. Datos de corrosión, de contaminación y metereológicos

En las *Tablas III* y *IV* se exponen los datos de corrosión para el acero, cinc, cobre y aluminio obtenidos a lo largo de esta investigación. Los datos corresponden a dos periodos independientes de 1 año de exposición cada uno. En la primera columna se detalla el emplazamiento de la estación de corrosión y en las otras los datos de corrosión correspondientes a los periodos 1977-78 y 1978-79.

Para el acero, cinc y cobre las corrosiones en las *Tablas III* y *IV* se dan en micras (o micrometros) de desgaste medio. Sin embargo, al hacer uso de los datos de corrosión, tendrá que tenerse en cuenta que la corrosión no avanza de modo completamente uniforme por todos los puntos de la superficie metálica, no siendo raro encontrar puntos donde el desgaste es hasta tres veces mayor que el desgaste medio; esta posibilidad no debe olvidarse al tratar de predecir la vida, por ejemplo, de un recubrimiento metálico.

Mucho más exagerado es el caso del aluminio, cuyo ataque con formación de picaduras afecta a zonas muy localizadas de su superficie, en tanto que la mayor parte de ella apenas si sufre acción alguna; con este metal el concepto de desgaste medio pierde sentido práctico, por lo que se ha preferido expresar la corrosión del aluminio a través de la pérdida de peso por unidad de superficie (mg/dm^2) (*Tabla IV*).

TABLA III. Datos experimentales de corrosión anual para el acero suave y el cinc, para los dos periodos de exposición: Nov. 1977-Nov. 1978 y Dic. 1978-Dic. 1979

ESTACION	CORROSION ANUAL			
	ACERO (μm)		CINC (μm)	
	1977-78	1978-79	1977-78	1978-79
Ascó (FECSA)	---	23,1 (10 meses)	---	0,72 (10 meses)
Badalona-San Adrián (FECSA)	66,5	65,4	8,53	8,70
Barcelona (FECSA)	36,2	42,1	1,73	1,31
Barcelona-Sagrera (ENASA)	40,4	35,6	2,16	1,19
Flix (FECSA)	56,2	58,1	2,77	2,24
Gerona (FECSA)	38,2	39,6	2,20	1,26
Hospitalet (FECSA)	56,7	58,8	1,69	1,57
Hospitalet (FEMSA)	33,6	30,2 (8 meses)	1,97	1,05 (8 meses)
Manresa (FECSA)	32,7	29,8	1,64	0,88
Martorell (SOLVAY)	---	47,6 (10 meses)	---	2,65 (10 meses)
Palma de Mallorca, 50 m del mar (GESA)	17,7 (6 meses)	---	1,36 (6 meses)	---
Palma de Mallorca, 500 m del mar (GESA)	18,8 (6 meses)	---	1,58 (6 meses)	---
Reus (FECSA)	24,1	26,2	1,51	1,55
Sercs (FECSA)	38,7	---	1,44	---
Tarragona (FECSA)	38,9	38,3	1,36	1,30
Tordera (FECSA)	43,6	44,6	2,69	1,47

TABLA IV. Datos experimentales de corrosión anual para el cobre y el aluminio, para los dos periodos de exposición: Nov. 1977-Nov. 1978 y Dic. 1978-Dic. 1979

ESTACION	CORROSION ANUAL			
	COBRE (μm)		ALUMINIO (μm)	
	1977-78	1978-79	1977-78	1978-79
Ascó (FECSA)	—	0,97 (10 meses)	—	6,7 (10 meses)
Badalona-San Adrián (FECSA)	5,59	5,23	195,8	182,0
Barcelona (FECSA)	1,22	1,64	12,8	26,2
Barcelona-Sagrera (ENASA)	1,15	1,36	6,7	8,8
Flix (FECSA)	1,22	1,16	28,3	33,3
Gerona (FECSA)	0,81	0,95	3,2	3,3
Hospitalet (FECSA)	1,64	2,38	10,8	16,8
Hospitalet (FEMSA)	1,08	1,17 (8 meses)	1,6	4,3 (8 meses)
Manresa (FECSA)	0,89	0,72	1,9	5,5
Martorell (SOLVAY)	—	2,14 (10 meses)	—	70,5 (10 meses)
Palma de Mallorca, 50 m del mar (GESA)	1,26 (6 meses)	—	7,7 (6 meses)	35,2
Reus (FECSA)	0,54	0,86	0,79	1,8
Serco (FECSA)	3,19	—	2,9	—
Tarragona (FECSA)	0,87	1,14	7,3	8,8
Tordera (FECSA)	1,14	1,38	3,8	7,0

TABLA V. Datos medios anuales de contaminación (por SO₂ y cloruros). La contaminación por SO₂ se expresa en mg SO₃/dm² día y la contaminación por cloruros en mg NaCl/dm² día

ESTACION	CONTAMINACION			
	mg SO ₃ /dm ² día		mg NaCl/dm ² día	
	1977-78	1978-79	1977-78	1978-79
Ascó (FECSA)	---	0,08 (8 meses)	---	0,087 (8 meses)
Badalona-San Adrián (FECSA)	0,72	0,56	0,98	1,05
Barcelona (FECSA)	0,48	0,44	0,14	0,19
Barcelona-Sagrera (ENASA)	0,57	0,48	0,062	0,058
Flix (FECSA)	0,20	0,17	0,059	0,051
Gerona (FECSA)	0,20	0,19	0,057	0,057
Hospitalet (FECSA)	1,06	0,67	0,086	0,13
Hospitalet (FEMSA)	0,44	0,28	0,13	0,18
Manresa (FECSA)	0,24	0,21	0,057	0,067
Martorell (SOLVAY)	---	0,34 (8 meses)	---	0,66 (8 meses)
Palma de Mallorca, 50 m del mar (GESA)	---	---	1,10 (2 meses)	1,70
Palma de Mallorca, 500 m del mar (GESA)	---	---	0,30 (2 meses)	0,46
Reus (FECSA)	0,08	0,07	0,056	0,039
Sercs (FECSA)	1,08	0,55	0,054	0,28
Tarragona (FECSA)	0,29	0,22	0,080	0,14
Tordera (FECSA)	0,17	0,16	0,052	0,057

En la *Tabla V*, se presentan los datos de contaminación atmosférica por anhídrido sulfuroso y por cloruros obtenidos en cada una de las estaciones de ensayo. Cabe hacer observar que los niveles de contaminación por cloruros alcanzan cifras significativas sólo en puntos muy cercanos al mar, lo cual es perfectamente lógico.

Las estimaciones de tiempos de humectación se han basado en los datos de HR, cuando existe un registro continuo de esta variable, y en datos pluviométricos (*Tabla VI*). Realmente los datos pluviométricos suelen ser los únicos disponibles cuando se trata de estaciones rurales. Las deducciones a partir de ellos adolecen de una mayor imprecisión que a partir de la HR.

TABLA VI. Datos meteorológicos correspondientes al período anual Nov. 77-Nov. 78

Estación meteorológica y N.º del I.N.M.	Correspondencia con estación de corrosión situada en:	N.º de días de precipitación	Precipitación (mm)	Estimación de tiempo de humectación: N.º de horas con HR \geq 85 % y tempe- raturas $> 0^{\circ}$ C
Ascó (953-E)	Ascó	76	287	2900
Badalona (234)	Badalona	59	483	2950
Barcelona (201)	Barcelona	117	499	3600
Flix (951 A)	Flix	59	284	2800
Gerona (370)	Gerona	116	758	3400
Hospitalet (199)	Hospitalet	88	500	3000
Manresa (149) (148)	Manresa	88 81	370 387	2900
Rubi (190) Gelida (185) Corbera de Ll. (188) La Palma Cer. (194)	Martorell	92 100 84 76	542 585 610 733	2900
Palma de M. (B-228)	Palma de Mallorca	104	442	3200
Reus (016)	Reus	71	560	2900
La Pobla de L. (079) Figols (085) Berga (092)	Sercs	88 91 106	759 769 752	2900
Tarragona (042)	Tarragona	80	459	2900
Tordera (280)	Tordera	92	883	3000

III. DISCUSION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

III. 1. Estimación del tiempo de humectación

Se ha justificado antes la importancia de esta variable para establecer, de acuerdo con los criterios expuestos, el mapa de corrosión de Cataluña y Baleares. Desde luego, lo ideal sería conocer el tiempo de humectación a través de determinaciones directas, posiblemente con la ayuda de medidores del tipo de pila bimetálica (4). Otra posibilidad de estimación, aunque indirecta, podría ser por medio del número de horas en que la HR supera un determinado nivel (4).

En la zona geográfica catalano-balear apenas se poseen datos directos obtenidos con tales medidores bimetálicos. Tanto el relativamente elevado costo del equipo registrador como la necesidad de contar con tomas de corriente eléctrica y un emplazamiento seguro (bajo techo y con cierta vigilancia) reducen las posibilidades de una instalación masiva de tales medidores.

En cuanto al recurso indirecto de determinar el número de horas en que la HR supera un determinado nivel, técnica que obliga a la instalación de termohigrógrafos en los lugares de exposición, tampoco ofrece grandes posibilidades. Además del relativamente elevado precio unitario de estos equipos, necesitan de un continuo cuidado, por lo que tampoco se puede pensar en una instalación profusa de los mismos. No constituye tampoco una solución servirse de los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas dotadas de termohigrógrafos que el Instituto Meteorológico Nacional posee en la región geográfica catalano-balear, por el exiguo número de éstas.



Cabe también otro enfoque, aunque desgraciadamente no pase de ser una pobre aproximación, cual es el basarse en los datos de días de precipitación o de mililitros de agua caída, suministrados por la amplia red de estaciones pluviométricas del Instituto Meteorológico Nacional, que en la zona catalano-balear está integrada por más de 150 estaciones.

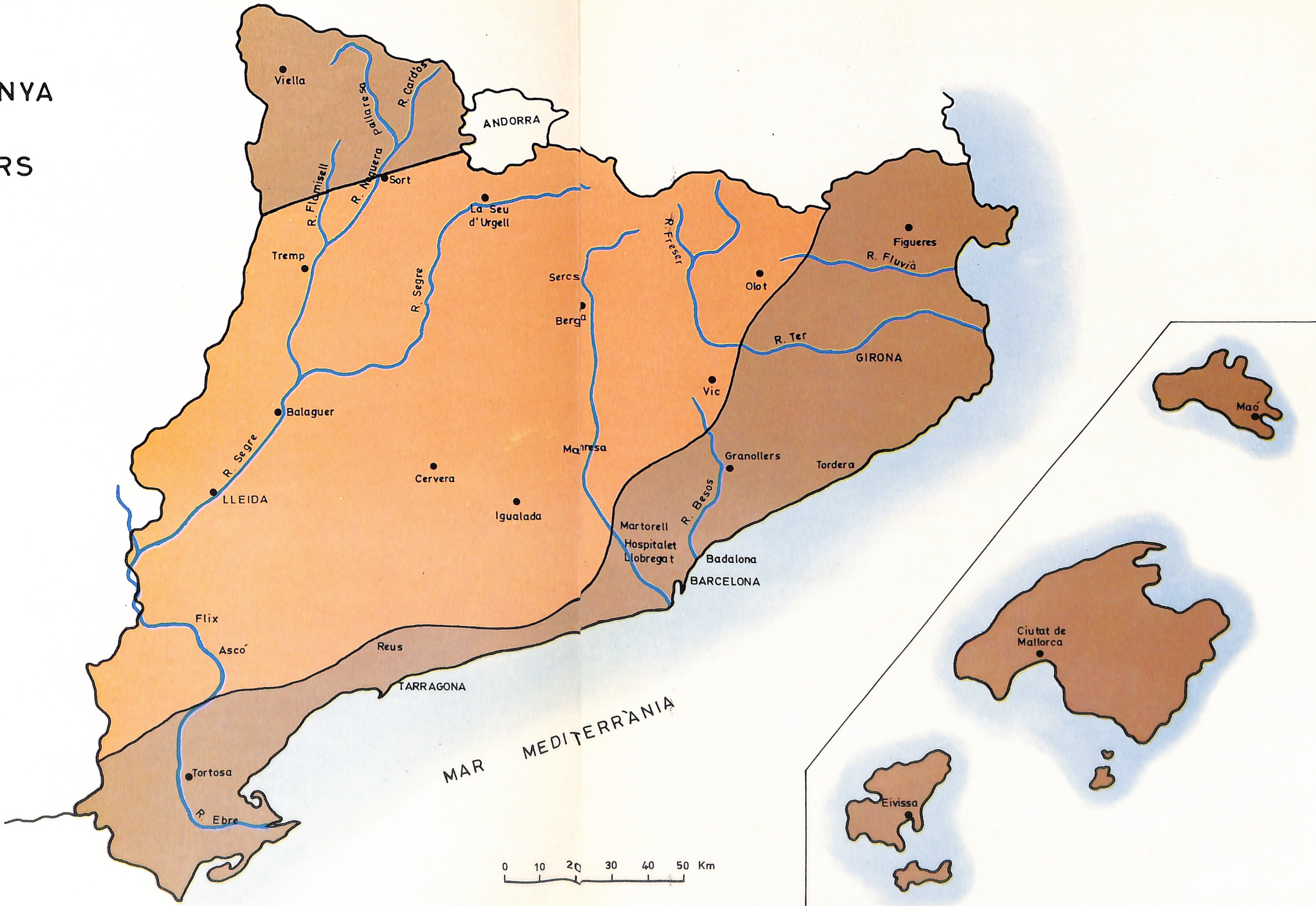
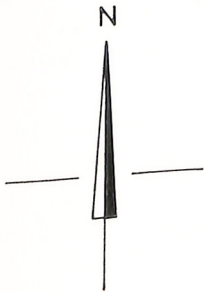
Con ese fin, se tuvo que comprobar primero la existencia de una correlación significativa entre los días de lluvia (o cantidad de lluvia recogida), y el tiempo de humectación. Respecto a este tiempo, se ha aceptado que el número de horas con $HR \geq 85 \%$ es un indicador del número de horas de humectación (4). Aunque la dispersión es grande, la regresión de horas al año con $HR \geq 85 \%$ sobre días anuales de lluvia ha dado un coeficiente de correlación muy significativo. Los mililitros de agua recogida se consideran peor indicador del tiempo de humectación que el número de días de precipitación, pues mientras unos pocos días de intenso temporal contribuyen más al volumen de agua recogida que numerosos días de lluvia ligera, los efectos corrosivos por día de precipitación son probablemente del mismo orden en uno y otro caso. Por ello, se ha utilizado exclusivamente la regresión sobre días anuales de lluvia, y no sobre ml de agua recogida.

Figura 14. — Mapa de Cataluña y Baleares mostrando las zonas con tendencia a dar los mayores y menores tiempos de humectación de las superficies metálicas. El número medio anual de horas con humedades relativas del 85 % o mayores es de:

Zona A ————— 2700 h
Zona B ————— 3070 h

CATALUNYA
I
BALEARS

-  ZONA A
-  ZONA B



El examen de los resultados experimentales obtenidos en la red de estaciones de corrosión de la *Fig. 4* ha puesto de manifiesto que:

1) Existen diferencias marcadas de corrosividad, perfectamente lógicas si se tiene en cuenta la fuerte dependencia de esa variable con los factores atmosféricos y, en particular, con los de contaminación.

2) No siempre las cifras de corrosión de los cuatro metales estudiados varían en el mismo sentido y de manera proporcional al pasar de uno a otro lugar de exposición, lo cual sugiere la intervención de contaminantes especiales, provenientes de industrias cercanas, con acción preferente sobre ciertos metales. Como ejemplos de resultados anómalos en comparación con los previsibles a partir exclusivamente de los niveles de contaminación por SO₂ y por cloruros cabe hacer notar las exageradamente altas corrosiones del aluminio y del cinc en Flix frente a las experimentadas por estos mismos metales en Hospitalet, o del cobre en Serchs, si se toman como referencia los datos obtenidos en Tarragona y Gerona. La información dada en Parte Experimental sobre fuentes de posible contaminación cercanas a los lugares de ubicación de las estaciones de ensayo puede resultar útil en orden a justificar cualitativamente algunas singularidades.

3) Aparte de estos casos excepcionales, la mayoría de los resultados se pueden interpretar satisfactoriamente en función de los niveles de contaminación por SO₂ y cloruros de cada lugar de exposición.

Respecto a este último punto, cabe decir que en anteriores investigaciones (5), se ha demostrado que la corrosión *C* sufrida por un metal puede expresarse de modo aproximado por el producto de los cuatro factores primarios siguientes:

$$C = M. t. f_r. f_c \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde *M* es el módulo de corrosión por 1000 horas de exposición en una atmósfera no contaminada con un nivel de H. R. ≥ 85 % y tem. $> 0^\circ \text{C}$, *t* es el tiempo (en miles de horas) durante el cual se cumplen estas condiciones a lo largo de un año, *f_r*, es un coeficiente de inhibición de la corrosión con el tiempo, y *f_c* es un coeficiente de exaltación de la corrosión con la contaminación atmosférica. Se ha admitido, igualmente, que para la corrosión del Fe, Zn y Cu, $f_c = 1 + \alpha + \beta$, donde el término α se relaciona con el nivel de SO₂ en la atmósfera y el β , con el de cloruros. En el caso del Al, se ha aceptado que $f_c = 1 + \alpha + \beta + \alpha\beta$. Los valores de *f_r*, α y β vienen dados en las *Figs. 15-18*. Los valores de *M* son 3,5 μm para el Fe, 0,40 μm para el Zn y para el Cu, y 0,50 μm^2 para el Al.

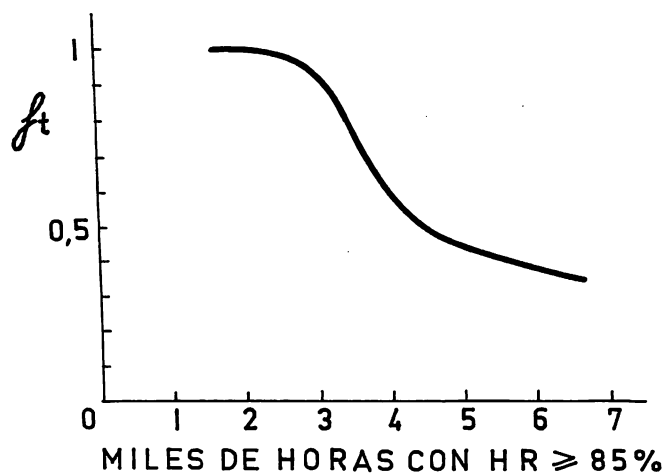
El examen de los resultados experimentales obtenidos en la red de estaciones de corrosión de la *Fig. 4* ha puesto de manifiesto que:

- 1) Existen diferencias marcadas de corrosividad, perfectamente lógicas si se tiene en cuenta la fuerte dependencia de esa variable con los factores atmosféricos y, en particular, con los de contaminación.
- 2) No siempre las cifras de corrosión de los cuatro metales estudiados varían en el mismo sentido y de manera proporcional al pasar de uno a otro lugar de exposición, lo cual sugiere la intervención de contaminantes especiales, provenientes de industrias cercanas, con acción preferente sobre ciertos metales. Como ejemplos de resultados anómalos en comparación con los previsibles a partir exclusivamente de los niveles de contaminación por SO_2 y por cloruros cabe hacer notar las exageradamente altas corrosiones del aluminio y del cinc en Flix frente a las experimentadas por estos mismos metales en Hospitalet, o del cobre en Serchs, si se toman como referencia los datos obtenidos en Tarragona y Gerona. La información dada en Parte Experimental sobre fuentes de posible contaminación cercanas a los lugares de ubicación de las estaciones de ensayo puede resultar útil en orden a justificar cualitativamente algunas singularidades.
- 3) Aparte de estos casos excepcionales, la mayoría de los resultados se pueden interpretar satisfactoriamente en función de los niveles de contaminación por SO_2 y cloruros de cada lugar de exposición.

Respecto a este último punto, cabe decir que en anteriores investigaciones (5), se ha demostrado que la corrosión C sufrida por un metal puede expresarse de modo aproximado por el producto de los cuatro factores primarios siguientes:

$$C = M \cdot t \cdot f_t \cdot f_c \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde M es el módulo de corrosión por 1000 horas de exposición en una atmósfera no contaminada con un nivel de H. R. $\geq 85 \%$ y tem. $> 0^\circ \text{C}$, t es el tiempo (en miles de horas) durante el cual se cumplen estas condiciones a lo largo de un año, f_t , es un coeficiente de inhibición de la corrosión con el tiempo, y f_c es un coeficiente de exaltación de la corrosión con la contaminación atmosférica. Se ha admitido, igualmente, que para la corrosión del Fe, Zn y Cu, $f_c = 1 + \alpha + \beta$, donde el término α se relaciona con el nivel de SO_2 en la atmósfera y el β , con el de cloruros. En el caso del Al, se ha aceptado que $f_c = 1 + \alpha + \beta + \alpha\beta$. Los valores de f_t , α y β vienen dados en las *Figs. 15-18*. Los valores de M son $3,5 \mu\text{m}$ para el Fe, $0,40 \mu\text{m}$ para el Zn y para el Cu, y $0,50 \text{ mg/dm}^2$ para el Al.



ACERO

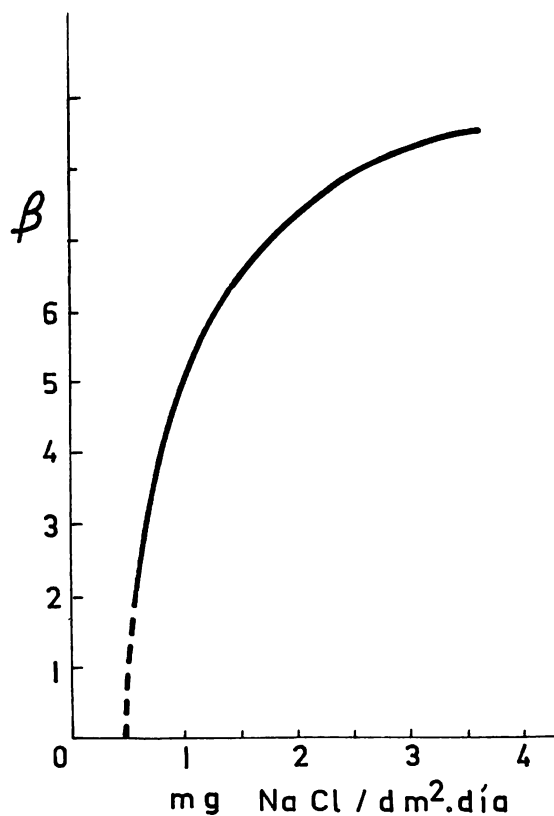
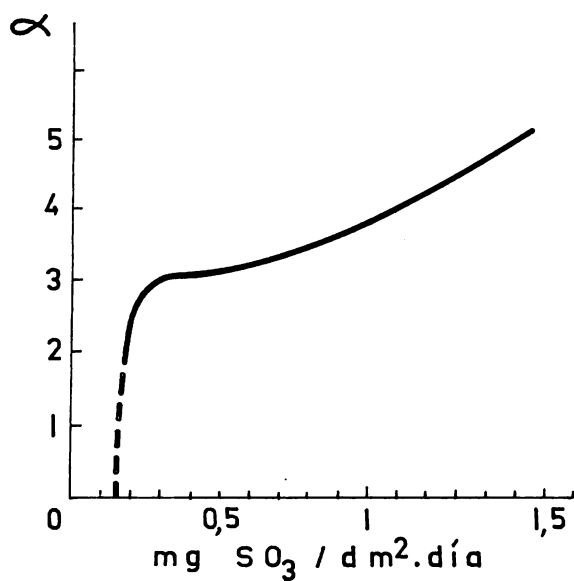
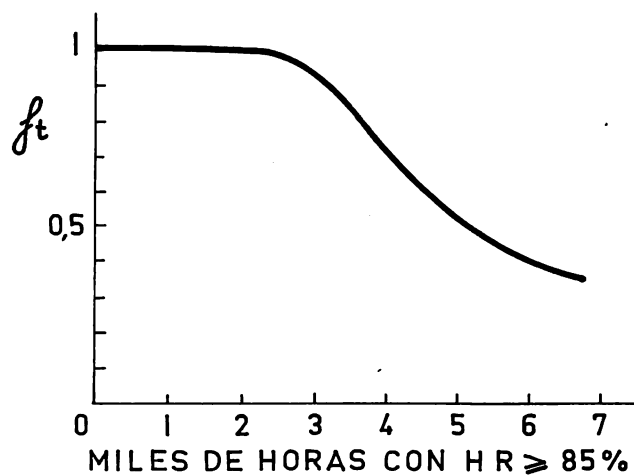


Figura 15. — Valores de los coeficientes f_t , α y β para el *acero suave* en función del tiempo de humectación y de los niveles de contaminación anuales.



C I N C

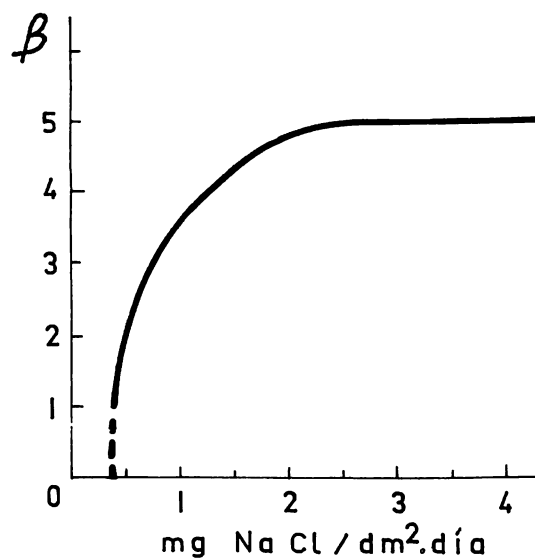
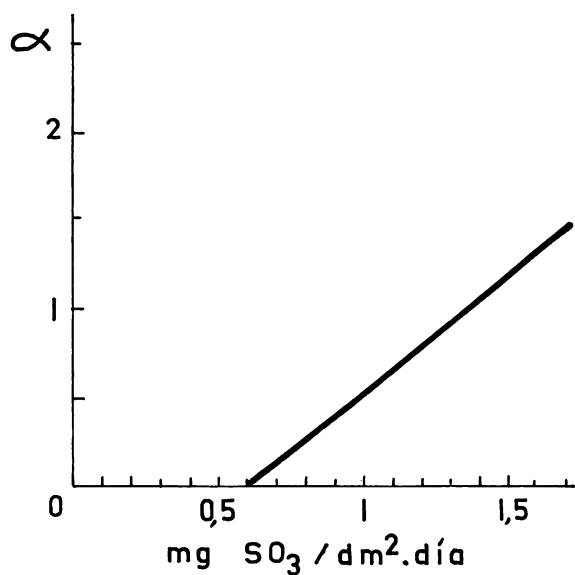
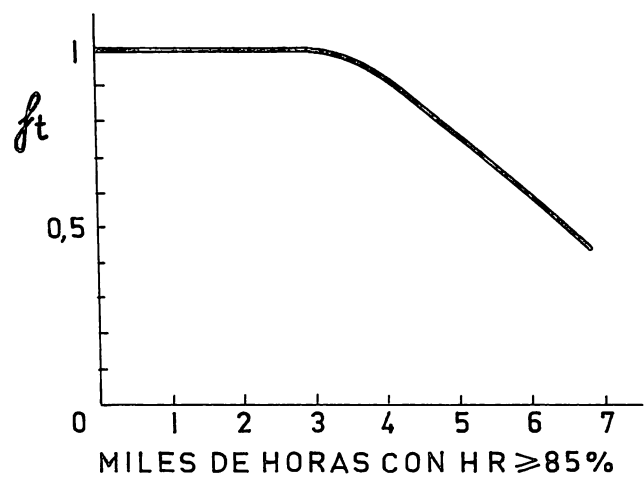


Figura 16. — Valores de los coeficientes f_t , α y β para el cinc en función del tiempo de humectación y de los niveles de contaminación anuales.



COBRE

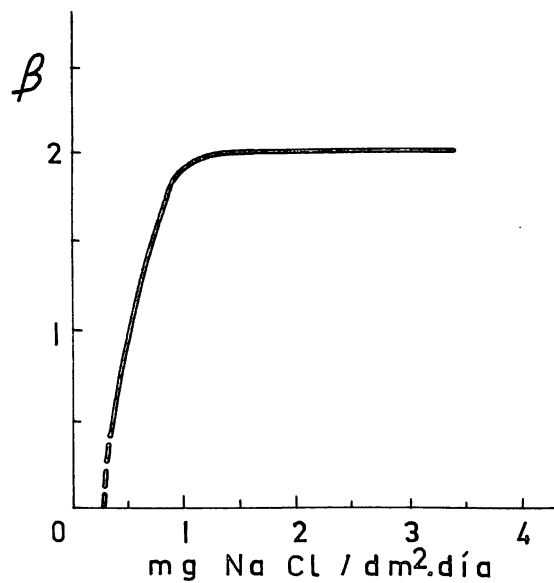
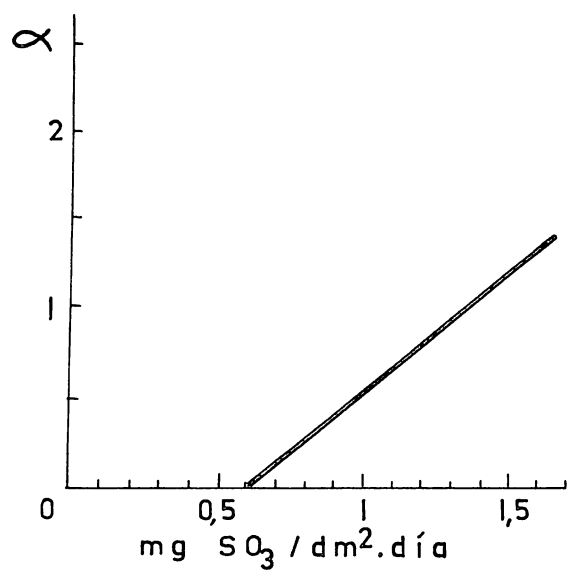
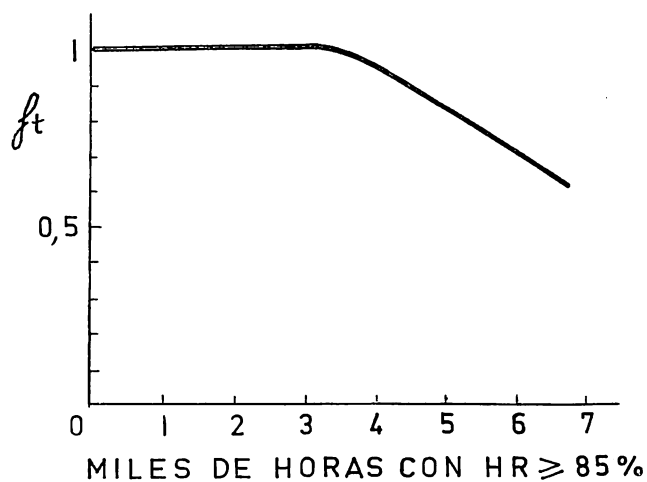


Figura 17. — Valores de los coeficientes f_t , α y β para el *cobre* en función del tiempo de humectación y de los niveles de contaminación anuales.



ALUMINIO

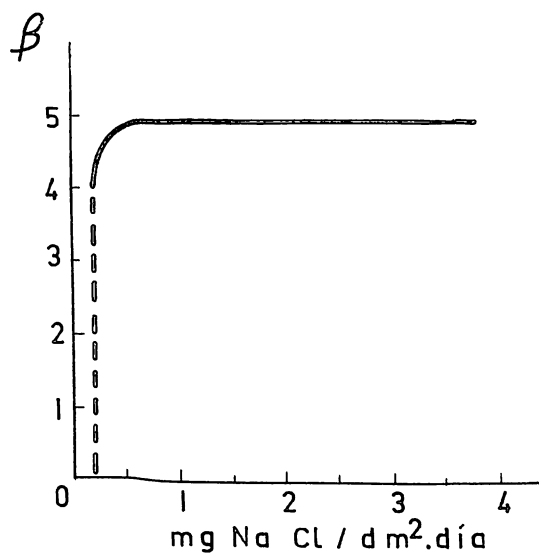
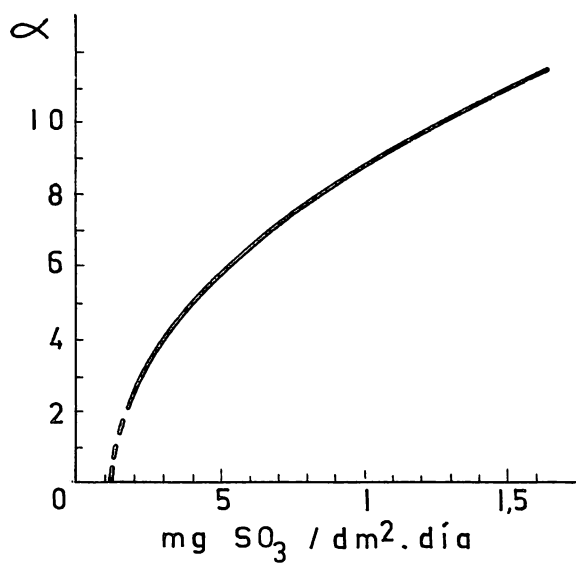


Figura 18. — Valores de los coeficientes f_t , α y β para el *aluminio* en función del tiempo de humectación y de los niveles de contaminación anuales.

Recurriendo a la ecuación 1, se han calculado los valores de corrosión que debieran corresponder a cada uno de los metales ensayados y expuestos a los niveles de contaminación (por SO₂ y cloruros) y a las condiciones de humectación de cada estación experimental que se indican en las Tablas V y VI. La *Tabla VII* recoge los resultados así estimados, comparables con los valores experimentales de las Tablas III y IV.

TABLA VII. — Valores calculados de corrosión a partir de datos meteorológicos y de contaminación. (Los valores correspondientes a las estaciones de Ascó, Palma de Mallorca y Martorell, no han podido ser calculados por no disponer de datos completos sobre contaminación y corrosión anual).

ESTACION	CORROSION ESTIMADA							
	ACERO		CINC		COBRE		ALUMINIO	
	77-78	78-79	77-78	78-79	77-78	78-79	77-78	78-79
Badalona-San Adrián (FECSA)	90,3	91,2	5,2	5,1	3,7	3,5	73,5	66,4
Barcelona (FECSA)	37,1	36,3	1,2	1,2	1,4	1,4	12,6	12,2
Barcelona-Sagrera (ENASA)	38,1	37,2	1,2	1,2	1,4	1,4	13,5	12,6
Flix (FECSA)	27,9	14,0	1,1	1,1	1,1	1,1	4,9	4,2
Gerona (FECSA)	28,7	23,8	1,1	1,1	1,3	1,3	6,0	6,0
Hospitalet (FECSA)	47,3	40,6	1,8	1,2	2,0	1,4	14,4	12,0
Hospitalet (FEMSA)	37,8	36,9	1,1	1,1	1,2	1,2	10,2	7,5
Manresa (FECSA)	35,7	30,1	1,0	1,0	1,2	1,2	6,5	5,8
Reus (FECSA)	9,4	9,4	1,0	1,0	1,2	1,2	1,5	1,5
Sercs (FECSA)	47,0	39,5	1,1	1,0	2,0	1,2	14,5	10,9
Tarragona (FECSA)	36,8	32,9	1,0	1,0	1,2	1,2	7,3	5,8
Tordera (FECSA)	14,2	9,5	1,2	1,2	1,3	1,3	5,1	5,1

En general, los datos experimentales obtenidos en la región catalano-balear han permitido confirmar la validez de los criterios anteriormente desarrollados para una estimación aproximada de la corrosión metálica (6). De todas formas, cualquier intento de adecuarlos mejor a los comportamientos reales de dicha región requeriría un volumen de experimentación mucho mayor que el llevado a cabo en el presente estudio.

Merecen comentario aparte las principales irregularidades experimentales detectadas. Los bajos niveles de contaminación por SO₂ y la práctica ausencia de cloruros en las estaciones de corrosión de Reus, Tordera y Flix debieran motivar, en teoría, y de acuerdo con investigaciones previas (5) (6), valores de corrosión del acero notablemente más bajos que los que se han medido en realidad, claro está, siempre que no estén presentes otros tipos menos frecuentes de contaminantes corrosivos. Las elevadas cifras experimentales hacen pensar, por tanto, en una influencia adicional de otros

contaminantes, sobre los que no se tiene información cuantitativa ni tan siquiera cualitativa segura. En Flix existe una importante industria electroquímica próxima a la estación de ensayos, que es posible motive la anomalía. En la estación de Tordera es menos evidente una explicación similar, a menos que se pudiera relacionar con la fábrica de tejidos de sus alrededores, y más difícil resulta todavía justificar la anomalía tratándose de la estación de corrosión de Reus, aunque en este caso la magnitud de la discrepancia es menos notoria.

Otros valores experimentales de corrosión singularmente elevados son los que hacen referencia al aluminio en Flix y al cobre en Sercs. En Flix tenemos que pensar de nuevo en la posible influencia de la industria electroquímica próxima, cuyas emanaciones no afectarían curiosamente a los restantes metales no féreos ensayados (cinc y cobre). En la estación de Sercs destaca la relativamente enorme corrosión del cobre, que cabría atribuir a la fábrica de cementos cercana, si bien el punto requiere ulterior confirmación, mientras que, curiosamente también, la corrosión de los demás metales se mantiene dentro de cotas previsibles.

III. 3. Trazado del mapa de corrosividad de Cataluña-Baleares y Tablas de las cotas de corrosión previsibles

Para confeccionar el mapa de corrosividad de Cataluña y Baleares se ha admitido la validez aproximada de los criterios desarrollados en (5) (6), a los que se le ha hecho referencia en el apartado precedente. Los efectos de amortiguamiento de la velocidad de corrosión con el tiempo y de exaltación de ésta con el nivel de contaminación se han calculado, por tanto, por medio de la ecuación 1, introduciendo en ella unos valores de M idénticos a los indicados anteriormente y unos valores de f , α y β que resultan de las gráficas de las *Figs. 15-18* para cada dato y supuesto considerado.

De esta manera se han obtenido las *Tablas VIII-XI* que, junto con el mapa de la *Fig. 19*, dan información sobre las cotas de corrosión previsibles en las regiones catalana y balear en atmósferas con diversos grados de contaminación. En dichas tablas y con el fin de facilitar las estimaciones de corrosión, se ha creído útil contemplar expresamente los supuestos de:

- a) que actúen exclusivamente factores meteorológicos en una atmósfera pura.
- b) que los factores meteorológicos actúen en combinación con un *bajo nivel* de contaminación sulfurosa (del orden de $0,3 \text{ mg SO}_3/\text{dm}^2 \text{ día}$).
- c) que los factores meteorológicos actúen en combinación con un *moderado* nivel de contaminación sulfurosa (del orden de $0,6 \text{ mg SO}_3/\text{dm}^2 \text{ día}$),
- d) que los factores meteorológicos actúen en combinación con un *elevado* nivel de contaminación sulfurosa (del orden de $1,2 \text{ mg SO}_3/\text{dm}^2 \text{ día}$).
- e) que los factores meteorológicos actúen en combinación con un *bajo nivel* de contaminación por cloruros (del orden de $0,7 \text{ mg NaCl}/\text{dm}^2 \text{ día}$),

- f) que los factores metereológicos actúen en combinación con un *moderado* nivel de contaminación por cloruros (del orden de $1,5 \text{ mg NaCl/dm}^2 \text{ día}$),
- g) que los factores metereológicos actúen en combinación con un *elevado* nivel de contaminación por cloruros (del orden de $3 \text{ mg NaCl/dm}^2 \text{ día}$),
- h) que se den simultáneamente algunos de los mencionados niveles de contaminación sulfurosa y por cloruros.

Por consiguiente, las previsiones de corrosión se harán tanto en función de la situación de un determinado lugar de exposición sobre el mapa, como de las peculiares circunstancias ambientales imperantes en aquél.

Respecto a éstas, siempre será posible catalogar aproximadamente la atmósfera de acuerdo con algunos de los supuestos definidos de a) a h). No obstante, si se prefiere manejar un campo continuo de valores de contaminación, es igualmente posible recurrir a la utilización directa de las fórmulas y gráficas expuestas en los antedichos trabajos (5) y (6). En este caso la estimación resulta menos simple, sin que frecuentemente se gane demasiado en precisión.

Lo ideal para una previsión lo más exacta posible de la corrosión atmosférica en un determinado lugar sería conocer cuantitativamente, por determinaciones experimentales llevadas a cabo al efecto, el nivel de contaminación del lugar en cuestión. Sin embargo, si ello no es factible, cabe al menos el recurso de una clasificación subjetiva de la atmósfera dentro de algunas de las casillas de las Tablas VIII-XI.

Por supuesto, las predicciones se refieren exclusivamente a condiciones «normales», a saber, cuando los únicos contaminantes posibles son el anhídrido sulfuroso, procedente de quemar combustibles diversos, y los cloruros, procedentes del mar. Así, no debe de extrañar que en ocasiones aparezcan corrosiones sensiblemente mayores que las deducidas del mapa, cuando a la contaminación sulfurosa o por cloruros se le superponen otros tipos de contaminantes químicos, los cuales, aún cuando menos habituales, de estar presentes contribuyen decisivamente a establecer el grado de agresividad (p. ej. humos de naturaleza fuertemente ácida). Naturalmente, en el caso de esas atmósferas, de composición compleja y singular, la corrosión alcanza como mínimo los niveles deducidos a partir del mapa.

TABLA VIII. Valores previsibles (micras o micrómetros/año) para la corrosión atmosférica del *acero suave* en Cataluña-Baleares, según la situación geográfica del lugar de exposición (véase mapa de Fig. 19) y nivel aproximado de contaminación.

Niveles de contaminación: cifras entre paréntesis, en mg NaCl/dm² día para los cloruros y en mg SO₃/dm² día para el SO₂.

Tipo de atmósfera	Nivel de contaminación por cloruros	Nivel de contaminación por SO ₂	Corrosión del acero		
			Zona A	Zona B	Zona C
Rural no contaminada	Despreciable	Despreciable	9,1	9,5	—
Urbana o industrial	Despreciable	Ligera (0,3)	36	38	—
		Moderada (0,6)	38	40	—
		Fuerte (1,2)	48	50	—
Marina	Ligero (0,7)	Despreciable	—	—	38
	Moderado (1,5)		—	—	69
	Fuerte (3,0)		—	—	89
Mixta	Ligero (0,7)	Ligero (0,3)	—	—	66
		Moderado (0,6)	—	—	68
		Fuerte (1,2)	—	—	79
marina-industrial o marina-urbana	Moderado (1,5)	Ligera (0,3)	—	—	94
		Moderado (0,6)	—	—	99
		Fuerte (1,2)	—	—	110
	Fuerte (3,0)	Ligero (0,3)	—	—	117
		Moderado (0,6)	—	—	119
		Fuerte (1,2)	—	—	130

TABLA IX. Valores previsibles (micras o micrómetros/año) para la corrosión atmosférica del *cinc* en Cataluña-Baleares, según la situación geográfica del lugar de exposición (véase mapa de Fig. 19) y nivel aproximado de contaminación.

Niveles de contaminación: cifras entre paréntesis, en mg NaCl/dm² día para los cloruros y en mg SO₃/dm² día para el SO₂.

Tipo de atmósfera	Nivel de contaminación por cloruros	Nivel de contaminación por SO ₂	Corrosión del cinc		
			Zona A	Zona B	Zona C
Rural no contaminada	Despreciable	Despreciable	1,3	1,4	—
Urbana o industrial	Despreciable	Ligero (0,3)	1,3	1,4	—
		Moderado (0,6)	1,3	1,4	—
		Fuerte (1,2)	2,3	2,5	—
Marina	Ligero (0,7)	Despreciable	—	—	5,2
	Moderado (1,5)		—	—	7,3
	Fuerte (3,0)		—	—	8,3
Mixta	Ligero (0,7)	Ligero (0,3)	—	—	5,2
		Moderado (0,6)	—	—	5,2
		Fuerte (1,2)	—	—	6,4
marina-industrial o marina-urbana	Moderado (1,5)	Ligero (0,3)	—	—	7,3
		Moderado (0,6)	—	—	7,3
		Fuerte (1,2)	—	—	8,4
	Fuerte (3,0)	Ligero (0,5)	—	—	8,3
		Moderado (0,6)	—	—	8,3
		Fuerte (1,2)	—	—	9,4

TABLA X. Valores previsibles (micras o micrómetros/año) para la corrosión atmosférica del *cobre* en Cataluña-Baleares, según la situación geográfica del lugar de exposición (véase mapa de Fig. 19) y nivel aproximado de contaminación.

Niveles de contaminación: cifras entre paréntesis, en mg NaCl/dm² día para los cloruros y en mg SO₃/dm² día para el SO₂.

Tipo de atmósfera	Nivel de contaminación por cloruros	Nivel de contaminación por SO ₂	Corrosión del cobre		
			Zona A	Zona B	Zona C
Rural no contaminada	Despreciable	Despreciable	1,4	1,5	—
Urbana o industrial	Despreciable	Ligero (0,3)	1,4	1,5	—
		Moderado (0,6)	1,4	1,5	—
		Fuerte (1,2)	2,4	2,7	—
Marina	Ligero (0,7)	Despreciable	—	—	3,6
	Moderado (1,5)		—	—	4,5
	Fuerte (3,0)		—	—	4,5
Mixta	Ligero (0,7)	Ligero (0,3)	—	—	3,6
		Moderado (0,6)	—	—	3,6
		Fuerte (1,2)	—	—	4,8
marina-industrial o marina-urbana	Moderado (1,5)	Ligero (0,3)	—	—	4,5
		Moderado (0,6)	—	—	4,5
		Fuerte (1,2)	—	—	5,7
	Fuerte (3,0)	Ligero (0,3)	—	—	4,5
		Moderado (0,6)	—	—	4,5
		Fuerte (1,2)	—	—	5,7

TABLA XI. Valores previsibles (mg/dm² año) para la corrosión atmosférica del *aluminio* en Cataluña-Baleares, según la situación geográfica del lugar de exposición (véase mapa de Fig. 19) y nivel aproximado de contaminación. Niveles de contaminación: cifras entre paréntesis, en mg NaCl/dm² día para los cloruros y en mg SO₃/dm² día para el SO₂.

Tipo de atmósfera	Nivel de contaminación por cloruros	Nivel de contaminación por SO ₂	Corrosión del aluminio		
			Zona A	Zona B	Zona C
Rural no contaminada	Despreciable	Despreciable	1,4	1,5	—
Urbana o industrial	Despreciable	Ligero (0,3)	6,5	7,3	—
		Moderado (0,6)	10,0	11,3	—
		Fuerte (1,2)	14,0	15,9	—
Marina	Ligero (0,7)	Despreciable	—	—	9,2
	Moderado (1,5)		—	—	9,2
	Fuerte (3,0)		—	—	9,2
Mixta	Ligero (0,7)	Ligero (0,3)	—	—	44
		Moderado (0,6)	—	—	68
		Fuerte (1,2)	—	—	94
marina-industrial o marina-urbana	Moderado (1,5)	Ligero (0,3)	—	—	44
		Moderado (0,6)	—	—	68
		Fuerte (1,2)	—	—	94
	Fuerte (3,0)	Ligero (0,3)	—	—	44
		Moderado (0,6)	—	—	68
		Fuerte (1,2)	—	—	94

Figura 19. — División del mapa de Cataluña y Baleares en zonas (A, B y C) de distinta corrosividad potencial. En el mapa se ha exagerado el grosor de la línea que representa la zona C, marítima. Es probable que dicha zona no se extienda tierra adentro más de unos 500-1000 m la mayoría de las veces.

A detailed map of Catalonia, Spain, showing its provincial boundaries and major urban centers. The map includes the following elements:

- Provinces:** LLEIDA, TARRAGONA, GIRONA, and BARCELONA.
- Cities and Towns:** Lleida, Balaguer, Tremp, Sort, Viella, Cervera, Igualada, Manresa, Berga, Serres, La Seu d'Urgell, Vic, Granollers, Tordera, Martorell, Hospitalet del Llobregat, Badalona, Barcelona, Reus, Flix, Asco, Tortosa, Figueres, and Olot.
- Rivers:** R. Segre, R. Cardener, R. Fluvià, R. Ter, R. Besòs, R. Ebre, R. Noya, R. Cardener, R. Fluvià, R. Ter, R. Besòs, R. Ebre.
- Geographical Features:** ANDORRA (to the north), MAR MEDITERRÀNIA (Mediterranean Sea) to the east and south.
- Islands:** Eivissa (Ibiza) is shown in the bottom right corner.
- Scale:** A scale bar at the bottom indicates distances from 0 to 50 Km.

The map uses different shades of brown and orange to distinguish between the provinces. Major roads are indicated by black lines, and water bodies are light blue.

IV. CONSIDERACIONES FINALES

IV. 1. *Indices de corrosión*

Se puede objetar la imprecisión de algunas de las estimaciones de corrosión conducentes a valores incluso dos o tres veces superiores o inferiores a los reales, especialmente cuando la velocidad de corrosión es muy pequeña. Sin embargo, este inconveniente es más aparente que real, y desaparece si el grado de deterioro no se refiere a una cifra exacta de corrosividad, sino a un determinado nivel dentro de una ordenación por rangos de corrosividad, cuyos límites, aunque amplios, permiten discernir perfectamente entre unas condiciones, por ejemplo, de corrosión ligera, suave, moderada, apreciable, fuerte, etc.

Por tanto, más que pretender precisar la corrosividad por unos datos puntuales de pérdida de peso o desgaste, puede ser mejor conformarse con encasillar el dato de corrosión dentro de unas determinadas cotas, tales como las propuestas como índices en las *Tablas XII-XV*. En este caso la comparación de los índices de corrosión correspondientes a los datos experimentales obtenidos en cada estación (*Tablas III y IV*) con los relativos a las estimaciones numéricas realizadas (*Tabla VII*) muestra una razonable buena concordancia, puesto que en los 92 casos contabilizados en la *Tabla XVI*, la igualdad en los valores de los índices es absoluta en 43 casos, y en 42 la discrepancia no excede de un grado, habiendo sido mayor en los siete restantes, que tal vez sean poco representativos por corresponder a la corrosión del cobre en Serchs, del acero en Tordera y del acero y aluminio en Flix, estaciones en las que, como ha sido ya comentado, han actuado probablemente factores extraños de corrosión.

La aceptable equivalencia encontrada entre los valores experimentales y estimados de los índices de corrosión avala el interés práctico de las predicciones de corrosión realizadas de acuerdo con los criterios y pautas expuestos en éste y otros trabajos (5), (6).

Siempre que se quiera operar con los índices de corrosión definidos en las *Tablas XII-XV* convendrá tener presente que el *índice I* para el acero suave (*Tabla XII*) se refiere a una atmósfera muy poco agresiva, en la que el metal puede exponerse desnudo sin sufrir grave deterioro en muchos años. Aun en el supuesto improbable de que no se amortigüe la velocidad de corrosión con el tiempo, una plancha o sección de 6 mm de espesor no perderá en promedio, ni la tercera parte de su grosor en 60 años, incluso bajo el supuesto de que la corrosión atmosférica afecte simultáneamente a los dos lados de la plancha metálica. De todos modos, como se ha indicado antes, el ataque, aun cuando sea de tipo generalizado, no avanza uniformemente por todos los puntos de la superficie, por lo que el peligro de debilitamientos locales e incluso

perforaciones es mayor que el que se deduce del valor de la velocidad de corrosión media. Un factor de seguridad en los cálculos puede ser aceptar la posibilidad de una velocidad local triple que la media. Por ello, en el ejemplo anterior, al cabo de los mencionados 60 años podrá existir ya un fuerte riesgo de perforación en algunos puntos de la estructura.

Similarmente, el *índice I* para el cinc (*Tabla XIII*) señala, por ejemplo, que la acción protectora de un recubrimiento de este metal de 50 μm sobre una base de acero podrá extenderse como mínimo 15 años, y probablemente mucho más, si el hecho de que el acero quede desnudo en algún punto no se toma como indicación del término de la vida útil del recubrimiento, considerando que éste tiene cierta capacidad de actuar de ánodo de sacrificio.

El cobre y el aluminio pueden exponerse sin grandes preocupaciones a la acción de las intemperies cuyas agresividades no superen los *índices I*, no siendo de temer daños sensibles en muchos años.

En el extremo de máxima corrosión, un *índice 6* para el acero significa un fortísimo ataque, que arruinaría a una estructura desnuda en un relativamente corto espacio de tiempo. Frente a este nivel de agresividad, una sección de 6 mm de espesor perderá en promedio y como mínimo la tercera parte de su espesor en 12 años, y es posible que antes de cumplirse este tiempo muestre ya puntos de perforación.

Un recubrimiento de cinc de 50 μm de espesor protegerá al acero no más de 4-5 años frente a una atmósfera de *índice 6*. El aluminio expuesto a similar índice de corrosividad presentará prontamente gran número de picaduras y un marcado deterioro de su aspecto. En el primer año las picaduras podrán penetrar unas 150-200 μm , avanzando a un ritmo mucho más lento los años posteriores (11).

Entre estos dos índices extremos, el 1 y el 6, el *índice 2* (igual que el *índice 1*) es propio de ambientes rurales; el *índice 3* puede corresponder a ambientes urbanos y los *índices 4 y 5* (igual que el *índice 6*) a ambientes urbanos e industriales, en especial cuando estos ambientes coinciden con zonas marinas.

Los índices de corrosión, además de proporcionar informaciones objetiva y cuantitativa o, al menos, semicuantitativa acerca de la corrosividad de una atmósfera, permiten formarse una idea sobre la clase de medidas anticorrosivas a adoptar en cada caso. Esto es, pueden servir de referencia a la hora de elegir el sistema de protección, especialmente del acero, y a la hora de escoger entre exposición del metal desnudo, aplicación de un recubrimiento metálico o de pintura (o, tal vez, mixto, de metal más pintura) y para especificar el grosor del recubrimiento metálico, la preparación superficial anterior al pintado, el número de manos de pintura a dar y el período de mantenimiento.

TABLA XII. Niveles de corrosión del acero suave.

Indice	Corrosión
1	$\leq 15 \mu\text{m/año}$
2	$> 15 \mu\text{m/año}$ y $\leq 30 \mu\text{m/año}$
3	$> 30 \mu\text{m/año}$ y $\leq 45 \mu\text{m/año}$
4	$> 45 \mu\text{m/año}$ y $\leq 65 \mu\text{m/año}$
5	$> 65 \mu\text{m/año}$ y $\leq 90 \mu\text{m/año}$
6	$> 90 \mu\text{m/año}$

TABLA XIII. Niveles de corrosión del cinc.

Indice	Corrosión
1	$\leq 1 \mu\text{m/año}$
2	$> 1 \mu\text{m/año}$ y $\leq 2 \mu\text{m/año}$
3	$> 2 \mu\text{m/año}$ y $\leq 3 \mu\text{m/año}$
4	$< 3 \mu\text{m/año}$ y $\leq 5 \mu\text{m/año}$
5	$> 5 \mu\text{m/año}$ y $\leq 8 \mu\text{m/año}$
6	$> 8 \mu\text{m/año}$

TABLA XIV. Niveles de corrosión del cobre.

Indice	Corrosión
1	$\leq 1 \mu\text{m/año}$
2	$> 1 \mu\text{m/año}$ y $\leq 2 \mu\text{m/año}$
3	$> 2 \mu\text{m/año}$ y $\leq 3 \mu\text{m/año}$
4	$> 3 \mu\text{m/año}$ y $\leq 4 \mu\text{m/año}$
5	$> 4 \mu\text{m/año}$ y $\leq 6 \mu\text{m/año}$
6	$> 6 \mu\text{m/año}$

TABLA XV. Niveles de corrosión del aluminio.

Indice	Corrosión
1	$\leq 1 \text{ mg/dm}^2/\text{año}$
2	$> 1 \text{ mg/dm}^2/\text{año}$ y $\leq 5 \text{ mg/dm}^2/\text{año}$
3	$> 5 \text{ mg/dm}^2/\text{año}$ y $\leq 15 \text{ mg/dm}^2/\text{año}$
4	$> 15 \text{ mg/dm}^2/\text{año}$ y $\leq 50 \text{ mg/dm}^2/\text{año}$
5	$> 50 \text{ mg/dm}^2/\text{año}$ y $\leq 100 \text{ mg/dm}^2/\text{año}$
6	$> 100 \text{ mg/dm}^2/\text{año}$

TABLA XVI. Clasificación de los datos de corrosión expuestos en Tablas III, IV y VII de acuerdo con los índices de corrosividad definida en Tablas XII-XV.

El índice de corrosividad correspondiente a cada uno de los valores estimados (Tabla VII) figura, entre paréntesis, inmediatamente debajo del índice correspondiente al valor experimental (Tablas III y IV). (No figuran en la tabla las estaciones de Ascó, Palma de Mallorca y Martorell por no disponer de datos anuales completos sobre corrosión y contaminación en ellas).

ESTACION	INDICES DE CORROSION							
	ACERO		CINC		COBRE		ALUMINIO	
	77-78	78-79	77-78	78-79	77-78	78-79	77-78	78-79
Badalona-San Adrián (FECSA)	5 (6)	5 (6)	5 (5)	5 (5)	5 (4)	5 (4)	6 (5)	6 (5)
Barcelona (FECSA)	3 (3)	3 (3)	2 (2)	2 (2)	2 (2)	2 (2)	3 (3)	4 (3)
Barcelona-Sagrera	3 (3)	3 (3)	3 (2)	2 (2)	2 (2)	2 (2)	3 (3)	3 (3)
Flix (FECSA)	4 (2)	4 (1)	3 (2)	3 (2)	2 (2)	2 (2)	4 (2)	4 (2)
Gerona (FECSA)	3 (2)	3 (2)	3 (2)	2 (2)	1 (2)	1 (2)	2 (3)	2 (3)
Hospitalet (FECSA)	4 (4)	4 (3)	2 (2)	2 (2)	2 (2)	3 (2)	3 (3)	4 (3)
Hospitalet (FEMSA)	3 (3)	3 (3)	2 (2)	2 (2)	2 (2)	2 (2)	2 (3)	2 (3)
Manresa (FECSA)	3 (3)	2 (3)	2 (1)	1 (1)	1 (2)	1 (2)	2 (3)	3 (3)
Reus (FECSA)	2 (1)	2 (1)	2 (1)	2 (1)	1 (2)	1 (2)	1 (2)	2 (2)
Sercs (FECSA)	3 (4)	— (3)	2 (2)	— (1)	4 (2)	— (2)	2 (3)	— (3)
Tarragona (FECSA)	3 (3)	3 (3)	2 (1)	2 (1)	1 (2)	2 (2)	3 (3)	3 (3)
Tordera (FECSA)	3 (1)	3 (1)	3 (2)	2 (2)	2 (2)	2 (2)	2 (3)	3 (3)

IV. 2. Utilización del mapa de corrosión en estimaciones a largo plazo

Los datos referentes a la corrosión anual que resultan del mapa de corrosividad, además de facilitarnos la clasificación de las atmósferas, permiten las extrapolaciones a períodos de tiempo mucho más largos, sobre todo con metales que se corroen a velocidad prácticamente constante, como en el caso del *cinc*.

Con el *acero*, *cobre* y *aluminio* las extrapolaciones lineales dan, a menudo, valores más elevados que los reales; aún así, sirven para fijar un límite máximo de corrosión. En el caso de estos tres metales, es posible precisar algo más las estimaciones recurriendo a la fórmula empírica.

$$C = A \cdot t^n \quad (\text{Ecuación 2})$$

en la que: A = corrosión en el primer año, t = tiempo en años, n = exponente que es función del tipo de atmósfera y composición del metal (4) (6).

En una recopilación de datos de la bibliografía (12) sobre la corrosión atmosférica del acero en una gran variedad de lugares del mundo, a lo largo de períodos de tiempo que se prolongan, a veces, hasta los 20 años, se comprueba una propensión a que los valores del exponente n de la ecuación 2 estén comprendidos entre 0,4 y 0,7. Una aproximación que a menudo no se aparta mucho de la realidad es aceptar para el acero $n = 0,5$, esto es que $C = A\sqrt{t}$.

El enfoque más sencillo para calcular en primera aproximación la corrosión a largo plazo del cinc consiste en la extrapolación del dato de corrosión del primer año, A , a t años, admitiendo el cumplimiento de la ley $C = A \times t$.

Para una burda estimación de las corrosiones del *cobre* y del *aluminio*, es posible utilizar, respectivamente, las leyes $C = A t^{0.55}$ y $C = A t^{0.85}$, deducidas a partir de datos diversos de la bibliografía.

Una investigación en curso, emprendida expresamente con el fin de determinar el efecto del tiempo en la corrosión a largo plazo, ha proporcionado ya información referente a los tres primeros años de exposición en diez estaciones de ensayo en España (6). Como era de presumir, los resultados verifican aproximadamente la ecuación 2, aunque existen excepciones, explicable por los muchos factores que pueden intervenir en la corrosión atmosférica, por ejemplo, cambios en las condiciones ambientales de contaminación del lugar de exposición.

Según los primeros resultados de esa investigación, programada para durar hasta diez años, los valores de n para el acero, en la ecuación 2, son del orden de 0,6 en la mayoría de aquellas diez estaciones. Es excepcional el comportamiento en la estación marino-industrial de Alicante, con un valor de $n = 0,92$ en un punto a 30 m del mar, por lo que

la corrosión en este caso se desarrolla a velocidad casi constante. A esta misma conclusión, si bien no para todas las estaciones, se llega con respecto al cinc, con valores del exponente n muy cercanos a uno, de acuerdo con el esperado progreso lineal de la corrosión de este metal con el tiempo. Para el cobre se ha obtenido valores de n del orden de 0,5, excepto en las estaciones de Barcelona y Bilbao, donde coexisten apreciables niveles de contaminación sulfurosa y por cloruros, y en las que n se acerca también a la unidad. En general, los exponentes n para el aluminio son más altos que para el cobre, valiendo prácticamente uno en varias estaciones.

BIBLIOGRAFIA

1. N. D. TOMASHOV: «Theory of Corrosion and Protection of Metals», Macmillan Co. (Nueva York), 1966.
2. S. FELIU: (Coste social de la corrosión), Seminario sobre Corrosión y Tratamiento de Agua, ATE-CYR—Insto. Eduardo Torroja, Madrid, Noviembre, 1978.
3. «Report of the Committee on Corrosion and Protection», Londres, 1971.
4. S. FELIU: *Corrosión y Protección*, 8, n.º 1 (1977), 3.
5. S. FELIU y M. MORCILLO: *Rev. Metal CENIM*, 14, n.º 4 (1978), 198.
6. S. FELIU y M. MORCILLO: «Atmospheric Corrosion Testing in Spain», ECS Symposium Hollywood, Florida, Octubre, 1980.
7. A. I. GOLUBEV y M. KH. KADYROV: «Proced. Third Inter. Congress on Metallic Corrosion», vol. 4, pág. 522, Moscú, 1969.
8. M. MORCILLO. *Rev. Metal CENIM*, 11 (1975), 82.
9. British Standards Institution, B.S. 1747; Part 4, 1963.
10. A. HACHE: «Estimation of the Aggressiveness of Marine Atmospheres by Analysis Chlorides», II Congreso Internacional de Corrosión, Nueva York, 1963.
11. E. OTERO, R. LIZARBE y S. FELIU: *Br. Corrosion J.*, 13, n.º 2 (1978), 82.
12. S. FELIU y M. MORCILLO: «La Corrosión y Protección de Metales en la Atmósfera». Libro pendiente de publicación.

Impreso en España - Printed in Spain
F.I.S.A. Palaudarias, 26 - Barcelona-4

