



© Fondo de Cultura Económica

MÁS ALLÁ DE LA HERRUMBRE III. CORROSIÓN Y MEDIO AMBIENTE

Autor: JOAN GENESCÁ

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [PRÓLOGO](#)
- [I. INCIDENCIA DE LA CORROSIÓN SOBRE EL MEDIO AMBIENTE](#)
- [II. EFECTOS DEL MEDIO AMBIENTE EN LA CONSERVACIÓN DE BIENES Y EQUIPOS METÁLICOS](#)
- [III. CORROSIÓN ATMOSFÉRICA](#)
- [IV. LA CORROSIÓN INDUCIDA POR CONTAMINACIÓN DEL AGUA](#)
- [APÉNDICE 1](#)
- [APÉNDICE 2](#)
- [APÉNDICE 3](#)
- [APÉNDICE 4](#)
- [CONTRAPORTADA](#)



COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora Fundadora:

Física Alejandra Jaidar †

Coordinadora:

María del Carmen Farías



EDICIONES

Primera edición, 1994

Primera reimpresión, 1995

La Ciencia para todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

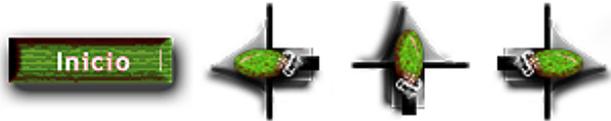
D.R. © 1994, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S. A. DE C. V.

D.R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-4370-4

Impreso en México



PRÓLOGO

Dentro de esta misma colección, la problemática de la corrosión ha sido tratada en dos libros precedentes. En el primero se presentaron las bases y conocimientos fundamentales necesarios para la buena comprensión de los procesos de corrosión. El segundo estaba dedicado al método más empleado en la práctica ingenieril de lucha contra la corrosión, la protección catódica.

El tercer libro de esta serie, *Más allá de la herrumbre. III. Corrosión y medio ambiente*, como su título lo indica, trata el binomio corrosión y medio ambiente y los efectos de uno sobre el otro, siendo la atmósfera el medio cuyos efectos van a ser considerados principalmente.

Se denomina con el término general de corrosión la alteración de los materiales provocada por el medio que los rodea. Cuando se trata de metales, se habla de corrosión metálica. De acuerdo con la naturaleza del medio corrosivo, la corrosión metálica comprende la corrosión química y la corrosión electroquímica.

La corrosión química comprende el ataque por sistemas no electrolíticos, tales como gases y vapores a temperaturas que impiden su condensación sobre la superficie metálica o por líquidos no conductores de la corriente eléctrica.

La corrosión electroquímica comprende la corrosión atmosférica en aire húmedo, la producida en suelos, y la provocada por medios electrolíticos (agua de mar, soluciones ácidas, sales y álcalis) y por sales fundidas.

Este libro trata fundamentalmente de problemas de corrosión electroquímica y dentro de ésta, por su creciente importancia e incidencia, de corrosión atmosférica. La corrosión atmosférica de metales incluye su ataque a la intemperie y en el interior tanto de edificios como de equipos y maquinarias. El proceso de corrosión depende de los contaminantes presentes en el aire y de la humedad relativa del ambiente. Entre los contaminantes, se presenta principalmente el efecto del dióxido de azufre, SO₂, típico de las atmósferas industriales y urbanas, y el efecto de los iones cloruro, Cl⁻, característico de las atmósferas marinas. Aunque los contaminantes presentes en el aire son más numerosos, se limita el presente libro a los dos citados, ya que contamos con amplias muestras de su efecto sobre los materiales metálicos más comúnmente empleados por el hombre.

En las páginas que siguen se refleja el trabajo realizado dentro del proyecto "Corrosión Atmosférica", en el cual participaron muchos estudiantes, realizando su servicio social y su tesis de licenciatura, en el Laboratorio de Corrosión de la Facultad de Química. A todos ellos, mi agradecimiento por su dedicación y por contribuir tan decisivamente y con tan pocos medios a su alcance en la buena marcha del proyecto.

Por último, este libro es un pequeño homenaje a uno de los investigadores que más ha contribuido con sus trabajos al conocimiento de los mecanismos que controlan los procesos de corrosión atmosférica, el doctor Sebastián Felú Matas. Su enorme generosidad, su humildad, fruto de largos años de estudio, su paciencia con los jóvenes que se inician en la investigación, su disposición constante de ayudar, su ánimo abierto a discusión y su enorme experiencia serán siempre un ejemplo y muestra de lo que debe ser un maestro universitario. Con motivo de su jubilación quiero dejar testimonio del sincero respeto y admiración de uno de sus discípulos.

De forma directa o indirecta han participado y participan en el proyecto "Corrosión Atmosférica" las siguientes personas: doctor Jorge Uruchurtu, doctor Luis S. Hernández, doctor Javier Ávila, ingeniera química Patricia Rodríguez, ingeniera química Martha Vásquez, ingeniero químico metalúrgico Carlos Rodríguez, ingeniero químico Francisco J. Rodríguez, ingeniero químico metalúrgico Saúl Ortiz, ingeniera química metalúrgica Andrea Jiménez.

Ciudad Universitaria, D. F., noviembre de 1990





I. INCIDENCIA DE LA CORROSIÓN SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

EN LOS últimos años se ha dado gran atención a los cada vez mayores problemas que presenta la corrosión metálica, provocados por el progresivo deterioro del medio ambiente. Numerosos trabajos han puesto de relieve la influencia de la contaminación atmosférica, especialmente en zonas urbanas e industriales, sobre la velocidad de corrosión de diferentes materiales. Los estudios han incidido en la relación que *la contaminación del medio ambiente ejerce sobre la corrosión*. En cambio, se ha dedicado mucha menos atención a la relación inversa, el efecto que *la corrosión tiene sobre el medio ambiente*. Esto podría ser debido a que la acción de la corrosión sobre el medio ambiente suele presentarse de una manera menos general, con *efectos* más puntuales, tanto en su localización como en el tiempo, si bien casi siempre revestidos de gravedad. Por otra parte, la misma naturaleza de este tipo de problemas hace que en ellos se encuentren comprometidos técnicos como ingenieros de proceco o jefes de seguridad, la mayoría de las veces poco interesados en los fenómenos de corrosión. Cabe señalar aquí las propuestas realizadas con anterioridad (1) con el objeto de mejorar la formación de recursos humanos en corrosión.

En este capítulo se hace una breve revisión de los caminos a través de los cuales la corrosión actúa sobre el medio ambiente, así como de los efectos provocados por esta acción. Al final se presenta una breve descripción de dos casos significativos, la fuga de gas tóxico que tuvo lugar en Bhopal, India y de un problema de corrosión que afecta a las centrales nucleares del tipo BWR, como ejemplo de lo tratado en el capítulo.

LAS MODALIDADES Y CAUSAS MÁS FRECUENTES DE CORROSIÓN

Analizando aquellos sectores en los cuales pueda tener más repercusión la corrosión sobre el medio ambiente, se pueden seleccionar los correspondientes a las centrales nucleares, la extracción de petróleo y la industria química.

En relación con los dos primeros, existe muy poca información publicada sobre casos en los cuales la corrosión haya sido la causa directa de la fuga de radiactividad o de hidrocarburos, respectivamente.

En el caso de las centrales nucleares, el estricto control de los materiales y componentes, así como el relativamente pequeño número de instalaciones y una cierta tipificación en las mismas podrían explicar este hecho.

Recientemente se ha efectuado una revisión de los problemas que afectan a las centrales nucleares del tipo BWR (agua en ebullición). (2)

En el caso de las plataformas marinas de explotación de petróleo, si bien los accidentes son más numerosos (3) y muchos de ellos ocasionan fugas de crudo, sus causas suelen ser ajenas a la corrosión (errores humanos, fallas estructurales debidas a tempestades, etcétera).

Es en el sector químico, pues, donde la corrosión ha tenido una mayor repercusión. Sin embargo, es difícil reunir datos estadísticos significativos sobre cuáles son los tipos o formas de corrosión que con más frecuencia han intervenido en estos casos. No obstante, puede suponerse que la frecuencia es prácticamente la misma que la existente en los casos usuales de corrosión en las plantas químicas, la cual sí se conoce aunque de manera aproximada. Gavelli y colaboradores (4) han estudiado 1 115 casos del banco de datos sobre corrosión del Instituto Guido Donegani, y han encontrado la siguiente distribución:

<i>Tipo de corrosión</i>	%
Corrosión bajo tensión	21
Corrosión uniforme	20
Corrosión - fatiga	18
Corrosión por picaduras	10
Corrosión - erosión	7
Corrosión en hendiduras	6

Corrosión a alta temperatura	6
Fluencia	4
Corrosión intergranulada	3
Fragilización por hidrógeno	1
Corrosión galvánica	1
Otros casos	3

En lo que se refiere a las causas por las cuales aparecen diferentes modalidades de corrosión, es más difícil encontrar datos. Las más usuales, sin embargo, parecen ser:

- errores en la construcción y/o fabricación,
- especificación inadecuada de los materiales,
- diseño erróneo,
- funcionamiento incorrecto de la planta, y
- mantenimiento inadecuado.

Más concretamente, las razones que han causado accidentes con impacto ambiental originados por la corrosión han sido, con mayor frecuencia:

- introducción de modificaciones en el diseño inicial de la planta,
- cambio en la composición de las materias primas,
- introducción de contaminantes en el proceso,
- existencia de sobrecalentamientos locales, y
- falta de seguimiento del manual de operaciones, sobre todo en el arranque y en las paradas.

FORMAS DE INCIDENCIA EN EL MEDIO AMBIENTE

Debido a la gran variedad de industrias presentes en el sector químico, el impacto ambiental puede tener diferentes grados y características. Ahora bien, es evidente que su primera manifestación es la fuga de un gas o de un líquido.

Las consecuencias de esta fuga dependerán de las propiedades del fluido. Si éste es combustible, ocasionará fácilmente un incendio o la formación de una nube inflamable, con posterior explosión. Si es tóxico, puede formar una nube o simplemente difundirse en el aire (5). Las diferentes posibilidades han sido esquematizadas en la figura I.1, en forma simplificada.

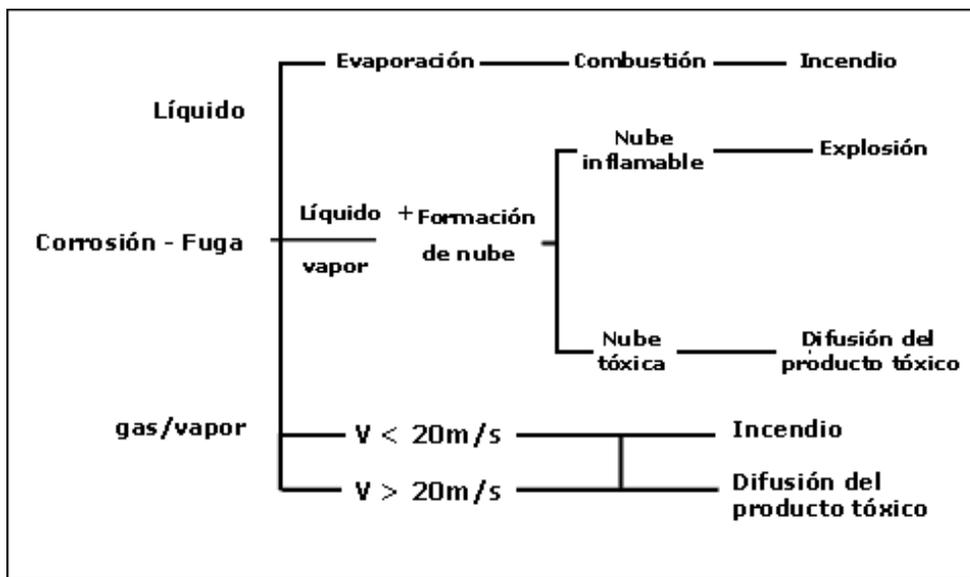


Figura I.1 Efectos de la corrosión sobre el ambiente.

Las consecuencias finales, así, consisten en la fuga al ambiente de calor o productos de diversa toxicidad. En ocasiones puede formarse una nube, dependiendo de las condiciones hidrodinámicas de la fuga, que si es inflamable producirá probablemente una explosión, y si es tóxica y de densidad parecida o superior a la del aire puede tener consecuencias graves para la población.

CONCLUSIÓN

En un cierto número de casos, y sobre todo en las plantas químicas, la corrosión puede provocar o contribuir a provocar accidentes que tengan una grave repercusión sobre el medio ambiente. Estos accidentes suelen ser de corta duración, pero de gran intensidad. Además de las pérdidas materiales, las consecuencias sobre la población pueden ser fatales o de larga duración.

Así, es evidente la necesidad de extremar la prevención de la corrosión en aquellas plantas que, por el grado de peligrosidad de los productos en ellas procesados o por el almacenamiento de los mismos, sean susceptibles de sufrir este tipo de accidentes. Esta prevención, presente muchas veces en el diseño inicial, se reduce cuando la planta experimenta modificaciones tanto estructurales como de operación que no son acordes con los requisitos de seguridad iniciales.

ANÁLISIS DEL CASO DE BHOPAL, INDIA

El 3 de diciembre de 1984 tuvo lugar en la India un accidente de triste memoria en la opinión pública mundial. Se presentan a continuación algunos detalles referentes al mismo, como un ejemplo de cómo un problema de corrosión puede tener un enorme impacto ambiental, en este caso al causar una fuga de gas tóxico.

El accidente tuvo lugar en un depósito enterrado, el cual disponía de protección catódica para evitar la corrosión externa, construido de acero inoxidable tipo 304, de acuerdo al código ASME (American Society of Mechanical Engineers) para productos letales. Su contenido eran 40 000 kg de metil isocianato (MIC), con el cual entraron en contacto entre 700 y 1 400 kg de cloroformo, debido a una mala destilación, así como de 400 a 900 kg de agua, de manera desconocida (Informe Bhopal). (6) Se produjo una lenta reacción exotérmica (desprendimiento de calor con el consiguiente aumento de la temperatura) al entrar en contacto el MIC y el agua. El aumento de la temperatura provocó una mayor corrosión de las paredes del recipiente, y el hierro proveniente de la reacción de disolución (corrosión) catalizó la reacción de trimerización del MIC, la cual también es de naturaleza exotérmica, dando lugar a un aumento considerable de la temperatura, hasta valores probablemente cercanos a los 200 °C, y de la presión (valores superiores a los 4.5 bars). Este incremento provocó, a 3.7 bars, la rotura del disco de ruptura, abriéndose la válvula de seguridad, la cual permaneció abierta durante unas dos horas. La instalación de lavado de gases no funcionó correctamente, con el agravante de que la antorcha que había en la planta para el quemado de los eventuales gases de salida estaba desmontada por mantenimiento. El resultado fue que aproximadamente 23 000 kg de MIC en forma líquida y en vapor fueron emitidos a la atmósfera.

En el residuo sólido que quedó en el depósito (50% de trimero) había un 0.18 a 0.26% de sales de hierro, cromo y níquel. Estos elementos se encontraban presentes aproximadamente en la misma proporción que en el acero inoxidable de que estaba construido el depósito. En total había unos 9 kg de estos metales en el residuo sólido.

Experimentos llevados a cabo en el laboratorio después del accidente dieron los resultados siguientes:

<i>mezcla</i>	<i>temperatura mm/año</i>	<i>velocidad de erosión</i>
MIC con 18 % cloroformo y 2-7% agua	100° C	0.25-0.50
MIC con 18 % cloroformo y 2-7% agua	200° C	43-89
MIC con 16 % cloroformo	ambiente	0.0046
MIC con 2.5 % cloroformo	ambiente	0.001
MIC con 0.5 % cloroformo	ambiente	0

Como puede verse en el cuadro anterior; el problema fue causado por la presencia de agua y un incremento significativo de la temperatura, debido precisamente a la misma presencia del agua, cuyo origen no fue esclarecido en el informe de las causas del accidente. [Tomado de *Bhopal Methyl Isocyanate Incident Investigation Team Report*, Union Carbide Corporation. Danbury, Conn. (1985).]

FALLAS EN CENTRALES NUCLEARES DEL TIPO BWR (AGUA EN EBULLICIÓN)

Las fallas por agrietamiento intergranular bajo tensión (IGSCC) en aceros inoxidables del tipo 304 y 316 son muy comunes en ciertos componentes de sistemas empleados para la transformación de energía. En la segunda mitad de la década de los setenta aparecieron serios problemas relacionados con el agrietamiento intergranular bajo sollicitación mecánica en tuberías de aceros inoxidables 304 y 316, empleadas en reactores nucleares del tipo de agua en ebullición (BWR). Las fallas se localizaban específicamente en las zonas afectadas por el calor resultante de un proceso de soldadura.

Se ha demostrado, a través de una investigación exhaustiva sobre las causas de estas fallas, que son el resultado de la interacción de tres factores: *a)* un esfuerzo de tensión (cercano al esfuerzo de procedencia), *b)* el medio acuoso, y *c)* la presencia de carburos de cromo precipitados a lo largo de los bordes de grano austenítico de un acero inoxidable. Esta precipitación deja, por lo general, zonas empobrecidas en cromo, las cuales son susceptibles de ser atacadas severamente en el medio en que se encuentra la aleación.

El ambiente de los reactores de agua en ebullición (BWR) consiste esencialmente de agua pura con un contenido de oxígeno que oscila entre 0.2 y 0.8 mg/l a una temperatura de 289 °C. Cuando el sistema se encuentra a temperaturas más bajas, esto es, durante periodos de arranque y paro, el nivel de oxígeno puede llegar al nivel más alto del intervalo indicado. Se ha comprobado que al aumentar el contenido de oxígeno disuelto, el resultado es un incremento en la corrosión intergranular bajo esfuerzo.

Se puede producir una microestructura sensibilizada en la misma sección plana del tubo cuando éste es unido a otro mediante soldadura. El material que se encuentra en una zona paralela, pero no adyacente al cordón de soldadura, es usualmente expuesto al intervalo de temperatura crítico de 430 a 870 °C. Bajo estas condiciones, puede tener lugar una precipitación mixta de carburos de cromo y hierro en los límites de grano austenítico, siendo éstos de preferencia ricos en cromo. Sin embargo, se ha demostrado en ensayos de laboratorio que se pueden producir cantidades significativas de carburos de cromo precipitados a temperaturas tan bajas como 289 °C, que corresponde a la temperatura normal de operación de los reactores del tipo BWR. La condición necesaria para que esta precipitación ocurra es que deben existir de antemano algunos precipitados de carburo de cromo que sirvan como núcleos. Estos pueden formarse previamente durante la soldadura o bien estar ya presentes en piezas que no hayan

sido recocidas de manera adecuada durante el proceso del conformado.

Durante las inspecciones de servicio a que son sometidos los sistemas y circuitos de las centrales nucleares de potencia se han detectado grietas en algunos lugares muy específicos. La aparición de grietas en las tuberías de acero inoxidable austenítico en los reactores tipo BWR ha tenido lugar desde la introducción de la primera planta comercial. Las grietas se localizan en la zona de calor afectada por la soldadura en las tuberías de aceros 304 y 316, debido a un mecanismo de corrosión intergranular bajo tensión (IGSCC). Aunque también se han detectado grietas en las centrales de agua a presión (PWR), en éstas la incidencia ha sido menor, ya que los componentes afectados en este caso son casi siempre del circuito secundario, y tienen una menor repercusión en la seguridad del reactor.

Los primeros problemas aparecieron en 1965, en la central nuclear Dresde I, al observarse una fuga en las líneas de seis pulgadas del *by-pass* de recirculación del agua del reactor; fabricado con acero austenítico tipo 304.

Desde entonces se han registrado numerosos casos, cada vez más en líneas mayores. Algunos de los más significativos, según el informe de la Comisión Nuclear Reguladora (NUREG CR-2541, febrero de 1982), son :

1965: En líneas de seis pulgadas del *by-pass* de recirculación. Dresde I.

1974: En líneas de cuatro pulgadas del *by-pass* de recirculación. Dresde II, Quad Cities II. En líneas de 10 pulgadas de las líneas de inyección del reactor; del sistema de refrigeración de emergencia del núcleo. Dresde II.

1976: En las líneas de accionamiento de las barras de control. Dresde III.

1978: En las ocho toberas de 10 pulgadas del sistema de recirculación. Duane Arnold. En líneas de 14 pulgadas del sistema de recirculación. Grundemmingen.

Desde julio de 1979, el número de incidentes debidos a grietas en las tuberías se ha incrementado significativamente a nivel mundial. Además, las grietas han aparecido también en tuberías de diámetros cada vez mayores, pero siempre de los mismos materiales, aceros inoxidables 304 y 316. En algunas centrales nucleares las grietas han aparecido de manera extensiva.

A partir de 1975 se observaron fisuras de este tipo (IGSCC) en las líneas de los sistemas de recirculación, *core spray* de limpieza de la vasija y de accionamiento de las barras de control, en algunos casos incluso en tuberías de diámetro elevado, 24 pulgadas, así como en las piezas de transición de las tuberías con las toberas de la vasija del reactor.

En la figura I.2 se presenta una comparación de los incidentes debidos a grietas en tuberías durante el periodo 1979-1983. Con el nombre de incidente debido a una grieta entendemos la identificación de las mismas basada en exámenes llevados a cabo mediante ultrasonidos, líquidos penetrantes, metalografía destructiva o el reporte de fugas. Los sistemas de tuberías afectados en los reactores tipo BWR incluyen las líneas de recirculación, eliminación del calor residual, limpieza del reactor; condensador de aislamiento y sistema de retorno de las barras de control. Los diámetros de las tuberías afectadas oscilan entre las 3 y las 28 pulgadas (75 y 710 mm).

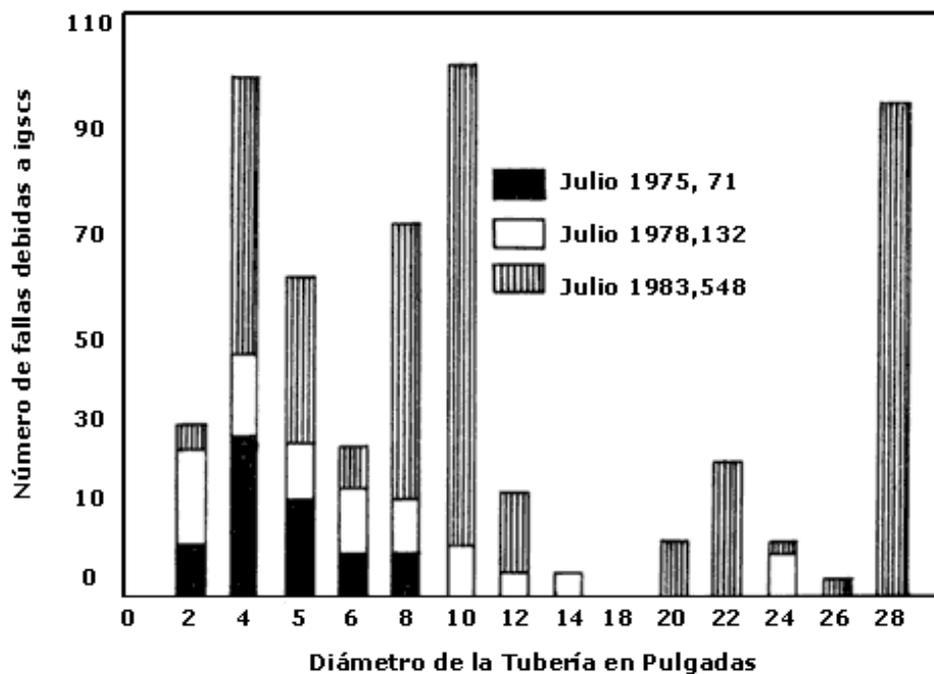


Figura I.2 Fallas por agrietamiento de tuberías en el mundo.

A la vista de la importancia del tema, todos los implicados acometieron el estudio del problema, llegando a crearse incluso un *Pipe Crack Study Group por la Nuclear Regulatory Commission (NRC)* en 1975, cuyos objetivos primordiales eran los siguientes:

- Investigar las causas de las grietas.
- Analizar la influencia de las fisuras sobre la seguridad de la planta.
- Establecer un programa de actuación para las plantas en funcionamiento.
- Hacer recomendaciones a las plantas a nivel de diseño o de construcción, tendientes a la eliminación total del problema o a su reducción.

El tema fue incluido en la lista de asuntos de seguridad no resueltos (*Unresolve Safety Issues, USI*) con el número A-42.

Tanto la NRC como la General Electric, el principal Licenciatario de los BWR, publicaron sus primeras conclusiones en 1975, en la elaboración de las cuales intervino también el *Electric Power Research Institute (EPRI)*, principal asociación de propietarios de centrales nucleares de potencia.

Tras estos estudios se concluyó que la mayoría de los defectos eran grietas, debidas a corrosión intergranular bajo tensión (IGSCC), que afectaban principalmente a la zona afectada térmicamente de las soldaduras de los aceros inoxidables austeníticos, con especial incidencia en el tipo 304.

Se estableció que para la existencia de este fenómeno era necesario que confluyeran simultáneamente tres factores esenciales:

- Sensibilización del material.
- Concentración elevada de tensiones (esfuerzos locales altos).
- Medio agresivo.

El informe *Nureg 531, Investigation and Evaluation of Stress Corrosion Cracking in Piping of Light Water Reactor Plants*, publicado en febrero de 1975, recomienda medidas dirigidas a reducir cada uno de estos factores en la mayor medida posible. Los estudios se dirigieron a resolver estos problemas por separado, aunque la solución más

eficaz sería atenderlos todos a la vez.

Paralelamente, el proyectista (General Electric) modificó su diseño eliminando aquellos puntos de remanso en los que pudieran acumularse las impurezas y cambiando los materiales austeníticos del tipo 304 por otros no susceptibles a la corrosión intergranular; así como desarrollando técnicas para mejorar el rendimiento de los ya instalados.

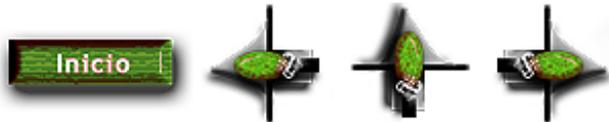
Los esfuerzos dedicados a solucionar los dos primeros factores han sido fructíferos, llegando incluso a poder retirar el tema de la lista de asuntos no resueltos de la NRC , tras la publicación del informe *Nureg 0313 Rev. 1*, octubre de 1979: *Technical Report on Materials Selection and Processing Guidelines for BWR Coolant Pressure Boundaring Piping*, que recoge las conclusiones y recomendaciones finales de la NRC (7).

BIBLIOGRAFÍA

1. J. Genescá y J. Ávila, "Aspectos socioeconómicos de la corrosión", *Información Científica y Tecnológica* (CONACYT) . 10 (137) 97-49(1988)
2. J. Genescá y J. Ávila, "Corrosión de aceros inoxidable austeníticos", en *Revista de Corrosión* (AMIC) , 3(7)23(1992).
3. *Offshore Accident Review*, O. Fagerjord, vol. 3, Núm. 2, p.8, 1985.
4. G. Gavelli, C. Scala y V. Colombari, *Reliability of Engineering Materials*, Eds. A. L. Smith, Butterworths, Londres, 1982, p.115.
5. A. Romano, N. Piccinini y G. C. Bello, *Ingeniería química*, pp. 200, 211, 1985.
6. *Bhopal Methyl Isocyanate Incident Investigation Team Report*, Union Carbide Corporation, Danbury, Conn., 1985.

Para mayor información sobre el tema, consúltense las siguientes publicaciones:

7. J. C. Danko, "Boiling water reactor research on pipe cracking", en *Materials Performance* 24 (5), pp. 14-17, 1985; "Corrosión en la industria nuclear", número monográfico de la Revista Iberoamericana Corrosión y Protección 16 (1), enero-febrero 1985, que incluye: A. Sala y C. Ranniger "Acciones contra la corrosión intergranular bajo tensión en reactores de agua en ebullición", pp. 17-22; F. Casas, "Influencia de la química del agua en la corrosión intergranular en sistemas de reactores de agua en ebullición", pp. 23-25; J. A. Rescalvo y E. Naval, "Agrietamientos intergranulares por corrosión-tensión en BWRs . Causas, mecanismos y remedios", pp. 28-32, y A. Portolés, J. R. Ibars y C. Ranniger; "Influencia de los tratamientos térmicos en la corrosión de los aceros inoxidable austeníticos estabilizados con titanio", pp. 33-40.



II. EFECTOS DEL MEDIO AMBIENTE EN LA CONSERVACIÓN DE BIENES Y EQUIPOS METÁLICOS

LA CORROSIÓN atmosférica, que es la causa más frecuente de la destrucción de metales y aleaciones, es posible únicamente cuando la superficie metálica está humedecida. El mecanismo de corrosión es de naturaleza electroquímica.

El electrolito es una capa de humedad que unas veces es extremadamente delgada e invisible y otras moja perceptiblemente el metal. La corrosión depende del tiempo en que esta capa permanece sobre la superficie metálica.

Los contaminantes gaseosos y sólidos potencian el efecto corrosivo de los factores meteorológicos. Así, el proceso de corrosión depende fundamentalmente de la humedad relativa del aire y de los contaminantes presentes en el mismo.

El cloruro de sodio (**NaCl**) y el dióxido de azufre (**SO₂**) son los principales contaminantes corrosivos en la atmósfera. El primero es un contaminante "natural" y llega a la atmósfera proveniente del mar (atmósfera marina). El **SO₂** se encuentra en el aire, y es originado principalmente por la combustión de combustibles fósiles. Los niveles más altos de contaminación sulfurosa se registran en las áreas industriales (atmósfera industrial) y en las grandes ciudades (atmósfera urbana). El grado de contaminación salina depende de la distancia al mar. Más allá de unos pocos cientos de metros del borde del mar, la salinidad y la velocidad de corrosión suelen decaer ostensiblemente.

La humedad relativa es importante en el grado de corrosión atmosférica. El hierro desnudo no se corroe en zonas urbanas ni industriales con una humedad relativa (HR) ambiente menor de 70%. La humedad crítica está asociada con la naturaleza higroscópica del sólido contaminante presente, como la de los productos de corrosión. Sus valores oscilan entre el 50 y el 70% en el acero, cobre, níquel y zinc.

Las partículas de polvos en suspensión en la atmósfera, en conjunción con la humedad, forman celdas de corrosión por aireación diferencial en la superficie. A través de la absorción de **SO₂** también pueden acelerar la corrosión en la zona de contacto con el metal.

Tanto la exposición directa como el resguardo de la lluvia pueden ser beneficiosos o perjudiciales. El agua de lluvia puede lixiviar inhibidores solubles de revestimientos protectores, así como productos de corrosión con características similares.

Otro tipo de contaminantes que pueden estar presentes en ciertas atmósferas son los vapores de ácidos orgánicos de tipo alifático (fórmico, acético, propiónico, etc.), originados por degradación de algunas maderas, plásticos, gomas y pinturas, y constituyen otra fuente de corrosión atmosférica. En atmósferas húmedas concentraciones muy bajas de estos compuestos, hasta de 0.1 partes por millón (ppm) resultan agresivas para algunos metales.

Afortunadamente, la que podríamos llamar "corrosión por vapor" se encuentra sólo en atmósferas confinadas (interior de equipos, envoltorios de embalaje, etcétera).

MÉTODOS DE CONTROL

Por lo dicho hasta el momento, es evidente que la forma más efectiva de disminuir la corrosión atmosférica sería a través de la eliminación de las sustancias agresivas y en especial del **SO₂**. Como esto no puede realizarse en equipos y estructuras situados en zonas industriales, se requiere, por lo tanto, de técnicas de protección adecuadas. En interiores, el aire acondicionado mantenido continuamente puede asegurar una atmósfera filtrada, limpia y seca, con una humedad relativa baja, pero su interrupción (por ejemplo, durante la noche) puede causar condensación de agua con la consiguiente iniciación de la corrosión.

Cabe señalar que un material resistente al ataque de un determinado tipo de atmósfera no necesariamente será resistente a otra. Existen diferentes tipos de recubrimientos para proteger especialmente al acero de la corrosión atmosférica. Por otra parte, también hay metales y aleaciones que son muy resistentes. Así, los aceros inoxidables y

el aluminio, que tienen buena resistencia a la corrosión en atmósferas industriales, urbanas y rurales, no la tienen en las marinas.

Pequeñas cantidades de *aleantes* como cobre, fósforo, níquel y cromo incorporados al acero aumentan considerablemente su resistencia a la corrosión atmosférica. Algunos aceros de este tipo son los llamados *autopasivables*, por formar con el medio películas protectoras, adherentes, de composición compleja. Por lo tanto, no requieren de recubrimientos de pintura, la principal protección contra la corrosión atmosférica utilizada para el acero. Estos aceros *autopasivables* se emplean en la construcción de puentes, estructuras para edificios, etc., pero no en interiores, ya que al abrigo de ciertos componentes atmosféricos no forman dichas películas pasivantes.

Para proteger al acero descubierto en lugares inaccesibles (embalajes, componentes internos de maquinaria, etc.) se usan inhibidores volátiles o en fase vapor. Los más comunes son el carbonato de ciclohexilamina (con gran poder inhibidor, pero de bajo tiempo de protección por su alta presión de vapor) y el nitrito de dicitohexamina. Estos compuestos actúan por evaporación lenta, depositándose sobre la pieza de acero como una película protectora. Sin embargo, algunos de ellos corroen los metales (cobre, zinc y cadmio) que pueden estar junto al acero. Su acción es efectiva si los envoltorios están sellados adecuadamente, si los componentes metálicos no se encuentran ya corroídos y si la presión parcial del inhibidor volátil es suficiente.

CONSERVACIÓN DE EQUIPOS DURANTE EL ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE

Un producto metálico o formado por partes metálicas, como maquinaria, instrumentos de precisión, aparatos ópticos, aparatos eléctricos y electrónicos y otros muchos, puede sufrir daños por corrosión durante el transporte y almacenamiento, antes de ser utilizado, a menos que se proteja adecuadamente en los ambientes húmedos, con altas temperaturas y niveles de contaminación, en los que puede situarse temporalmente. El daño puede convertirlo en un producto totalmente inadecuado o, simplemente, puede crear problemas estéticos. En cualquier caso, la comercialización del producto se dificulta. La exportación de artículos supone, a menudo, largo tiempo de transporte y almacenamiento. El peligro de daño por corrosión existe sobre todo en los envíos por vía marítima. Una inadecuada protección puede echar por tierra los mayores y más cuidadosos esfuerzos de producción.

En general, puede producirse corrosión en el lapso que media entre la fabricación y utilización de un equipo por las siguientes causas: *a)* una contaminación con productos corrosivos durante el procesado y manejo, *b)* el uso de materiales de embalaje que contengan sustancias corrosivas, y *c)* una protección inadecuada contra la corrosión atmosférica.

Las características del medio ambiente que actúan sobre los embalajes durante su manejo, almacenamiento y transporte son, en general, considerablemente mayores que las que actúan sobre los mismos productos metálicos. Con el fin de disminuir los daños provocados por estas influencias ambientales, deben adoptarse técnicas de embalaje adecuadas y de protección temporal contra la corrosión. Esta protección se consigue normalmente de la siguiente manera: *a)* mediante la regulación del clima, ventilación, deshumidificación, etc., *b)* mediante la utilización de sustancias anticorrosivas, que producen películas protectoras, *c)* mediante embalajes adecuados, utilizando papeles impregnados con inhibidores de corrosión, desecantes o productos inhibidores volátiles de corrosión, y *d)* mediante la utilización simultánea de alguno de los métodos anteriores (figuras II.1 y II.2)

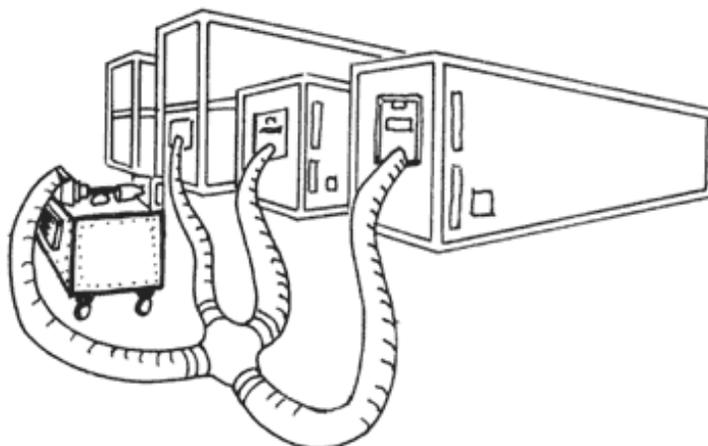


Figura II.1 Deshumidificación de contenedores.

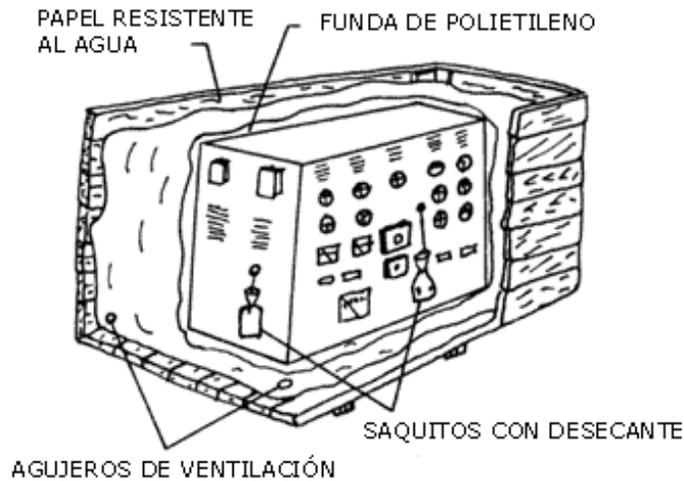


Figura II.2. Esquema de embalaje con uso de desecantes

DURABILIDAD DE LOS AUTOMÓVILES

El efecto del medio ambiente en la vida de los automóviles es otro ejemplo de la influencia del medio ambiente sobre la conservación de bienes metálicos. La crisis económica y el aumento en los precios han convertido al automóvil en un bien duradero. Las estadísticas muestran que la edad media del parque de automóviles se está elevando en muchos países. Por otro lado, el deterioro por corrosión de la estructura del vehículo aumenta las posibilidades de accidentes. La corrosión puede afectar a partes vitales, como los elementos de dirección, suspensión y sistema de frenos.

La presencia de contaminantes en el aire (especialmente SO_2 y cloruros) repercutan de manera decisiva tanto en la corrosión cosmética como en la corrosión perforante y en la estructura del automóvil. La corrosión del vehículo es muy sensible a la cantidad de cloruros de las atmósferas marinas y de sal añadida a las carreteras en lugares fríos. La presencia de cloruros incrementa los peligros de corrosión en resquicios y la formación de picaduras, y acelera el deterioro de los recubrimientos de pintura, así como del metal subyacente.

El progreso de la corrosión depende de las circunstancias ambientales del lugar donde se utiliza el coche (Figura II.3). Las mayores corrosiones ocurren en el norte y centro de Europa y en la región noreste de Estados Unidos, debido a la gran cantidad de productos químicos para derretir la nieve utilizados en estas áreas durante el invierno. Las áreas señaladas en el mapa de la figura II.3 también son muy corrosivas, y corresponden a atmósferas calientes, húmedas y salinas. La corrosión es moderada en otras áreas. Las condiciones ambientales altamente corrosivas coinciden con las áreas donde se utiliza una mayor cantidad de automóviles.

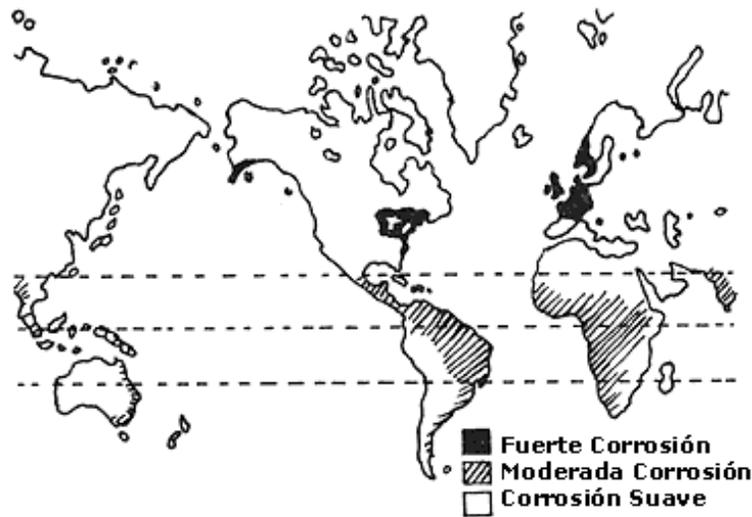


Figura II.3. La corrosión depende de la parte del mundo donde se utiliza el coche.

El microclima que se forma dentro de un coche tiene también gran importancia en su conservación. La HR depende de la temperatura del aire, de modo que cuanto menor sea ésta tanto menor será la cantidad de agua que el aire puede contener sin condensarla. Por esta razón se forman gotas de humedad sobre el parabrisas al introducir un coche frío en un garaje caliente: el aire de éste se enfría en contacto con la superficie externa del cristal, condensando la humedad. Por el contrario, la humedad se condensa dentro del coche si se saca éste del garaje en tiempo frío: la humedad del aire dentro del coche es ahora la que se condensa sobre la superficie interior del parabrisas y de los paneles de la carrocería rápidamente enfriados. De esta manera pueden llegar a acumularse cantidades notables de agua dentro del coche, debajo del tapizado. Algunas veces el metal se perfora en tan sólo dos años si el coche se guarda en un garaje húmedo, mal ventilado, y se somete a frecuentes lavados.

En sitios muy fríos la corrosión de los coches es mayor dentro de los garajes calientes y húmedos que en la calle, donde, al congelarse la humedad, el proceso corrosivo se detiene.

Cuando el pavimento está mojado, el agua lanzada a gran velocidad por las ruedas del coche contra la propia superficie metálica (figura II.4) produce minúsculas gotas de agua que forman una especie de niebla. Debido a pequeños cambios de presión, esta niebla es arrastrada dentro de los cuerpos huecos interconectados, depositando en ellos las sales disueltas y agregados insolubles que favorecen la corrosión.

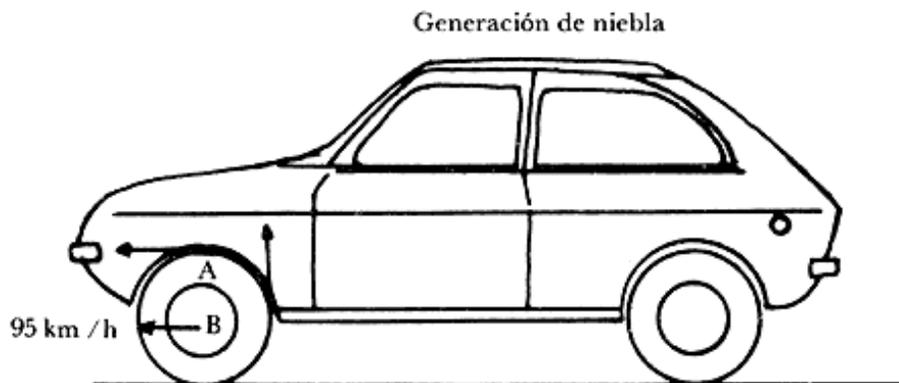


Figura II.4 La pulverización producida por las ruedas delanteras es aspirada dentro de la estructura (cuerpo hueco) del coche.

El tipo de corrosión más común en los coches es una combinación de corrosión en resquicios y de ataque bajo depósito. Los resquicios y depósitos de polvo y barro retienen la humedad mucho más tiempo que el resto de la

superficie, lo que favorece la actuación de pilas de aireación diferencial. Estos resquicios se producen invariablemente en las uniones entre planchas metálicas, en los refuerzos de la carrocería y en diversos puntos de fijación, por lo cual es imposible evitarlos en la soldadura por puntos. El polvo de la carretera, la suciedad y la humedad se acumulan en cavidades y resquicios (Figura II.5) y dentro de los miembros de refuerzo de la estructura. Las concavidades, perfiles en U mirando hacia arriba o ángulos frente a nerviaciones son lugares en que se amontona la suciedad que causa el ataque bajo depósito. El volumen de agua lanzado por las ruedas está asociado a agregados insolubles y barro que se depositan en estratos en los bajos del coche, los cuales solidifican sobre los faros delanteros y los montajes de las luces laterales, y en el umbral y soporte de las luces delanteras. El uso de sales de deshielo durante el invierno crea problemas adicionales muy graves para la durabilidad y seguridad del vehículo.

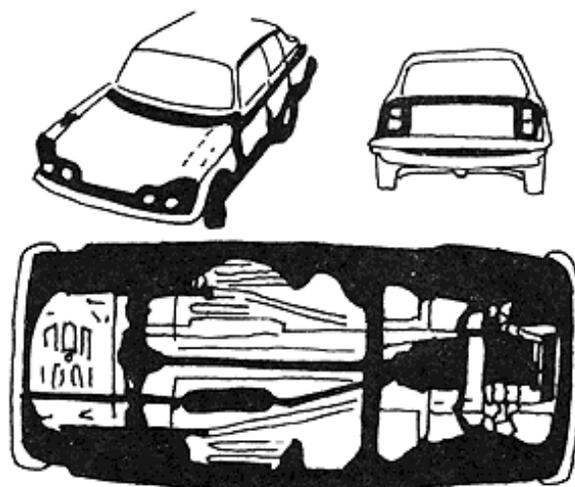


Figura II.5 Mecanismo de corrosión en la zona de retención de agua y polvo.

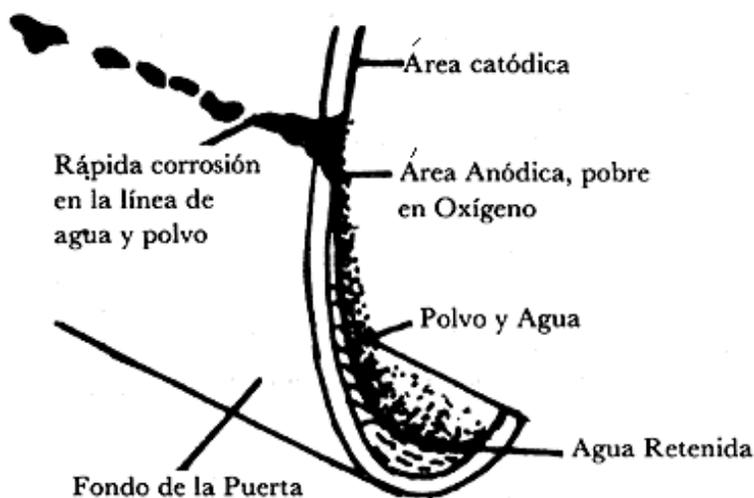


Figura II.6 Áreas de un coche más propensas a la corrosión.

EFFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA VIDA DE LOS RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

INTRODUCCIÓN

Para proteger los metales expuestos a la atmósfera, se recurre a menudo a las aplicaciones de recubrimientos, que pueden ser de distinta naturaleza: de pintura, metálicos, de conversión, etc. La capacidad protectora de estos recubrimientos disminuye con el tiempo en función de una serie de variables, entre las que ejerce un papel principal la contaminación atmosférica. Por lo tanto, para el proyecto de un sistema de protección es de gran utilidad disponer de datos cuantitativos sobre el efecto de la contaminación atmosférica en la vida del recubrimiento protector. Desafortunadamente, esta información es escasa.

Así como el efecto de los contaminantes en la corrosión de metales desnudos ha sido extensamente experimentado, son muy reducidos los trabajos en que se plantee el establecimiento de relaciones cuantitativas entre las variables de contaminación y el comportamiento del recubrimiento protector.

En general, la información disponible revela la intervención decisiva de los contaminantes en la durabilidad del recubrimiento protector. A continuación haremos referencia únicamente a dos recubrimientos típicos para la protección del acero: pintura y galvanización en caliente. Aunque existe poca información cuantitativa sobre el efecto de la contaminación en el comportamiento de estos recubrimientos, nos interesa mostrar la importancia de sus efectos y la necesidad de tenerlos en cuenta.

RECUBRIMIENTOS DE PINTURA

Al igual que en la corrosión atmosférica de los metales desnudos, el comportamiento de los recubrimientos de pintura expuestos a la atmósfera depende del tiempo de humectación de la superficie pintada y de la contaminación ambiental. No obstante, a diferencia del metal desnudo, la estabilidad de los sistemas de pintura puede verse afectada en grado importante por otros factores, como la acción de la luz solar (en particular la radiación ultravioleta), el ozono, la acción microbiológica, el desgaste por erosión, etc., cuya importancia no ha sido totalmente dilucidada.

No contamos con muchos datos experimentales sobre el efecto de las variables climáticas en la vida de los recubrimientos de pintura aplicados al acero. Se ha señalado (Bibliografía, 1-5) la importancia de la cantidad de lluvia y, posiblemente, del tiempo de humectación, así como de la presencia de contaminantes en la atmósfera (SO_2 , cloruros, ozono, etc.). El cuadro II.1 muestra cómo se reduce la vida de un sistema de pintura al pasar de una atmósfera rural a otra urbana de moderada contaminación sulfurosa. El cuadro II.2 reproduce los resultados de una encuesta realizada por Keane (6) en los departamentos de obras públicas de los diferentes estados norteamericanos. Se observa que la durabilidad del recubrimiento de pintura decrece marcadamente conforme aumenta la agresividad atmosférica. En otro intento de relacionar la contaminación atmosférica con la duración del sistema de pintura, el cuadro II.3 presenta los resultados de un estudio que el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas de Madrid, España, realiza en la actualidad (7), y que confirma el efecto de la agresividad ambiental en el deterioro del recubrimiento de pintura. En este sentido, es de particular importancia la contaminación por cloruros (atmósfera marina).

CUADRO II.1. Efecto de la contaminación, principalmente por SO_2 , en la duración de un sistema de pintura alcídico con cromato de zinc, de 80 micras de espesor (8).

<i>Tipo de atmósfera</i>	<i>Duración del recubrimiento (en años)</i>
Rural (Falhult, Suecia)	10
Urbana (Estocolmo)	8

CUADRO II.2. Resultados de una encuesta realizada a los departamentos norteamericanos de obras públicas sobre la durabilidad de los sistemas de pintura en las diferentes atmósferas.

<i>Tipo de atmósfera</i>	<i>Durabilidad del sistema de pintura (número de respuestas)</i>			
	10 años	7-9 años	4-6 años	1-3 años

Normal	21	12	3	-
Seca	12	3	1	-
Húmeda	3	4	8	3
Urbana o industrial	6	8	4	1
Marina o química	-	4	9	9

CUADRO II.3. Variación con el tiempo del grado de oxidación del sistema clorocaucho en distintas atmósferas. Preparación de superficie BSt 2. Espesor de película: 60 micras.

<i>Tipo de atmósfera</i>	<i>Agresividad atmosférica (corrosión de metales desnudos)</i>		<i>Grado de oxidación de la superficie pintada (% superficie oxidada)</i>	
	<i>Acero, $\mu\text{m}/\text{año}$</i>	<i>Zinc, $\mu\text{m}/\text{año}$</i>	<i>Primer año</i>	<i>Segundo año</i>
Rural	14.7	0.94	0	0
Urbana	27.9	0.78	0	0
Industrial	52.7	2.05	0	0.3
Marina	62.6	4.13	1	16

RECUBRIMIENTOS DE ZINC

Los recubrimientos de zinc, que se realizan generalmente mediante la inmersión en caliente, son, después de los recubrimientos de pintura, los más utilizados en la protección anticorrosiva de grandes estructuras de acero. Puede obtenerse una idea del desgaste medio de este recubrimiento metálico a partir de los datos sobre corrosión del zinc en la atmósfera (Cuadro II.4), sobre los cuales existen abundantes referencias (8).

CUADRO II.4. Velocidades representativas de la corrosión del zinc en distintas atmósferas.

<i>atmósfera</i>	<i>Corrosión (micras/año)</i>
Rural	0.8 — 1.2
Urbana	1 — 2
Industrial	2 — 10
Marina	4 — 14

Es muy importante relacionar la vida del recubrimiento con el cociente entre el espesor de la capa de zinc y su velocidad de corrosión. Sin embargo, el ataque no progresa uniformemente, por lo que cabe esperar la desaparición (perforación) del recubrimiento en unos puntos cuando en otros queda todavía un espesor apreciable de zinc. Aunque el zinc contiguo al área descubierta aporta todavía protección catódica al acero, la desaparición local del recubrimiento marca el inicio de una etapa peligrosa para la futura integridad del acero base. Por ello, este

momento puede ser considerado como el límite práctico de la vida del recubrimiento protector. Para conocer el tiempo que transcurrirá hasta la perforación del recubrimiento necesitaríamos poseer información acerca de la relación (R) entre la profundidad de las picaduras más profundas y la penetración media del ataque, información que no se obtiene con facilidad. En una investigación realizada en Estados Unidos (9) se han encontrado los siguientes valores:

<i>Atmósfera</i>	<i>Corrosión media (en micras/año)</i>	<i>Valor de (R)</i>
Fuertemente marina (Kure Beach)	3.9	4
Marina (Punta Reyes)	1.4	9
Industrial (Newark)	3.5	1.3

Estos valores parecen apuntar hacia valores normales de tres y mayores para la relación (R). En este caso el ataque corrosivo perforará la capa de zinc en tiempos del orden de un tercio, y aun menores de los calculados, en el curso de un ataque uniforme.

BIBLIOGRAFÍA

1. I. R. Rischbieth y KR. Bussell, *JOCCA* 44 (6) 351, 1961.
2. I. D. Singh, *J. Sci. Tech.* 10-A (2) 94, 1972.
3. V. Kucera, *Ambio* 5 (5-6) 243, 1976.
4. G. G. Campbell *et. al.*, *J. Paint Technology* 46 (593) 59, 1974.
5. J. W. Spence *et. al.*, *J. Paint Technology* 47 (609) 57, 1975.
6. J. D. Keane, "Protective coatings for highway structural steel", *NCHRP Report núm. 74*, 1969. SSPC, Pittsburgh.
7. M. Morcillo *et. al.*, *Rev. Iber. Corros. Prot.* 15 (3) 37, 1984.
8. S. Felú y M. Morcillo, *Corrosión y protección de los metales en la atmósfera* (1, Ed. Bellaterra, Barcelona, 1982.
9. S. R. Dunbar y W. Showak; *Atmospheric Corrosion*, W.H. Ailor (comp.), John Wiley, Nueva York, 1982.



III. CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

UNO de los factores que determina primariamente la intensidad del fenómeno corrosivo en la atmósfera es la composición química de la misma. El SO_2 y el NaCl son los agentes corrosivos más comunes de la atmósfera. El NaCl se incorpora a la atmósfera desde el mar. Lejos de éste, la contaminación atmosférica depende de la presencia de industrias y núcleos de población, siendo el contaminante principal por su frecuencia de incidencia sobre el proceso corrosivo el dióxido de azufre (SO_2), proveniente del empleo de combustibles sólidos y líquidos que contienen azufre.

PROCESO DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

La corrosión atmosférica es la causa más frecuente de la destrucción de los metales y aleaciones.

El mecanismo de corrosión es de naturaleza electroquímica. El electrolito es una capa de humedad sobre la superficie del metal cuyo espesor varía desde capas muy delgadas (invisibles) hasta capas que mojan perceptiblemente el metal. La duración del proceso de corrosión depende sobre todo del tiempo durante el cual la capa de humedad permanece sobre la superficie metálica.

Como el mecanismo de corrosión es electroquímico, su característica principal es la presencia de un proceso anódico y otro catódico, con un electrólito de resistencia óhmica determinada.

En el proceso anódico el metal se disuelve en la capa del electrolito, en la cual la concentración se eleva hasta la precipitación de un compuesto poco soluble.

En el proceso catódico, bajo la capa de humedad, la mayoría de los metales expuestos a la atmósfera se corroen por el proceso de reducción de oxígeno.

La resistencia óhmica entre las zonas anódica y catódica de las minúsculas pilas de corrosión que se distribuyen sobre el metal es grande cuando el espesor de la capa de humedad es pequeño.

La corrosión atmosférica puede ser clasificada en:

- a) Corrosión seca. Se produce en los metales que tienen una energía libre de formación de óxidos negativa.
- b) Corrosión húmeda. Requiere de la humedad atmosférica, y aumenta cuando la humedad excede de un valor crítico, frecuentemente por encima del 70%.
- c) Corrosión por mojado. Se origina cuando se expone el metal a la lluvia o a otras fuentes de agua.

FACTORES QUE AFECTAN LOS PROCESOS DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

La acción conjunta de los factores de contaminación y los meteorológicos determinan la intensidad y naturaleza de los procesos corrosivos, y cuando actúan simultáneamente, aumentan sus efectos. También es importante mencionar otros factores como las condiciones de exposición, la composición del metal y las propiedades del óxido formado, que combinados entre sí influyen en los procesos de corrosión.

Influencia de las condiciones meteorológicas en los procesos de corrosión

La característica atmosférica más importante que se relaciona directamente con el proceso de corrosión es la humedad, que es el origen del electrolito necesario en el proceso electroquímico.

La figura III.1 muestra la relación que existe entre la corrosión atmosférica y el espesor de la capa del electrolito sobre la superficie metálica. Se observa que en espesores pequeños la corrosión no existe, pues la resistencia óhmica de la capa del electrolito sobre la superficie metálica es muy grande y la disolución del metal es difícil. Al aumentar el espesor disminuyen la resistencia de la capa del electrolito y la polarización catódica, lo que origina un aumento en la velocidad de corrosión hasta que alcanza un nivel máximo, que disminuye después con el aumento

del espesor. En esta zona, la reacción catódica es determinante en el proceso de corrosión; el factor óhmico y la polarización anódica pierden importancia, pues la difusión de oxígeno en la superficie metálica es muy lenta y por tanto determinante del proceso global.

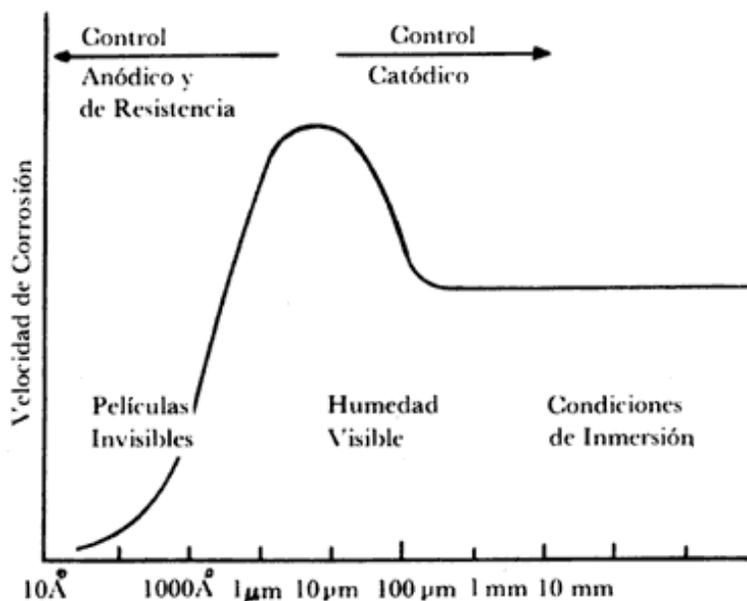


Figura III.1. Influencia del espesor de la película de humedad condensada sobre la superficie metálica en la velocidad de corrosión.

Esto nos permite comprobar la importancia del conocimiento de las causas y los factores que influyen en la formación de películas de humedad sobre la superficie metálica. La causa más importante es la precipitación atmosférica (en forma de lluvia o niebla espesa).

Existe también la condensación de humedad, que se origina cuando la humedad relativa de la atmósfera sobrepasa el 100%. Es importante mencionar también la condensación por adsorción, la condensación capilar y la condensación química.

Influencia de la contaminación atmosférica en los procesos de corrosión

Cuando se alcanza el nivel de humedad necesario para la formación de pilas de corrosión, comienza a ser importante un segundo factor: *de contaminación atmosférica*.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Se puede definir la contaminación atmosférica como "la presencia en el aire de sustancias extrañas, sean éstas gaseosas, sólidas o la combinación de ambas, en cantidad y durante un tiempo de permanencia que puede provocar efectos nocivos para la salud humana y un deterioro de los bienes de uso y del paisaje"

En relación a su toxicidad, los contaminantes producen efectos nocivos en el ser humano y su medio ambiente, como irritación en los ojos, nariz y garganta. Además, atacan a muchos metales y materiales de construcción, deterioran equipo eléctrico, superficies pintadas, etcétera.

Los contaminantes atmosféricos de mayor importancia son: partículas suspendidas totales, ozono, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre.

Los agentes contaminantes inorgánicos son generados por los vehículos y las industrias; los orgánicos, por los basureros. Las centrales termoeléctricas, las refinerías y las fábricas de papel contribuyen con el 85% del SO_2 en la atmósfera; los automóviles con un 95% de CO, en el caso de la ciudad de México (Margarita Ocampo, "Inversión térmica y contaminación", *Información Científica y Tecnológica* 8 (115) 19-21, 1986).

Esto implica, por consiguiente, la necesidad de medir la cantidad de los distintos contaminantes dispersados dentro de la capa de aire. Lo anterior puede lograrse usando equipo adecuado o mediante el uso de los modelos de difusión

de gases contaminantes.

La concentración de los contaminantes se mide en partes por millón (ppm o mg/m³) o en microgramos por metro cúbico (µg/m³). Cada contaminante tiene un tiempo específico de exposición.

En la zona metropolitana existe un conjunto de estaciones automáticas llamado Red Automática de Monitoreo Atmosférico del Valle de México, en el que se incluyen varios aparatos, tanto meteorológicos como para medir diferentes contaminantes. Las estaciones están ubicadas donde se espera que se produzcan los índices más altos de contaminación. Cabe mencionar que la concentración de los contaminantes varía de acuerdo con la zona de exposición y con el avance del día.

Se analizan cinco de los contaminantes para los que existen normas de calidad bien establecidas en Estados Unidos y Canadá. Estos son: dióxido de azufre, monóxido de carbono, ozono, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas totales y finas e hidrocarburos. Desafortunadamente, existen limitaciones en cuanto al equipo necesario para la determinación de todos los contaminantes.

Con la información recabada se elabora el "Índice Metropolitano de la Calidad del Aire" (IMECA). El nivel de contaminación va de cero a 500, como se muestra en el cuadro III.1. La unidad de contaminación se expresa en puntos IMECA.

CUADRO III.1. Significado del IMECA

<i>Categorías (puntos)</i>	<i>Calidad del aire</i>	<i>Riesgos para la salud</i>
I. 0 a 50	Buena	Situación muy favorable para la realización de todo tipo de actividad.
II. 51 a 100	Satisfactoria	Situación favorable para la realización de todo tipo de actividad.
III. 101 a 200	Insatisfactoria	Molestias en personas sensibles.
IV. 201 a 300	Deficiente	Aumento de molestias e intolerancias relativas al ejercicio en personas con padecimientos cardiorrespiratorios y aparición de molestias en la población en general.
VI. 401 a 500	Muy mala calidad	Aparición de síntomas agudos en la población, primeras muertes.
VII. 501 a 1 000	Pésima Calidad	Aparición de enfermedades e incremento crítico en las tasas de morbilidad y mortalidad

FUENTE: Tecnoconsult: Corporation International, *El Índice Metropolitano de Calidad del Aire*, México, 1998

También se han establecido normas mexicanas dentro de los rangos aceptados internacionalmente. El cuadro III.2 describe las normas de calidad de aire para los cinco contaminantes atmosféricos más importantes.

CUADRO III.2. Puntos de quiebra para el IMECA

IMECA	50	100	200	300	500	UNIDAD
Partículas suspendidas totales (Promedio de 24 horas)	137	275	456	637	1 000	$\mu\text{g} / \text{m}^3$
Bióxido de azufre (SO_2) (promedio de 24 horas)	0.06	0.13	0.35	0.56	1.0	ppm
Partículas suspendidas totales SO_2 (promedio de 24 horas) ppm x $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-	23	91	171	
Ozono (O_3) (promedio de 1 hora)	0.05	0.11	0.23	0.35	0.60	ppm
Monóxido de carbono (CO) (Promedio de 8 horas)	6.5	13	22	31	50	ppm
Bióxido de nitrógeno (promedio de 1 hora)	0.10	0.21	0.66	1.10	2.00	ppm

PRINCIPALES CONTAMINANTES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

El NaCl y el SO_2 son los principales contaminantes corrosivos de la atmósfera. La correlación entre los niveles de concentración de SO_2 o NaCl y la velocidad de corrosión es alta, Como se muestra en la figura III.2. También es importante mencionar al sulfuro de hidrógeno, que es el responsable del deslustre de cobre y plata, los compuestos nitrogenados que en solución incrementan la humedad en la superficie de los metales, las partículas inertes (silicio) y las partículas absorbentes (carbón de leña).

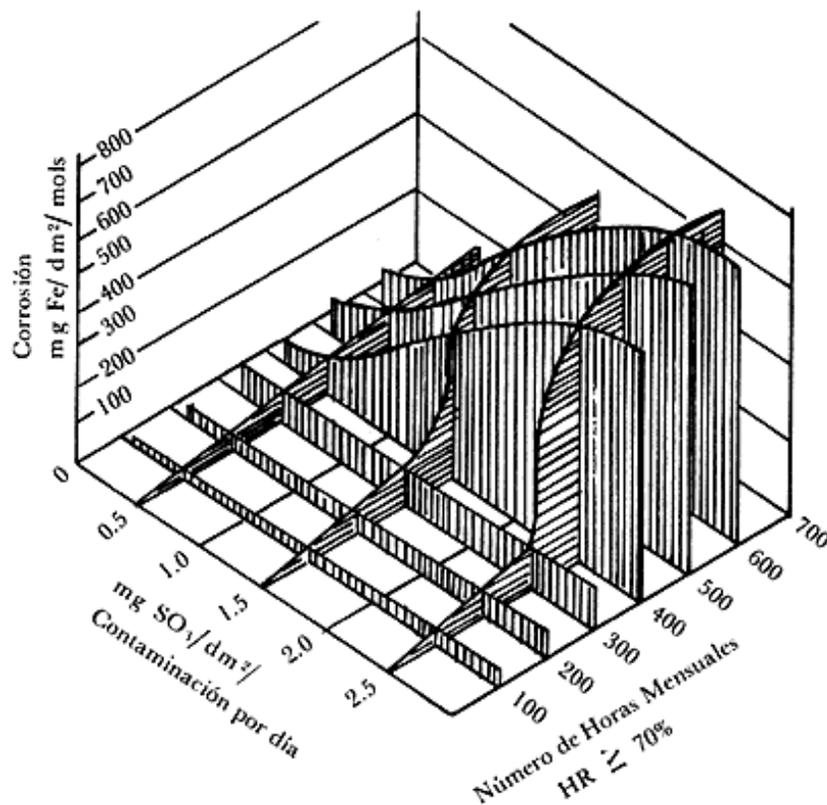


Fig. III.2. Relación de la velocidad de corrosión del hierro con la contaminación y la humedad atmosférica.

Entre todos estos contaminantes, el SO_2 tiene una importancia especial en los procesos de corrosión atmosférica, a causa de su incidencia directa en la velocidad de corrosión de los metales expuestos a la atmósfera.

Los metales no ferrosos consumen SO_2 en las reacciones de corrosión, y sus productos principales son los sulfatos metálicos, mientras que en la oxidación del hierro y del acero los sulfatos ferrosos son hidrolizados formando

óxidos y generando ácido sulfúrico.

Una característica importante del SO_2 es que es más soluble que el oxígeno, lo cual origina que cuando se producen concentraciones muy bajas en la atmósfera pueden obtenerse películas de humedad sobre la superficie metálica con altas concentraciones de SO_2 , lo cual ocasiona el deterioro de la misma. Esto tiene una gran importancia, ya que estudios atmosféricos basados en técnicas de química analítica y en computadoras de alto poder resolutivo han llegado a la conclusión de que la composición de la atmósfera se ha convertido en un reservorio de gran cantidad de trazas de especies gaseosas.

A pesar de las bajas concentraciones en que se encuentran estas sustancias, frecuentemente representan un riesgo para la vida de plantas y animales, pueden alterar el clima y constituyen una aportación muy importante a los fenómenos de corrosión.

El cálculo indica que la mayoría de estas sustancias están presentes en la atmósfera a niveles más altos de los esperados en equilibrio termodinámico con el nitrógeno, el oxígeno, el bióxido de carbono y el vapor de agua. La composición de estas trazas está controlada por una serie de mecanismos cinéticos y engloban una combinación complicada de procesos químicos, físicos y biológicos.

Las reacciones químicas entre los constituyentes mayoritarios de la tropósfera son prácticamente inexistentes; en cambio, la formación de muchas especies químicas activas bajo la influencia de la luz solar produce un rápido incremento de reacciones en cadena que desempeñan un papel muy importante en la presencia de trazas en la composición de la atmósfera.

Es necesario caracterizar el flujo de fotones solares en función de la longitud de onda, con el fin de conocer cuáles serán absorbidos o disipados, en su trayectoria a través de las capas bajas de la atmósfera. Los fotones con una longitud de onda de aproximadamente 240 nm son absorbidos por las moléculas de oxígeno o de nitrógeno de la atmósfera y por el ozono, situado principalmente en la estratósfera. Así resulta que existe un filtro natural de fotones en la región espectral comprendida entre 240 y 300 nm, de manera que en la tropósfera sólo es necesario considerar aquellas reacciones químicas que son activadas por fotones de longitud de onda de 300 nm o más.

Una de las principales diferencias entre la química de la tropósfera y la de la estratósfera son los fotones ultravioleta, que tienen energía suficiente para romper el enlace oxígeno, **O-O**. Esta reacción conduce a la formación de ozono y explica la presencia de mayores cantidades de ozono en la estratósfera que en la tropósfera.

Las corrientes de convección de los vientos dominantes en las capas bajas de la atmósfera ocasionan que se produzca un cierto estancamiento en cada hemisferio, de manera que la difusión de los gases presentes en la tropósfera tarda cerca de dos meses en homogeneizarse en el hemisferio sur o norte y unos dos años en hacerlo en toda la tropósfera.

La gran mayoría de las especies traza que llegan a la atmósfera están en estado de fase reducida (SH_2 , NH_3 , CH_4 , etc.); en cambio, las sustancias que regresan de la atmósfera a la superficie terrestre, usualmente por dilución en las gotas de lluvia o por sedimentación, están altamente oxidadas (H_2SO_4 , HNO_3 , CO_2 , etc.). El escalón entre estas especies reducidas y las oxidadas lo constituyen las reacciones fotoquímicas atmosféricas, dando lugar de esta manera a un ciclo en el cual los gases reducidos son incorporados a la atmósfera, se oxidan fotoquímicamente y regresan a la superficie terrestre.

A principios de siglo se consideraba que las especies atmosféricas reducidas eran oxidadas por el ozono y el peróxido de hidrógeno, noción sostenida por la química atmosférica clásica y que ha persistido durante muchos años. Actualmente son considerados responsables de la mayor parte de estas oxidaciones los radicales libres de alta reactividad, como el hidróxilo y el hidroperóxido, que están presentes en la atmósfera en concentraciones del orden de las 10 pptV.

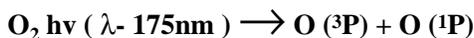
CICLO ATMOSFÉRICO DEL AZUFRE Y EL NITRÓGENO

Radicales libres

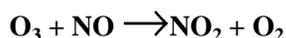
Antes de describir el ciclo del azufre y el nitrógeno, presentamos una breve noción de la formación de radicales libres, la causa principal de las oxidaciones en la atmósfera.

Estas especies químicas tienen un electrón no apareado en la capa exterior y esto les da afinidad para adicionar un segundo electrón, el que las hace actuar como oxidantes poderosos en las pequeñas concentraciones en que se encuentran. De todos los radicales libres presentes en la atmósfera, el hidróxilo parece ser el de mayor incidencia.

La producción del radical hidroxilo se inicia con la fotólisis del ozono. En la atmósfera superior; el ozono se forma principalmente por acción de la radiación solar sobre el oxígeno molecular:



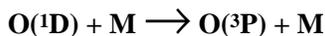
En la atmósfera inferior, los procesos productores de ozono implican la absorción de radiaciones solares por el dióxido de nitrógeno:



Cuando el ozono absorbe un fotón en las proximidades del ultravioleta, con una longitud de onda menor a 315 nm, se produce un átomo de oxígeno eléctricamente excitado:

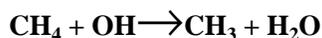
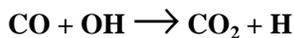


La transición $\text{O} (^1\text{D}) \longrightarrow \text{O} (^3\text{P})$ no es fácil y el átomo de oxígeno excitado, $\text{O} (^1\text{D})$, tiene tiempo de vida relativamente largo, unos 110 s. En las capas más bajas de la atmósfera puede dar lugar a dos reacciones:



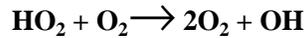
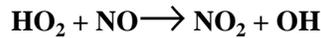
Esta segunda reacción es la fuente principal de radicales hidroxilo en la tropósfera.

Los radicales de hidroxilo frecuentemente reaccionan con monóxido de carbono o metano:

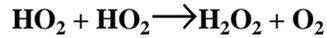
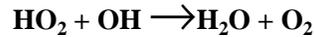


los radicales hidrógeno y metil formados se combinan rápidamente con oxígeno molecular formando radicales hidroperoxil (HO_2) y metilperoxil (CH_3O_2).

El radical hidroperoxil puede regenerar OH



aunque también puede llegar a la formación de agua y peróxido de hidrógeno que son arrastrados por la lluvia:

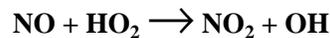


La química del radical hidroperoxil es mucho más compleja y parece ser que por oxidación conduce a la producción de monóxido de carbono, **CO**.

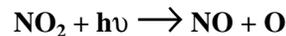
Ciclo atmosférico del nitrógeno

Los principales compuestos de nitrógeno presentes en la atmósfera son las formas oxidadas **NO**, **NO₂** y **HNO₃**, que están relacionadas químicamente entre sí por una serie de reacciones cíclicas.

La fuente principal de óxido de nitrógeno atmosférico es la reacción entre el oxígeno y el nitrógeno del aire empleado en procesos de combustión a temperaturas elevadas, el cual es oxidado rápidamente a dióxido, principalmente en presencia de iones hidroperoxil:

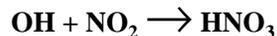


Esta reacción no sólo regenera el radical hidroxilo a partir del hidroperoxil, sino que también conduce a la formación de ozono:

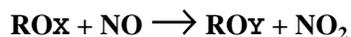


Como se ha descrito anteriormente, el **NO** reacciona también con el ozono para formar **NO₂**, y así como el **CO** produce una disminución del radical **OH**, el **NO** ocasiona un aumento de este radical con la correspondiente potenciación de la acción oxidante del medio.

Las mediciones de las especies oxidadas del nitrógeno **NO**, **NO₂** y **HNO₃** indican que la distribución troposférica de las mismas no es afectada fuertemente por focos urbanos, como sucede con el **CO**. La razón de esta aparente diferencia es la velocidad relativamente rápida a la cual los óxidos de nitrógeno son eliminados a la atmósfera. Después de la emisión a la atmósfera, el **NO** pasa rápidamente a **NO₂**, según las reacciones descritas. El **NO₂** reacciona con el radical **OH** y forma **HNO₃**, el cual es altamente soluble y se elimina fácilmente con la lluvia.

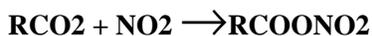


Cuando no hay hidrocarburos en la atmósfera, el ozono reacciona con el **NO** para formar **NO₂** y las cantidades de **O₃** no son significativas. Mas en presencia de radicales orgánicos oxigenados y minerales, el **NO** se oxida rápidamente a **NO₂**:



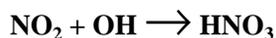
por lo que el ozono se acumula en el ambiente atmosférico. Los productos de la reacción forman una mezcla compleja de sustancias, en la cual el ozono se encuentra en gran abundancia.

Por reacción del dióxido de nitrógeno con radicales acilperoxil se pueden formar cantidades menos importantes de sustancias como el nitrato de peroxiacetil (PAN):



Un producto que se ha podido identificar en cámaras de smog y que se ha caracterizado como muy estable es el perácido nítrico (HO_2NO_2).

En definitiva, se puede decir que el ácido nítrico se forma en la atmósfera por oxidación del dióxido de nitrógeno, principalmente por reacción con el radical hidroxil:



La presión de vapor del ácido nítrico es alta, de manera que no se condensa en cantidades apreciables y permanece en fase gaseosa. La reacción con el amoníaco produce la formación de nitrato de amonio sólido, a humedades relativas del orden de 62%, dando lugar a la formación de aerosoles:

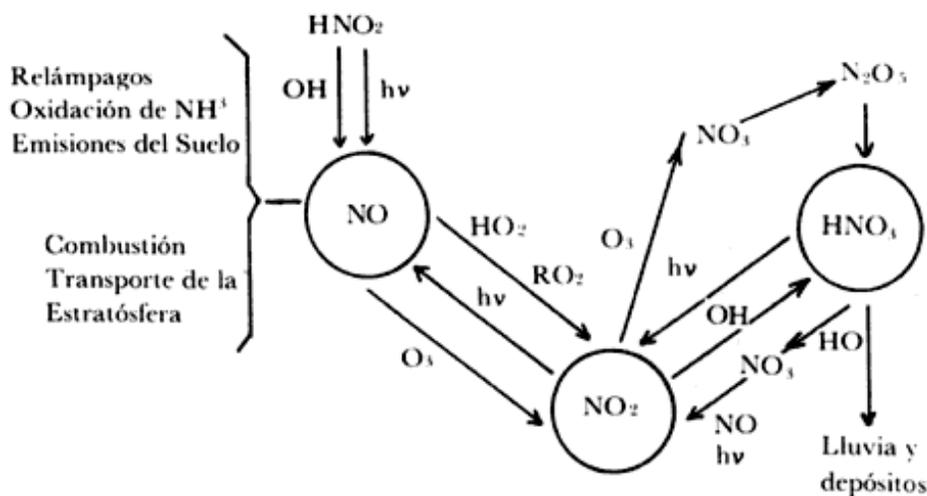
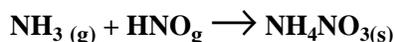


Figura III.3. Ciclo atmosférico del nitrógeno.

El equilibrio de esta reacción, que depende de la temperatura constituye el proceso de conversión de gas a partículas por la formación de aerosol de nitrato.

Ciclo atmosférico del azufre

El hecho de que la presencia de compuestos de azufre reduzca la calidad del aire y aumente la acidez del agua de lluvia ha provocado un aumento del interés en el conocimiento del ciclo atmosférico del azufre, y aun cuando la química atmosférica de este elemento es complicada y no se conoce a fondo, sí se ha logrado identificar la mayor parte de los compuestos correspondientes.

El principal compuesto de azufre presente en la atmósfera es el dióxido, el cual puede ser introducido directamente a partir de los procesos de combustión de combustibles fósiles o puede provenir de la oxidación de las formas

reducidas del azufre, procedentes principalmente de procesos biogénicos (CS_2 , CH_3SCH_3 , CHSSCH_3 , H_2S , etc.). El proceso final es la conversión de SO_2 en ácido sulfúrico y la incorporación de este ácido a las gotas de niebla y a los aerosoles.

Esta oxidación puede ser iniciada por la reacción en fase gaseosa del dióxido de azufre con el radical hidróxilo, por las reacciones en fase líquida en las gotas de niebla, que incluyen el dióxido de azufre disuelto y agentes oxidantes tales como peróxido de hidrógeno o el ozono, o por reacciones en las superficies sólidas de los aerosoles. La separación de los aerosoles y gotas de niebla que contienen H_2SO_4 en forma de precipitaciones devuelve el azufre a la superficie de la Tierra y cierra el ciclo del azufre atmosférico (figura III 4).

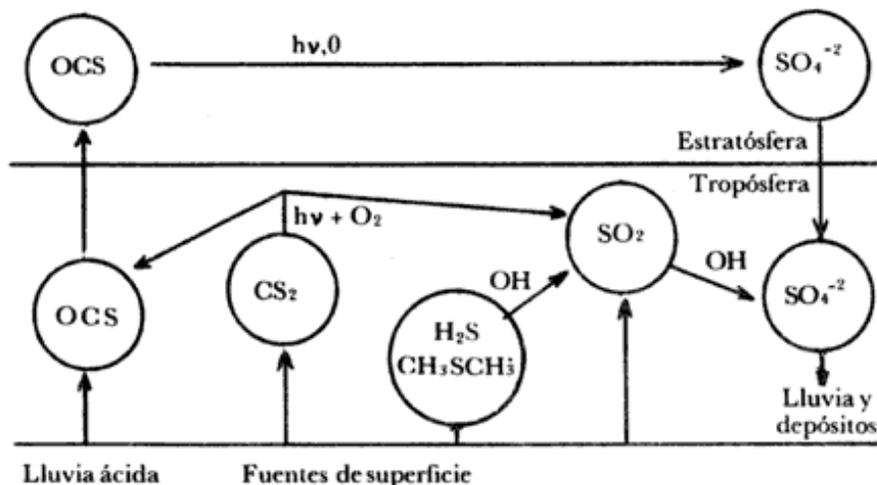


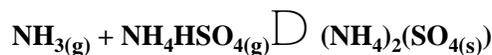
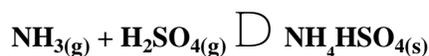
Figura III.4. Ciclo atmosférico del azufre.

La reacción más importante de oxidación en fase gaseosa del SO_2 atmosférico es la de este producto con radicales libres como el hidróxilo, el hidroperoxilo y el metilperoxilo. Parece ser que, entre todos estos radicales, el hidróxilo es el principal responsable de esta oxidación:



El ácido formado tiene una presión de vapor baja y se condensa fácilmente en presencia de H_2O .

De la misma manera que el ácido nítrico, también el ácido sulfúrico puede dar lugar a un proceso de transformación de gas a partículas sólidas por reacción, principalmente, con el amoníaco presente en la atmósfera:



La composición química del aerosol se caracteriza por las fracciones molares de los componentes NH_4HSO_4 y $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, que se pueden calcular si se conocen las concentraciones iniciales en fase gaseosa de los compuestos NH_3 y H_2SO_4 .

Se puede representar el mecanismo del ciclo del azufre con el esquema de la figura III.4.

LLUVIA ÁCIDA

La oxidación del dióxido de azufre y la incorporación de ácido sulfúrico en las gotas de niebla pueden aumentar la acidez de las precipitaciones de la misma forma en que lo hacen la oxidación y la separación de los óxidos de nitrógeno, de manera que las regiones con altos niveles de óxidos de azufre y de nitrógeno tienen con cierta

frecuencia lluvias ácidas.

La lluvia normal, no contaminada, tiene un **pH** de aproximadamente 5.6, acidez debida a la presencia de ácido carbónico, formado en la atmósfera por combinación del bióxido de carbono y el agua.

La lluvia ácida se caracteriza por un **pH** inferior a 5.6 y contiene pequeñas pero significativas cantidades de ácido sulfúrico y ácido nítrico.

En definitiva, se puede decir que las deposiciones atmosféricas sobre la superficie terrestre se pueden producir en forma de gas, partículas, aerosoles y precipitaciones. Sus efectos sobre el ecosistema terrestre son muy importantes, y uno de los más agresivos es el de la corrosión de los metales.

MAPAS DE LA CORROSIVIDAD

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

Las predicciones de corrosión o agresividad de las atmósferas pueden servir como orientación respecto a las medidas protectoras que deben adoptarse para la conservación de una estructura metálica, y se tendrán en cuenta en la planificación de una obra, para especificar el metal o aleación que hay que utilizar, el tipo de recubrimiento protector y sus características —si es que se emplea alguno— y la frecuencia del mantenimiento. Así, la importancia de estos factores nos muestra el interés que tienen *los 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) La medida directa de la corrosividad de las atmósferas por su acción sobre ciertos metales, **Fe, Zn, Al y Cu**, generalmente.

b) Determinación del efecto de los principales parámetros en la corrosión atmosférica, con el fin de trazar el mapa de corrosividad en función de la variación geográfica de aquéllos.

Recurrir al método *a* nos 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. Hemos dicho que la corrosividad de la atmósfera está determinada 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 interviene, 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, del 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 prácticamente nula) o a los efectos de contaminantes atmosféricos estimuladores de la corrosión (generalmente **SO₂** y **Cl**-), y en qué medida. En el supuesto caso de una atmósfera contaminada, habrá que multiplicar el dato leído por el factor o coeficiente de corrección pertinente, que tome en consideración los efectos de la contaminación. 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 **SO₂** y **Cl**. La Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), en el Reino Unido, y la Rust Oleum Corporation en Estados Unidos han empleado el método *a* para la elaboración 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, Al y Cu en dicho país en función de datos meteorológicos. No constituye una gran desventaja 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 ocasionalmente muy reducido ámbito de actuación

(formación de microclimas o existencia de puntos singulares). El efecto de la contaminación se introduce más tarde, por medio de coeficientes correctores de los valores de corrosión leídos sobre el mapa.

Es importante hablar, aunque sea someramente, de los mapas de corrosividad de Estados Unidos, el Reino Unido y la antigua URSS, con el propósito de aclarar mejor las distintas formas de abordar sus objetivos.

El mapa de Estados Unidos 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 su perforación. *La Rust Oleum Corporation* divide el mapa de Estados Unidos en nueve zonas, a las que corresponden los siguientes índices de corrosividad (en años y meses): 3.00-3.11; 4.00-04.11; 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 menor. 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 nueve poblaciones la velocidad de corrosión no rebasa las 44 $\mu\text{m}/\text{año}$. Los altos índices detectados, por lo general, deben atribuirse a la notable contaminación de la atmósfera de muchas de las poblaciones donde fueron situadas las probetas.

La reconocida ambigüedad que supone la clasificación cualitativa de las atmósferas en marinas, industriales o urbanas, impulsó al CIRIA 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 amplia distribución de probetas de zinc 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 x 12 km^2 en que fue dividido el mapa. Este enfoque obligó a situar probetas de zinc en varios miles de puntos de exposición durante el periodo 1968-1974. Es importante señalar que se escogió el zinc por suponer que con este metal se produce, mejor que con otros, una fuerte dependencia entre corrosión y calidad del aire.

En el mapa obtenido (Figura III.5) se distinguen los siguientes niveles de corrosividad, expresados en $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{año}$: 700-601; 600-501; 500-401; 400-301; 300-201; 200-101, y 100-0, que corresponden, respectivamente, a los desgastes medios anuales siguientes: 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 . En un 32% de la superficie del Reino Unido, la corrosión del zinc no supera el nivel mínimo de 1.40 $\mu\text{m}/\text{año}$. El 29% se sitúa dentro del siguiente nivel (entre 1.41 y 2.80 $\mu\text{m}/\text{año}$); cerca de un 12% de la superficie del mapa exhibe corrosiones de grado intermedio (entre 4.21 y 5.60 $\mu\text{m}/\text{año}$) y sólo en un 3% la velocidad de corrosión es superior a 8.40 $\mu\text{m}/\text{año}$.

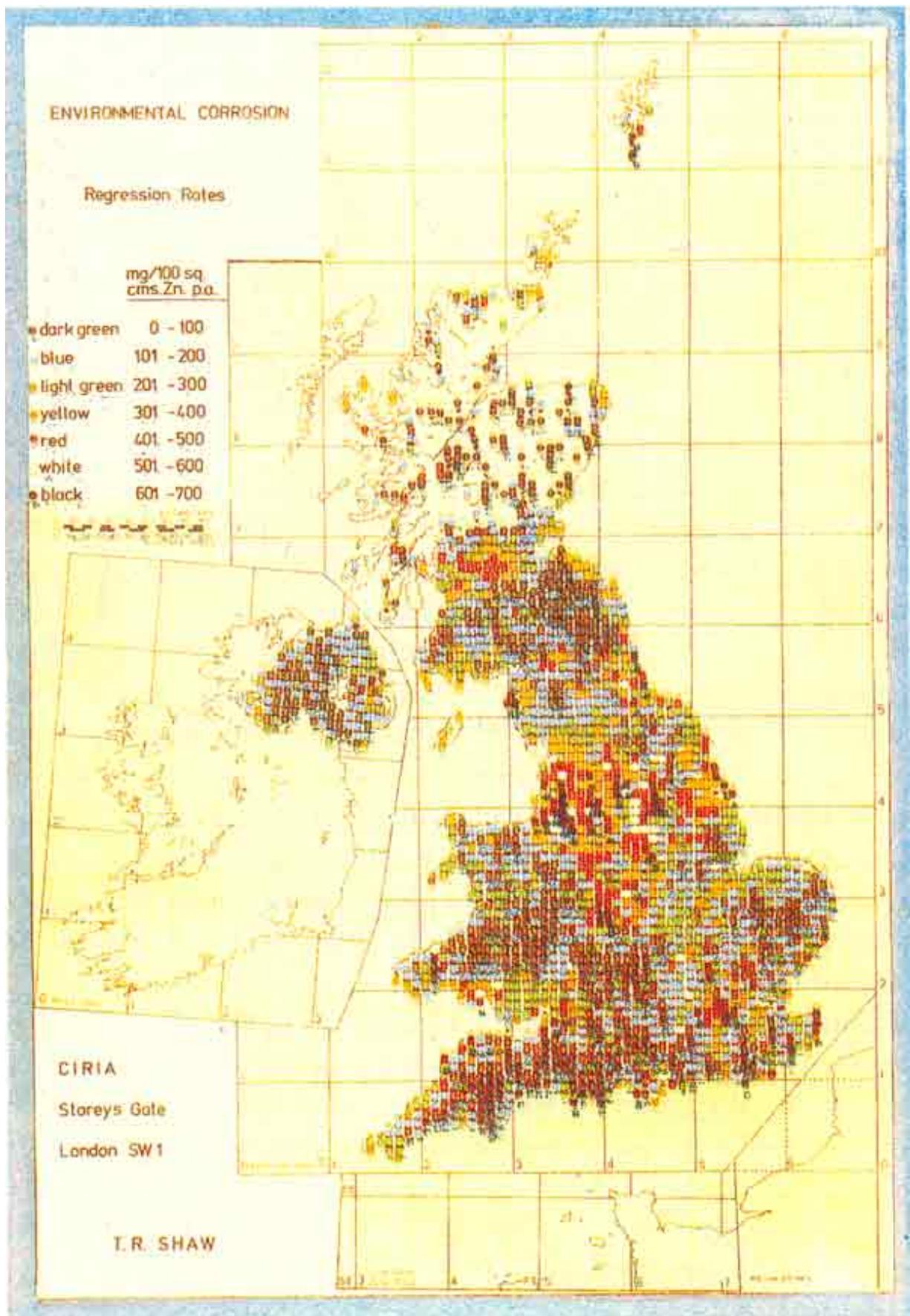


Figura III.5. Reproducción del mapa de corrosividad atmosférica del Reino Unido, elaborado por CIRIA. Cada punto indica el nivel medio de corrosión del zinc dentro de un área de 10 X 10 Km². Los diferentes niveles se distinguen por el color de los puntos. Referencia: "Mapa de corrosividad atmosférica de Cataluña"

En cambio, la elaboración del mapa de la Unión Soviética se basó fundamentalmente, como se ha indicado, en los tiempos de humectación de las superficies metálicas, deducidos a partir de los datos suministrados por 99 estaciones meteorológicas repartidas por todo el territorio. Con los datos de 0 a 30 años de observación se determinaron las duraciones medias anuales de los periodos de lluvia y de niebla en cada estación, y con los datos relativos a un periodo de tres años se calculó el número de días de rocío y su duración. periodo de deshielo, durante el cual puede producirse 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 estaba comprendida entre -1 y $+1$ °C y se admitió, asimismo, que en las regiones meridionales, donde no se forman capas estables de hielo, los días de deshielo, y por tanto de corrosión se extendían 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 cubierta por una capa de humedad. Con el conjunto de tiempos de las diferentes estaciones se realizó el mapa de humectación que presentamos en la figura III.6, en el que la totalidad del territorio de la ex Unión Soviética aparece dividida en once zonas, de acuerdo con los tiempos de permanencia de la capa de humedad sobre el metal.

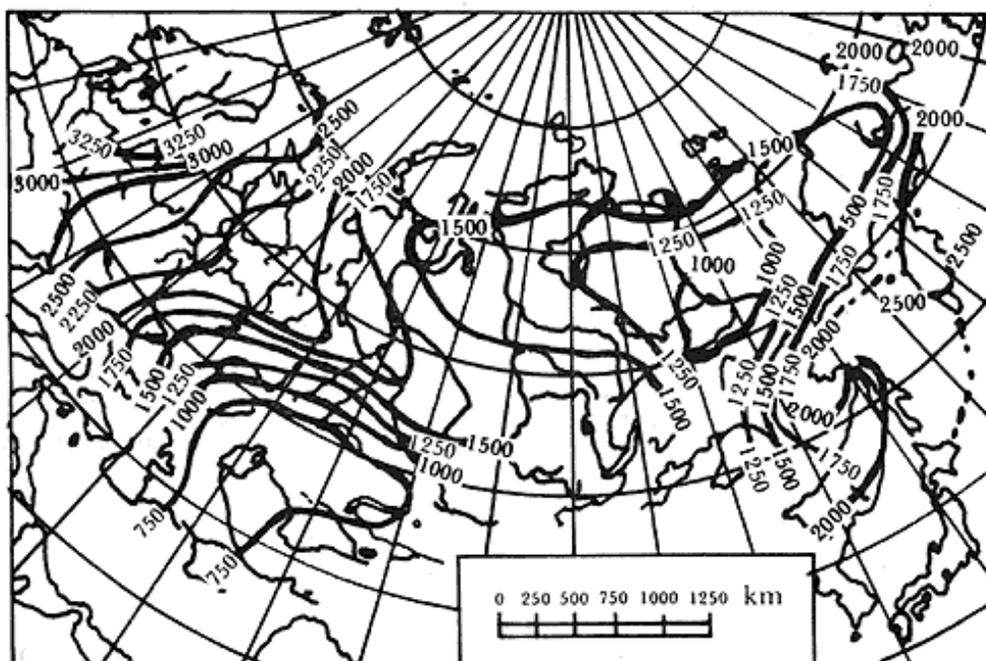


Figura III.6. Mapa de la Unión Soviética, en el que se representa la humectación de las superficies metálicas: isóneas del tiempo anual (en horas) durante el cual una película de humedad permanece sobre la superficie del metal (según Golubev y Kadyrov).

Finalmente, para obtener el mapa de corrosividad del hierro, por ejemplo (figura III.7), se partió del dato experimental de que su corrosión en un área rural avanza $0.89 \mu\text{m}$ cada 100 horas de humectación, dato que, incrementado en un 50% para tomar en consideración un coeficiente de seguridad, se multiplicó por la duración del tiempo de humectación indicado en la figura III.6. Factores de importancia secundaria, como posibles cambios de la 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 seguridad.

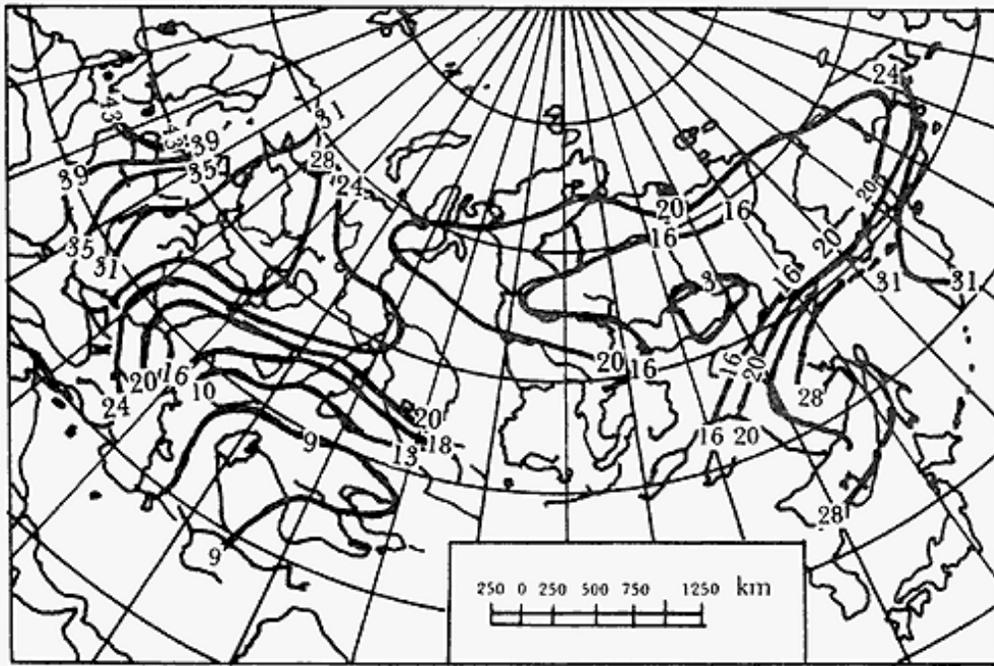


FIGURA III.7. Mapa de la Unión Soviética sobre el cual están representadas las isolíneas de corrosión anual del hierro (en micrómetros).

En relación con la figura III.7, el desgaste por corrosión del hierro expuesto en las atmósferas rurales de la antigua Unión Soviética varió entre 9 y 45 $\mu\text{m}/\text{año}$. Si se tratará de atmósferas contaminadas, tendrían que multiplicarse estos datos por los oportunos coeficientes de intensificación del ataque, determinados previamente.

MAPA DE CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA DE MÉXICO

Para la elaboración del mapa de corrosividad de México se ha renunciado a la idea de calibrar de modo directo la corrosividad de las atmósferas, por exigir este planteamiento la instalación de cientos, tal vez miles de estaciones de ensayo, labor que rebasa con creces las posibilidades experimentales y económicas del equipo de investigadores con que se cuenta.

Por ello, el esfuerzo se centra 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 México.

Se ha considerado oportuno, asimismo, analizar por separado los efectos puramente meteorológicos y los producidos por la contaminación, y asociarlos después en la elaboración de las cifras finales de corrosión, para que el tratamiento dado al problema coincida con el citado método *b* para la elaboración de mapas de corrosividad.

Hasta agosto de 1990 se contaba con las siguientes estaciones distribuidas por todo el país:

Las estaciones señaladas iniciaron su periodo de exposición de metales en el mes de agosto de 1989, estando prevista la primera retirada de probetas para finales del mes de agosto de 1990. Se han expuesto probetas de acero, cobre, zinc y aluminio de 150 x 100 μm y de diferentes espesores, de acuerdo con la metodología propuesta por la Organización Internacional de Estandarización (ISO).

<i>Estación</i>	<i>Tipo de atmósfera</i>	<i>Institución responsable</i>
San Luis Potosí	Urbana	Instituto de metalurgia, UASLP

Acapulco	Marina-urbana	IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas)
Cuernavaca	Urbana	IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas)
Distrito Federal	Urbana	Facultad de Química de la UNAM
Irapuato	Rural	CFE (Comisión Federal de Electricidad)
Mérida	Urbana	CIEA (Centro de Investigación y Estudios Avanzados)

El mapa de corrosividad atmosférica de México forma parte del proyecto del Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica (MICAT), en el cual participan los siguientes países: Argentina, Chile, Brasil, Perú, Colombia, Venezuela, Panamá, Cuba, Costa Rica, México, Portugal y España

MAPA IBEROAMERICANO DE CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA (MICAT)

Antecedentes

Durante la celebración del II Congreso Iberoamericano de Corrosión y Protección, en noviembre de 1986 en Maracaibo, Venezuela, tuvo lugar una mesa redonda durante la cual se expusieron las ideas básicas para la elaboración de un Mapa Iberoamericano de Corrosividad Atmosférica (MICAT). El tema suscitó un gran interés y las delegaciones de los distintos países asistentes al Congreso (Argentina, Colombia, Cuba, España, México, Portugal y Venezuela) expresaron su intención de participar activamente en el proyecto. Posteriormente se recibieron las adhesiones al proyecto de instituciones y organismos de Brasil, Costa Rica, Chile, Panamá y Perú.

Durante 1987 se realizaron gestiones en España ante el Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo del V Centenario (CYTED-D) con vistas a dar un carácter oficial al proyecto de investigación y obtener financiación para el mismo.

En la reunión del Consejo Técnico Directivo del CYTED-D en La Habana (enero de 1989) se aprueba oficialmente el proyecto, nombrándose como coordinador del mismo al doctor Leonardo Uller, de Brasil.

La I Reunión de Coordinadores del proyecto MICAT de los distintos países participantes en el estudio tuvo lugar del 2 al 4 de agosto de 1988 en Caracas, Venezuela. En esta reunión se nombró al doctor Manuel Morcillo, de España, jefe del proyecto y se aprobó la metodología respectiva.

Objetivos

Mediante el desarrollo del proyecto se pretende conseguir, en diferentes fases, los siguientes objetivos:

- a) Un mayor conocimiento acerca de los mecanismos de corrosión atmosférica en las distintas atmósferas de Iberoamérica.
- b) Establecer, a través de adecuados tratamientos estadísticos de resultados, expresiones matemáticas que permitan el cálculo de la corrosión atmosférica en función de parámetros climáticos y de contaminación.
- c) Elaborar el Mapa Iberoamericano de Corrosividad Atmosférica.

Todo ello permitirá sentar las bases para una selección óptima de los materiales metálicos y recubrimientos (convencionales y avanzados) que deberán emplearse en las distintas situaciones de agresividad atmosférica.

Para el cumplimiento de este objetivo se requiere llevar a cabo gradualmente distintas fases. Es fundamental disponer de una red de estaciones de corrosión atmosférica que sean representativas de las distintas condiciones climáticas imperantes en cada uno de los países que participan en el proyecto, sin duda, conocer la agresividad de las distintas atmósferas exclusivamente en función de las condiciones climáticas reviste un enorme interés científico y técnico. Sin embargo, no hay que olvidar que un gran porcentaje de las estructuras metálicas se encuentran ubicadas en zonas densamente pobladas, en donde la agresividad atmosférica depende también del grado de contaminación atmosférica y de los contaminantes antropogénicos vertidos a la atmósfera. Por ello, una

segunda fase del estudio tendrá en cuenta el factor "contaminación atmosférica" en la definición de las agresividades atmosféricas de los distintos países.

Por último, las estructuras metálicas, en especial de acero, raramente se exponen desnudas a la acción atmosférica. Debido a la alta corrosividad de este material, suele exponerse protegido mediante diversos recubrimientos: pinturas, recubrimientos metálicos recubrimientos de conversión, etcétera.

Una vez realizadas estas fases, se estará en condiciones de realizar con efectividad el objetivo final: la selección óptima de los materiales metálicos y los recubrimientos protectores que deberán emplearse en las distintas situaciones de agresividad atmosférica en Iberoamérica.

A continuación se expone la metodología del proyecto.

Metodología

La metodología del proyecto se basa principalmente en la adaptada por el programa ISOCORRAG, realizado en el seno de la *International Standard Organization* (ISO), dentro del Grupo de Trabajo 4 de la Comisión Técnica 156.1. A continuación se exponen algunos aspectos relacionados con la metodología del proyecto, que fueron acordados por los distintos países asistentes a la reunión de Caracas.

1) *Estación de ensayo.* Las estaciones de ensayo deberán contar con dispositivos para el registro continuo de la humedad relativa y de la temperatura, así como con equipos de captación de los contaminantes, SO_2 y cloruros.

La inclinación de las probetas en el pupitre de exposición podrá ser de 30° o de 45°.

Las probetas en exposición mirarán hacia el noreste (en el Hemisferio Sur) o suroeste (Hemisferio Norte), salvo condiciones locales de vientos predominantes.

Para el montaje y localización de las estaciones de ensayo se seguirá la metodología propuesta en ISO 8565, tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Exposición al aire libre, sin impedimentos a causa de edificios próximos, otras estructuras, etcétera.
 - b) Ubicación de las estaciones de ensayo próximas a estaciones meteorológicas del Instituto de Meteorología de cada país.
 - c) Los bastidores de exposición deben asegurar una durabilidad durante toda la investigación.
 - d) La altura de las probetas no deberá ser inferior a 0.75 m a partir del suelo.
 - e) Se evitará el contacto eléctrico entre probetas mediante aisladores de porcelana y otros dispositivos.
- 2) *Materiales.* Acero de bajo contenido en carbono (sin alear); zinc (98.5% mínimo de pureza); cobre (99.5% mínimo de pureza), y aluminio (99.5% mínimo de pureza).

La composición del acero deberá aproximarse lo más posible a la siguiente:

C	0.056%, Si	0.060%, S	0.012%, P	0.013%, Cr	0.02%.
Mo	<0.01 %, Ni	0.04 %, Cu	0.03 %, Nb	<0.01 %, Ti	<0.01%,
Va	<0.01 %, Al	0.02 %, Sn	<0.005%, N	<0.004%.	

3) *Probetas de ensayo.* Las probetas medirán como máximo 150 x 100 x 3 μm (para el acero) o 150 x 100 x 1 μm (para los metales no ferrosos). Esta medida puede variar si la geometría de los bastidores lo exigen.

Las probetas se ensayarán con las condiciones de superficie que señala el documento ISO 8565.

Los bordes de las probetas de acero que se expongan en atmósferas marinas severas se protegerán con pintura epoxídica-poliamida, que se aplicará por inmersión con un ancho de recubrimiento de 2 a 5 μm .

Las probetas se prepararán mediante corte a partir de chapas de idéntica composición. Posteriormente se eliminarán las rebabas producidas por la operación de corte.

CALIBRACIÓN DE LA AGRESIVIDAD DE LA ATMÓSFERA

Datos de contaminación, meteorológicos y de corrosión

Para poder determinar la corrosividad de una atmósfera es necesario relacionar entre sí todos los factores que la afectan, y muy especialmente aquellos que han demostrado tener una especial influencia en el proceso de corrosión: tiempo de humectación de la superficie metálica y cantidad de contaminantes —causantes de corrosión— que pueden depositarse en la superficie metálica.

Es de gran utilidad para la interpretación de los datos establecer la siguiente terminología:

Agresividad de la atmósfera. Es el potencial de la atmósfera para provocar corrosión en metales o aleaciones. Se puede medir con base en los siguientes parámetros ambientales: humedad, temperatura y contaminación.

Corrosividad de la atmósfera. Habilidad de la atmósfera para provocar corrosión en un sistema dado.

Tiempo de humectación. Periodo durante el cual una superficie metálica está cubierta por una película de electrolito (incluso adsorbida) que estimula significativamente la corrosión atmosférica.

Tiempo de humectación calculado. Tiempo de humectación estimado a partir de relaciones temperatura-humedad relativa.

Tiempo de humectación experimental. Tiempo de humectación determinado directamente por diferentes sistemas de medida.

Categoría de la contaminación. Característica cualitativa o cuantitativa determinada convencionalmente, que señala la cantidad de sustancias químicas activas, gases corrosivos o partículas suspendidas en el aire, tanto naturales como producidas por el hombre, diferentes de los compuestos ordinarios del aire.

Tipo de atmósfera. Caracterización de la atmósfera sobre la base de un apropiado criterio de clasificación: industrial, marina, urbana, etc., o de factores operacionales complementarios: química, etcétera.

Complejo temperatura humedad. Efecto conjunto de la temperatura y de la humedad relativa, que influye en la corrosividad de la atmósfera.

Tipo de localización. Condiciones de exposición típicas definidas convencionalmente a partir de un componente o estructura: espacio cerrado, bajo techo, aire libre, etcétera.

Abreviaturas utilizadas:

τ = tiempo de humectación.

P = Categoría de la contaminación debida a componentes sulfurados, basada en el nivel de **SO₂**.

S = Categoría de la contaminación debida a aerosoles de agua de mar, basada en el nivel de **NaCl**.

C = Clasificación de la corrosividad de la atmósfera en categorías.

Caracterización de la atmósfera en relación con su agresividad. Para propósitos prácticos, se consideran como factores clave de la corrosión producida por la atmósfera los siguientes: tiempo de humectación, niveles de **SO₂** y **NaCl**.

Como una estimación del tiempo de humectación calculado (p) de una superficie que se corroe, se consideran aquellos periodos en que la humedad relativa (HR) es mayor de 80% y la temperatura superior a la 0 °C. El tiempo

de humectación calculado de esta manera no corresponde necesariamente al tiempo de humectación real, ya que la humectación depende del tipo de metal, de la forma, peso y orientación del objeto, de la cantidad de productos de corrosión y de su naturaleza, así como del tipo de contaminantes, amén de otros factores. Estas consideraciones pueden aumentar o disminuir el tiempo de humectación real. Sin embargo, el criterio propuesto es, por lo general, suficientemente preciso para la caracterización de las atmósferas. Hay que tener en cuenta que la fiabilidad del tiempo de humectación calculado disminuye si la superficie metálica se encuentra bajo protección.

El tiempo de humectación determinado experimentalmente puede obtenerse de acuerdo con varios sistemas de medida. El tiempo medio puede depender, además, del tipo de instrumento o sensor utilizado. Asimismo, los tiempos de humectación indicados por diferentes sistemas de medida no son comparables directamente, y son convertibles sólo dentro de limitadas características temperatura-humedad.

Cabe hacer notar las siguientes observaciones:

1) El factor más importante dentro de una categoría particular de tiempo de humectación es el nivel de contaminación por **SO₂ o NaCl**.

2) Existe otro tipo de contaminantes que pueden ejercer un efecto agresivo: **NO_x**, humos en zonas industriales, **CaCl₂ y MgCl₂** en las regiones marítimas, y hay que tomar también en cuenta la presencia de contaminantes específicos de un determinado microclima: **Cl₂**, ácidos orgánicos, medios para lograr el deshielo, etc. Estos tipos de contaminación no se toman en cuenta como criterio de clasificación.

Clasificación del tiempo de humectación. Tiempo de humectación depende, como se ha visto, de la zona macro climática y del tipo de localización.

La clasificación que se propone para la atmósfera se presenta en el cuadro III.3. Los valores clasificados están basados en características de larga duración de zonas macroclimáticas, en condiciones típicas de las categorías o tipos de localización.

CUADRO III.3. Clasificación del tiempo de humectación de superficies metálicas que se corroen (ISO 9223:1992).

<i>Categoría</i>	<i>Tiempo de humectación</i>		<i>Ejemplo</i>
	<i>Horas/Año</i>	<i>% Año</i>	
τ_1	<10	<0.1	Atmósfera interior climatizada
τ_2	10-250	0.1-3	Atmósfera interna, excepto espacios interiores no aireados
τ_3	250-2500	3-30	Atmósfera exterior en regiones secas o muy frías
τ_4	2500-5500	3-60	Atmósferas exteriores en todas las zonas, excepto la tropical seca y las zonas frías
τ_5	<5500	<60	Lugares no ventilados en regiones muy húmedas

Observaciones:

1) En tiempos de humectación τ_1 no se espera condensación. En τ_2 , la probabilidad de formación de líquido en la superficie metálica es baja. Los tiempos de humectación τ_3 - τ_5 incluyen periodos de condensación y de

precipitación.

- 2) El tiempo de humectación de determinado lugar depende del complejo temperatura-humedad de la atmósfera externa.
- 3) En atmósferas internas sin aire acondicionado, el control de la humedad mediante fuentes de vapor permite alcanzar tiempos de humectación en el intervalo τ_3 - τ_4 .
- 4) En tiempos de humectación τ_1 - τ_2 , la corrosión procede de acuerdo con las leyes de probabilidad. La probabilidad de corrosión es mayor en superficies donde puede depositarse suciedad.
- 5) Los efectos de la corrosión en atmósferas con tiempos de humectación τ_3 - τ_5 tienen lugar desde el primer día de exposición (si no existe un tiempo de inducción) y proceden de manera continua. El nivel y tipo de contaminante son los factores cinéticos decisivos.

Clasificación de las categorías de contaminación. Las categorías que se proponen se emplean para medir la contaminación de la atmósfera por SO_2 y aerosoles de agua de mar. Estos dos tipos de contaminantes son representativos de atmósferas como la rural, la urbana, la industrial y la marina. Los otros tipos de contaminantes se consideran añadidos (por ejemplo, NO_x en atmósferas urbanas e industriales). La clasificación de la contaminación debida al SO_2 para atmósferas exteriores estándar se presenta en el cuadro III.4.

CUADRO III.4. Clasificación de la contaminación por sustancias sulfurosas representadas por el nivel de SO_2 (ISO 9223:1992).

<i>Velocidad de depósito de SO_2</i> <i>mg/m² día</i>	<i>Concentración del SO_2</i> <i>mg/m³ o ppm</i>		<i>Categoría</i>
<10	<0.012		P ₀
>10-35	0.012	- 0.04	P ₁
>35-80	0.04	- 0.09	P ₂
>80-200	0.09	- 0.25	P ₃

Observaciones:

- 1) Las cantidades de SO_2 determinadas por depósito, P_d o volumétricamente, P_c son equivalentes a efectos de clasificación. La relación entre ambas magnitudes puede formularse aproximadamente como:

$$\text{P}_d = \text{P}_c \cdot 800$$

- 2) La velocidad de depósito de SO_2 y la concentración representan un promedio anual.
- 3) Cualquier concentración inferior a P_0 se considera no importante desde el punto de vista de la corrosión.
- 4) Una contaminación por encima de P_3 se considera extrema y es típica de determinados microclimas.

La clasificación de la contaminación por pulverizaciones o aerosoles salinos, representada por el nivel de NaCl , se relaciona con atmósferas exteriores en ambientes marinos. La clasificación propuesta se presenta en el cuadro III.5

CUADRO III.5. Clasificación de la contaminación por aerosoles salinos representados por NaCl . (ISO 9223:1992).

<i>Velocidad de depósito de NaCl₂</i>	<i>Categoría</i>
< 3	S ₀
> 3-60	S ₁
> 60-300	S ₂
< 300-1500	S ₃

Observaciones:

- 1) La clasificación anterior está basada en la determinación de la velocidad de depósito de cloruros por el método de la candela húmeda. la 50 9225. (ISO 9225).
- 2) Los resultados obtenidos por la aplicación de diferentes métodos para la determinación del contenido salino de la atmósfera no son siempre directamente comparables ni convertibles.
- 3) La porción más significativa de la contaminación es la causada por el **NaCl**, y la restante se debe a **MgCl₂**, **KCl** y otros constituyentes del agua de mar.
- 4) La concentración de **NaCl** está expresada como promedio anual.
- 5) Las velocidades de depósito inferiores a S₀ se consideran como no importantes para el ataque corrosivo.
- 6) Grados de contaminación por encima de S₃ se consideran extremos.
- 7) Los aerosoles salinos dependen fuertemente de las variables que influyen en el transporte de las partículas salinas tierra adentro, como dirección del viento, velocidad, topografía local, etcétera.

La situación geográfica y las condiciones climáticas pueden hacer variar la extensión del territorio afectado por la salinidad tierra adentro.

Categorías de la corrosividad de la atmósfera. Para efectos prácticos, la corrosividad de la atmósfera se divide en cinco categorías, que presentamos en el cuadro III.6.

CUADRO III.6. Categorías de la corrosividad de la atmósfera. (ISO 9223:1992).

<i>Categoría Corrosividad</i>	
1	Muy Baja
2	Baja
3	Media
4	Alta
5	Muy alta

Determinación de las categorías de corrosividad para las mediciones de velocidad de corrosión en probetas metálicas. En el cuadro III.7 se presentan los valores numéricos correspondientes a la velocidad de corrosión del

primer año de exposición para cada una de las categorías propuestas. Los valores propuestos no pueden extrapolarse para realizar predicciones de larga duración.

CUADRO III.7. Pérdidas por corrosión durante el primer año de exposición para las diferentes categorías de corrosividad (ISO 9223:1992).

<i>Categoría</i>	<i>Pérdida de peso</i>				<i>Profundidad pic. μm</i>
	ACERO	ZINC	COBRE	ALUMINIO	
1.g / m ²	1-10	<0.7	<0.9	desprec.	—
μm	0.15-1.25	<0.1	<0.1	desprec.	—
2.g / m ²	10-200	0.7-5	0.9-5	<0.6	
μm	1.25-25	0.1-0.7	0.1-0.6	<0.25	20
3.g / m ²	200-400	5-15	5-12	0.6-2	
μm	25-50	0.7-12	0.6-1.3	0.25-0.8	50
4.g / m ²	400-650	15-30	12-25	2-5	
μm	50-80	1.2-4.2	1.3-2.8	0.8-2	50-150
5.g / m ²	>650	>30	>25	>5	
μm	>80	>4.2	>2.8	>2.0	150

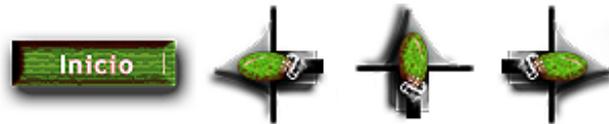
Observaciones:

1) El criterio de clasificación propuesto está basado en probetas rectangulares planas.

Determinación de la categoría de corrosividad de una atmósfera a partir de datos del medio ambiente. Las diferentes categorías de corrosividad se establecen de acuerdo con los efectos progresivos de la contaminación y el tiempo de humectación. A medida que aumenta la agresividad de la atmósfera, aumenta, por lo general, la velocidad de corrosión de los metales. En el cuadro III.8 presentamos dicha clasificación.

CUADRO III.8. Estimación de la corrosividad de la atmósfera por categorías ISO 9223: 1992. Acero al carbón

CUADRO III.8. Estimación de la corrosividad de la atmósfera por categorías ISO 9223:1992.																
Acero al carbón																
	τ_1			τ_2			τ_3			τ_4			τ_5			
	S_0 - S_1	S_2	S_3													
P_0 - P_1	1	1	1-2	1	2	3-4	2-3	3-4	4	3	4	5	4	5	5	
P_2	1	1	1-2	1-2	2-3	3-4	3-4	3-4	4-5	4	4	5	5	5	5	
P_3	1-2	1-2	2	2	3	4	4	4-5	5	5	5	5	5	5	5	
Zinc y cobre																
P_0 - P_1	1	1	1	1	1-2	3	3	3	3-4	3	4	5	4	5	5	
P_2	1	1	1-2	1-2	2	3	3	3-4	4	3-4	4	5	5	5	5	
P_3	1	1-2	2	2	3	3-4	3	3-4	4	4-5	5	5	5	5	5	
Aluminio																
	S_0	S_1	S_2	S_3	S_0	S_1	S_2	S_3	S_0	S_1	S_2	S_3	S_0	S_1	S_2	S_3
P_0 - P_1	1	1	2	2	1	1	2-3	4	3	3	3-4	4	3	3-4	3-4	5
P_2	1	1	2	2-3	1-2	1-2	3-4	4	3	3	4	4-5	3-4	4	4	5
P_3	1	1	2-3	3	2	3-4	4	4	3	4	4-5	5	4-5	5	5	5



IV. LA CORROSIÓN INDUCIDA POR CONTAMINACIÓN DEL AGUA

Las aguas naturales son medios complejos, en evolución permanente, que se pueden considerar en una primera aproximación como disoluciones de diferentes especies químicas en agua. Las especies más abundantes son los iones, cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Fe^{2+} , etc., y iones como HCO_3^- , CO_3^{2-} ; SO_4^{2-} Cl^- , etc., así como gases, O_2 , CO_2 , etc. y a veces H_2S .

La agresividad de un agua depende de su capacidad para conducir la corriente eléctrica. Un agua poco conductora ocasionará que la actividad de las pilas de corrosión que se puedan formar en la misma sea pequeña, ya que el circuito eléctrico que se cierra a través de ella presenta una resistencia eléctrica elevada. En el agua de mar; cuya conductividad es muy alta por la gran cantidad de iones presentes, la actividad de los procesos de corrosión es tan alta, que en lapsos muy cortos se pueden originar fenómenos muy graves.

Un agua dulce y una de mar constituyen casos extremos, y entre ambos existen una gran variedad de aguas cuya agresividad frente a los metales varía en función de su composición y factores como la concentración de oxígeno disuelto, **pH**, temperatura, concentración de cloruros y sulfatos, agitación y velocidad del medio, etcétera.

El agua de mar se caracteriza por la gran estabilidad de sus propiedades fisicoquímicas, y sobre todo por su salinidad, que varía entre 30 y 37%. Por salinidad se entiende la cantidad de sales anhidras contenidas en 1 kg de agua de mar, lo cual puede determinarse evaporando 1 kg de esta agua de mar y pesando el residuo seco.

De manera aproximada, una composición química "tipo" de un agua de mar se presenta en el cuadro IV.1.

CUADRO IV. 1. Composición química del agua de mar.

<i>Compuesto</i>	<i>Concentración, gramos/litro</i>
Cloruro de sodio, NaCl	27.0
Cloruro de magnesio, MgCl_2	3.2
Sulfato de magnesio, MgSO_4	1.6
Sulfato de calcio, CaSO_4	1.3
Sulfato de potasio, K_2SO_4	0.8
Cloruro de potasio, KCl	0.5
Carbonato de Calcio, CaCO_3	0.1
Varios (bromuros, fosfatos)	0.5
Total	35.0

El agua de mar, en la proximidad de las costas, puertos y lagunas costeras puede estar muy contaminada. En el cuadro IV.2 se presentan algunos resultados obtenidos de la agresividad de las aguas de diferentes puertos frente a diferentes metales. Destacan como las aguas más agresivas las del puerto de Barcelona, debido a su fuerte contaminación.

CUADRO IV.2. Penetración media del ataque, en $\mu\text{m}/\text{año}$, al cabo de dos años de inmersión en aguas de diferentes puntos geográficos.

<i>Lugar de inmersión</i>	<i>Acero</i>	<i>Zinc</i>	<i>Cobre</i>
Barcelona, España	0.43	0.053	0.052
La Rochelle, Francia	0.18	0.070	0.030
Portsmouth, Inglaterra	0.17	0.057	0.037
Miami, EUA	0.25	0.059	0.050
Drobak, Noruega	0.11	0.029	0.018

Hay que señalar que la velocidad media de corrosión en un agua de mar no contaminada es de 0.12 $\mu\text{m}/\text{año}$.

Así, la contaminación desempeña un papel determinante en la agresividad de una determinada agua frente a los metales de uso más común. Tanto es así, que una posible indicación del grado de contaminación de un agua de mar puede llegar a establecerse por su velocidad de corrosión.

No se trata aquí de enlistar los diferentes contaminantes que pueden estar presentes en un agua de mar ni su origen, sino tan sólo de hacer notar que a la natural agresividad de la misma puede sumarse el efecto de dichos contaminantes. Por su especial importancia e incidencia pueden citarse entre éstos a los iones nitrato, NO_3^- provenientes, por ejemplo, de los abonos químicos nitrogenados, que por su naturaleza oxidante depolarizan la reacción catódica de reducción del oxígeno, acelerando el proceso de corrosión. Asimismo, la presencia de fosfatos, provenientes de los detergentes, ha dado lugar a la proliferación de algas, muy especialmente en lagunas costeras, las cuales consumen gran parte del oxígeno disuelto presente en el agua, haciendo que el medio se vuelva anaerobio, con la consiguiente putrefacción de estas lagunas, que agravan los problemas de corrosión en el fondo de mares y lagunas por la posibilidad de crecimiento de bacterias sulfato-reductoras. El acero y el acero galvanizado son especialmente atacados en estas condiciones, ocasionándose problemas en todas aquellas estructuras sumergidas que no estén suficientemente protegidas (por ejemplo, con protección catódica). Si bien la corrosión microbiológica o bacteriana no es un problema nuevo en los fondos marinos, su incidencia en la falla de muchos sistemas sumergidos ha ido en aumento en los últimos años, al crecer la contaminación en las zonas aledañas a las costas.

En lo que se refiere a los problemas en otro tipo de aguas naturales, las redes de distribución de agua potable comprenden tuberías, válvulas, medidores, bombas, etc. Los materiales más utilizados son: concreto, hierro, acero, cobre, PVC, etc. La acción del agua sobre algunos metales como el hierro puede provocar problemas de corrosión. Asimismo, el equilibrio calco-carbónico del agua proporciona a ésta propiedades agresivas o incrustantes que se reflejan en las tuberías de las redes de distribución, efectos que pueden sumarse a los motivados por procesos microbianos.

Muy a menudo la incidencia de la corrosión se refleja en su vertiente económica: inutilización de tuberías, válvulas, bombas e incluso captaciones subterráneas. Países como Dinamarca y Suecia han calculado un costo anual de entre 5 250 000 y 5 650 000 dólares por habitante por problemas de corrosión en 1983. Por otra parte, la calidad del agua puede cambiar en relación con la finalidad a que es destinada (puede tener mal gusto, sólidos en suspensión, color, etc.), a causa de alteraciones de las características organolépticas de la misma, y existe incluso el riesgo de pasar en forma de solución, dependiendo de las características de las tuberías, metales pesados que pueden ser tóxicos (Cd, Pb, etc.). Por esta razón, en muchos países no se autoriza actualmente la instalación de tuberías de Pb.

Como puede verse, las formas de corrosión pueden ser muy diversas. El problema es complejo porque los factores motivadores son muy diversos. Entre los más importantes se encuentran las condiciones del flujo, la composición de los ductos y las características biológicas y fisicoquímicas del agua. Cabe señalar que la presencia en el agua de determinadas floras bacterianas (bacterias sulfato-reductoras y ferrobacterias) incide directamente en el aumento de la corrosión del sistema. Las características químicas del agua pueden favorecer más la presencia de esta flora bacteriana que acelerará el fenómeno. Así, por ejemplo, el mecanismo de los procesos de corrosión del hierro por procedimientos químico-biológicos puede explicarse y entenderse con ayuda del esquema presentado en la figura IV.I.

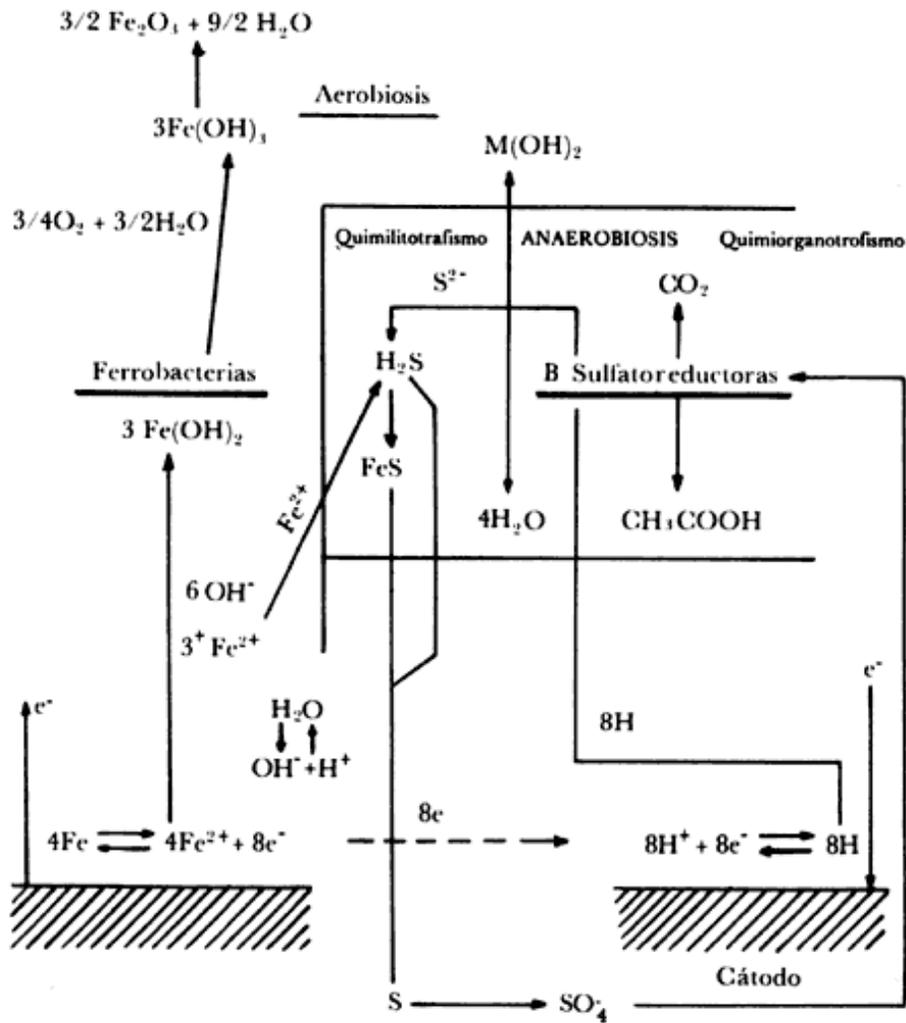


FIGURA IV. 1 Mecanismo químico biológico en los procesos de corrosión del hierro en medio acuoso.

En relación con las características fisicoquímicas del agua, cabe enumerar las siguientes: temperatura, pH, sales disueltas, oxígeno y bióxido de carbono disueltos, y prácticamente todos los cationes y aniones que intervienen en la composición mineralógica normal del agua: cloruros, bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, sodio, calcio, magnesio, etcétera.

Las sales corrosivas más importantes son los cloruros, Cl^- . Muchas aguas subterráneas contienen cloruros provenientes de procesos de contaminación (infiltración de aguas superficiales provenientes de actividades mineras, de tiraderos industriales y de fenómenos de intrusión marina, fundamentalmente), y las aguas superficiales están cada vez más contaminadas por deposiciones antropogénicas. Concentraciones de cloruros superiores a 100 mg/l en aguas de dureza mediana pueden causar problemas de corrosión, crecientes en forma exponencial, de tal manera que concentraciones de iones cloruro de 1 g/l provocan rápidamente la destrucción por corrosión de metales como el hierro y el acero inoxidable.

Asimismo, la presencia de sales disueltas modifica la estructura de las posibles incrustaciones existentes, volviéndolas porosas y heterogéneas, de tal forma que no constituyen una protección de las superficies metálicas. También se pueden formar zonas de aireación diferencial, al absorberse el oxígeno presente en el agua.

En cuanto a los sulfatos, en principio son poco corrosivos, aunque intervienen en el ciclo del azufre, **S** (véase la figura IV.1), y en sistemas anóxicos pueden contribuir a la formación de ácido sulfhídrico, H_2S compuesto muy agresivo que provoca problemas de corrosión muy serios. El poder corrosivo de los sulfatos, SO_4 aumenta al asociarse a los Cl^- , especialmente en aguas blandas, de baja alcalinidad y que no estén saturadas con CaCO_3 . La presencia de Ca^{2+} en el agua, asociada al equilibrio calco-carbónico puede contribuir; en aguas incrustantes, a proteger el sistema frente a la corrosión.

El tradicional axioma de que un agua incrustante no es corrosiva debe manejarse con cuidado. La presencia de un agua estable o sobresaturada en relación al CaCO_3 , aun cuando es una condición satisfactoria para la prevención de la corrosión, es un remedio que tiene muchas limitaciones.

En la formación de una película protectora sobre el metal no sólo hay que tomar en cuenta los datos típicos que se reúnen para deducir el **pH** de saturación del CaCO_3 , aunque algunas veces éstos pueden dar una idea bastante aproximada.

En las aguas potables existen o pueden existir muchas especies químicas que afectan de muy distinto modo la corrosión de los metales. Así, mientras una cierta dureza cálcica y una alcalinidad suficiente favorecen la formación de una capa protectora de CaCO_3 , la presencia de ciertas sales disueltas: **Cl**, **SO₄** y **NO₃-**, en concentraciones que sobrepasen un cierto umbral, puede cambiar radicalmente las características de dicha capa protectora, lo cual ocasiona un mayor ataque al metal base. Los iones agresivos interfieren en el depósito de la capa protectora, y es conocido el efecto detrimental de los iones cloruro en la corrosión de los metales.

En cuanto a las especies contaminantes que pueden estar presentes en el agua y que ayudan en el proceso de corrosión, hay que citar de nuevo a los iones nitrato. El exceso de nitratos es determinante para la clasificación de agua como no potable, por la incidencia que tienen dichos aniones sobre la población, especialmente la infantil, ya que se pueden combinar con la hemoglobina de la sangre.

La contaminación por nitratos es especialmente significativa en las comunidades rurales, donde los pozos de captación de agua, la mayoría de las veces artesanales y de poca profundidad, facilitan una contaminación bacteriológica y química de nitratos. Se ha encontrado que existe una relación directa entre la concentración de nitratos y las prácticas agrícolas, ya que las concentraciones máximas se han obtenido en épocas en que se aplica una mayor cantidad de abono (abonos químicos nitrogenados o nitrato de sodio directamente). El problema se agudiza en las aguas de abastecimiento, en las cuales la poca profundidad de los niveles freáticos y la permeabilidad de los materiales próximos a la superficie hacen que su vulnerabilidad a dicha contaminación sea muy acentuada.

La concentración máxima permitida de nitratos en un agua, para que sea potable, es de 50 mg/l. Así, en las redes de distribución de agua potable en las cuales se mantenga un buen control de la potabilidad de la misma, no se presentan problemas de corrosión graves.

CORROSIÓN BACTERIANA

Desde hace mucho tiempo se conoce el papel que desempeñan las bacterias en los procesos de corrosión metálica. Los primeros trabajos en este campo se deben a Von Wolzogen-Kuhr, que en 1923 puso en evidencia el mecanismo electroquímico del ataque del hierro por los microorganismos sulforreductores.

Los microorganismos constituyen un vasto mundo de seres unicelulares extendidos por toda la biosfera, y desempeñan un importante papel en la naturaleza. Gran número de ellos, en el suelo o en el agua, descomponen activamente la materia orgánica y los minerales, participando así en los ciclos naturales del carbono, nitrógeno y azufre.

Durante los procesos biológicos se forman numerosos productos. Hay productos finales de combustión: **CO₂** y **H₂O**, por ejemplo; gases, como hidrógeno, nitrógeno y oxígeno; sustancias, como el amoníaco, agua oxigenada, azufre, etc. productos ácidos o alcalinos. Todos estos productos se acumulan en el medio, modificando de forma continua su composición.

Ciertas bacterias son capaces de efectuar su síntesis a partir del agua, del anhídrido carbónico (**CO₂**) y de algunas sales minerales; éstas son las bacterias *autótrofas*. Se consideran como bacterias heterótrofas las especies incapaces de efectuar por sí mismas la síntesis de todos sus factores de crecimiento.

La corrosión microbiana puede definirse como *un proceso metabólico bacteriano que origina o acelera la destrucción de los metales*.

Los microorganismos influyen sobre los procesos de corrosión a través de mecanismos que les permiten adquirir la energía necesaria para las actividades vitales. Esta energía puede adquirirse a través de tres medios:

a) Respiración aerobia, que consiste en la eliminación progresiva de hidrógeno de los sustratos orgánicos. El hidrógeno es oxidado por el oxígeno del aire.

b) Respiración anaerobia, en la cual el sustrato orgánico es también oxidado por eliminación de hidrógeno, y éste reduce los compuestos inorgánicos.

c) Fermentación, proceso anaerobio en el cual el sustrato orgánico no es completamente oxidado.

Al igual que la corrosión, los procesos metabólicos se basan en la transferencia de iones hidrógeno o de electrones. La actividad de los microorganismos corresponde a valores de **pH** del medio que son también muy favorables a la corrosión.

Los microorganismos que desempeñan un papel en la corrosión pueden clasificarse de dos maneras: desde los puntos de vista fisiológico y los taxonómicos. Se piensa, generalmente, que la corrosión de los metales se debe a las bacterias anaerobias, por ejemplo, el *desulfovibrio*. Sin embargo, existen diversos tipos de bacterias que hay que tener muy en cuenta desde el punto de vista de la corrosión, como las bacterias del hierro, *thiobacterias*, y las bacterias aerobias que producen ácido sulfhídrico.

El potencial de oxidación de las bacterias se puede medir, y la intensidad de la oxidación se caracteriza por la pérdida de electrones. No hay dificultad en medir estas ganancias o pérdidas de electrones con la ayuda de un potenciómetro, utilizando un electrodo de platino como *punto cero* y un electrodo de referencia, por ejemplo, uno de calomelanos (mercurio/cloruro mercurioso).

Cuando una sustancia puede ceder electrones a un electrodo inerte y la sustancia oxidada puede recibir electrones de este electrodo, se dice que es una sustancia electroactiva.

Los cultivos microbianos son casi siempre sistemas fuertemente reductores. La actividad metabólica de las bacterias, resultante de su crecimiento y de su nutrición, sólo es posible gracias a la energía suministrada por la oxidación de los elementos nutritivos que ocasionan condiciones de reducción en el medio.

Las bacterias aerobias reducen los medios hasta un cierto nivel, que en general es moderado, aunque en algunos casos se llega a niveles altos. Las anaerobias presentes se aprovechan de estas nuevas condiciones y proliferan a su vez.

Así, los fenómenos de óxido-reducción desempeñan un papel muy importante en los procesos biológicos. Existen sustancias más fácilmente oxidables que otras. Esto puede determinarse midiendo la fuerza electromotriz o la diferencia de potencial generada por la corriente de electrones, obligándolos a pasar por un hilo conductor. Es lo que se conoce como *potencial redox* del medio. Este potencial se relaciona con el pH, la temperatura y la relación existente entre la concentración de sustancia oxidada y reducida. Las condiciones de oxidación corresponden a un potencial elevado; las de reducción, a una disminución del potencial.

Las bacterias más comunes se desarrollan a potenciales próximos o inferiores a **0** y **pH** comprendidos entre 6 y 9, zonas favorables a la corrosión. Esto quiere decir que si en un medio donde hay bacterias —que existen en todas partes en la naturaleza— los aportes nutritivos de origen orgánico son suficientes, las bacterias entran rápidamente en actividad, multiplicándose y metabolizando diferentes sustancias. Estos procesos ocasionan, de forma automática, la disminución del potencial redox, originando las condiciones electroquímicas favorables a la corrosión. Si estas condiciones existían ya, por la naturaleza del medio, serán activadas, y si no existían serán el origen de la corrosión.

Los microorganismos no pueden desarrollarse más que en determinadas condiciones de pH. Para cada grupo microbiano existen pH límites y un pH óptimo. En general, los medios neutros convienen a las bacterias heterótrofas que pueblan los medios naturales. Los límites de crecimiento de estas bacterias oscilan entre los pH de 5.5 a 8.5 o 9. Ciertas especies, como el *Thiobacillus*, se cultivan a pH muy bajos, de entre 1.8 y 2.

La corrosión anaerobia se considera posible en valores de pH comprendidos entre 5.5 y 8.5, en cuyo caso el valor del potencial redox permite establecer la siguiente clasificación de suelos debida a Starkey y Wright.

CUADRO IV.3 Potencial redox y corrosión anaerobia en suelos con contenido de sulfatos (SO₂-4-) apreciable.

<i>Potencial redox, mV</i>	<i>Riesgo de corrosión anaerobia</i>
<100	Severo
100-200	Moderado
200-400	Ligero
>400	Nulo

Hablando en términos generales, cualquier suelo con un contenido apreciable de sulfatos y con un potencial redox de +200 mV a menor está, probablemente, en camino de convertirse en anaerobio y debe considerarse peligroso.

CORROSIÓN ANAEROBIA

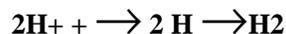
La corrosión anaerobia, originada por el desulfobivrio, se observó por primera vez en el suelo de los Países Bajos, en 1923, donde se comprobó la aptitud de estas bacterias para corroer el hierro y el acero, formándose sulfuro ferroso como producto de la corrosión.

Para comprender la forma en que estos organismos intervienen en los mecanismos de corrosión, debemos recordar los procesos básicos de la corrosión electroquímica. Para que exista corrosión, para que se pueda formar la clásica "herrumbre", constituida por hidróxido férrico, deben estar presentes tres elementos: hierro metálico, humedad y oxígeno.

La corrosión del hierro o el acero en presencia de oxígeno es un proceso electroquímico. El lugar donde el metal sufre la corrosión, donde el hierro pasa del estado metálico al iónico, y después al de solución, se llama ánodo. La reacción anódica puede escribirse de la manera siguiente:

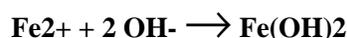


Los dos electrones liberados en el proceso anódico se desplazan, a través de la masa metálica, al cátodo o zona catódica. En ésta, los dos electrones son captados por los iones H^{+} presentes en la solución (electrolito), que pasan a hidrógeno atómico (H), el cual es liberado como moléculas de hidrógeno gas (H_2). La reacción catódica se puede escribir de la siguiente forma:



Esta simple exposición nos sirve para ilustrar la naturaleza electroquímica de los procesos de corrosión. En el ánodo tienen lugar las reacciones de oxidación o deselectronación, mientras que en el cátodo tienen lugar las de reducción o electronación.

En el caso de una pila de corrosión sencilla existe una interacción entre los productos originados por las reacciones anódicas y catódicas. El hidróxido ferroso, $\text{Fe}(\text{OH})_2$, es un resultado de los iones ferrosos, Fe^{2+} , formados en el ánodo y los iones hidróxilo, OH^{-} , formados en el cátodo; la carga negativa de los iones hidróxilo dará lugar a que estos iones migren en la solución hacia las áreas anódicas, en las cuales hay un exceso de carga positiva, debido a la presencia de los iones ferrosos formados. El hidróxido ferroso se forma cuando ambos iones con carga opuesta se encuentran, reaccionan y se precipita el correspondiente hidróxido. La reacción es la siguiente:



Este hidróxido ferroso se oxida a hidróxido férrico, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, la conocida *herrumbre*, por el oxígeno disuelto en el

agua (electrolito):



La figura IV.2 ilustra, de forma esquemática, este proceso.

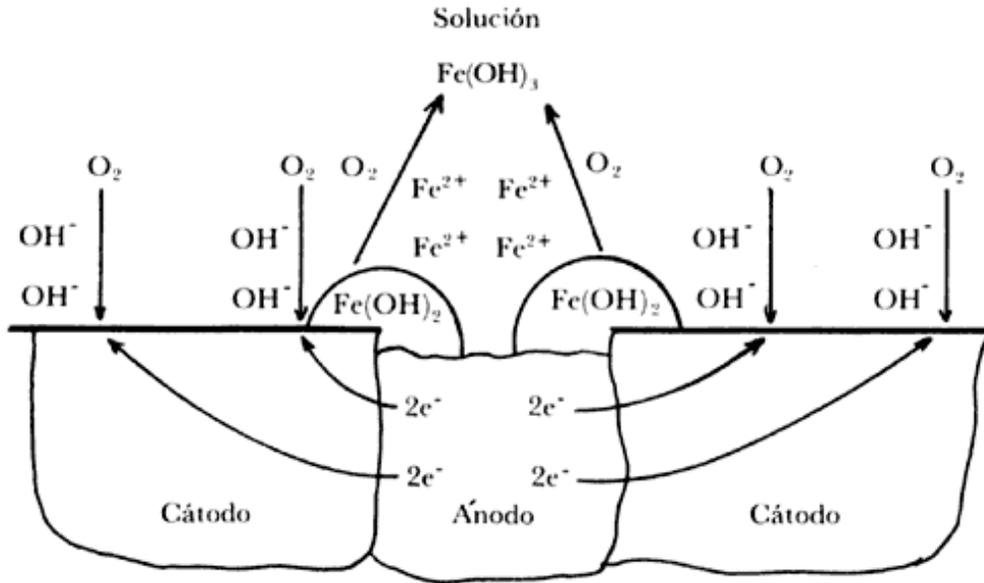


Figura IV. 2. Diagrama que muestra la formación de hidróxido ferroso e hidróxido férrico (herrumbre) por el proceso de corrosión.

Aunque el *desulfovibrio* causa la corrosión del hierro y del acero en ausencia de aire, queda patente, con lo indicado anteriormente, que el oxígeno es necesario en los procesos electroquímicos de corrosión, en los cuales se produce el hidróxido ferroso y el hidróxido férrico como productos resultantes. Veamos la relación existente entre los dos mecanismos de corrosión, el de oxidación y el bacteriano.

De acuerdo con la teoría electroquímica de la corrosión, para que ésta pueda tener lugar es necesaria la existencia de un ánodo, un cátodo y un electrolito (medio agresivo). En la figura IV.3 puede comprobarse que de la reacción en las áreas catódicas resulta la formación de hidrógeno molecular; H_2 , sobre la superficie del cátodo. En soluciones neutras, como las de cloruro de sodio, la formación de hidrógeno y su evolución como hidrógeno gaseoso son muy lentas. Éste puede ser el origen de la formación de burbujas de hidrógeno sobre la superficie catódica. Cuando esto sucede, esta película de burbujas de hidrógeno formada sobre el cátodo puede ocasionar tal disminución de la velocidad de corrosión, que puede llegar a detenerla completamente. Este fenómeno se conoce con el nombre de polarización catódica. La polarización catódica por burbujas de hidrógeno se presenta esquemáticamente en la figura IV.3.

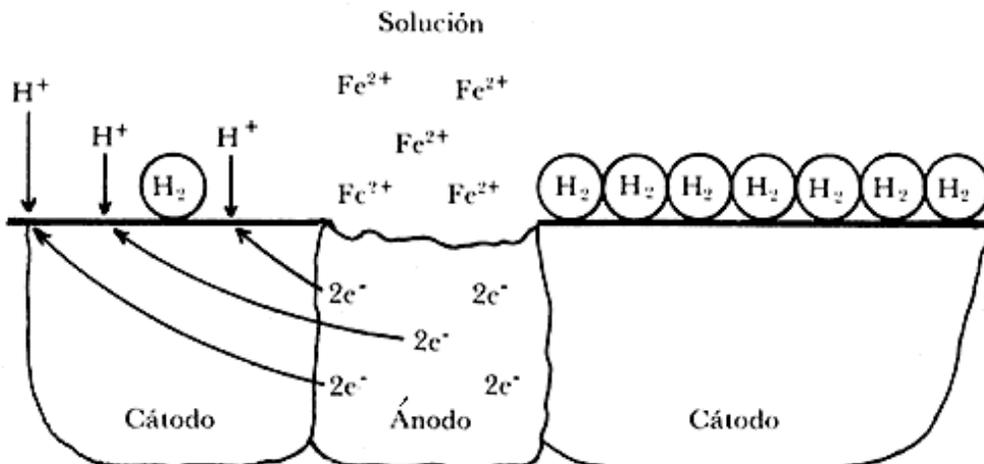


Figura IV.3. Esquema representativo de la polarización local de un cátodo por una capa de burbujas de hidrógeno.

El oxígeno disuelto en el electrolito neutro reacciona con el hidrógeno acumulado para formar agua, H_2O ; de esta forma el proceso de corrosión continúa. En este proceso, el oxígeno actúa como un despolarizante catódico.

El *desulfavibrio*, al igual que el oxígeno disuelto, actúa como despolarizante catódico; de esta forma el proceso de corrosión continúa. La figura IV.4 presenta, en forma esquemática, la corrosión bacteriana del hierro y del acero por el *desulfavibrio*.

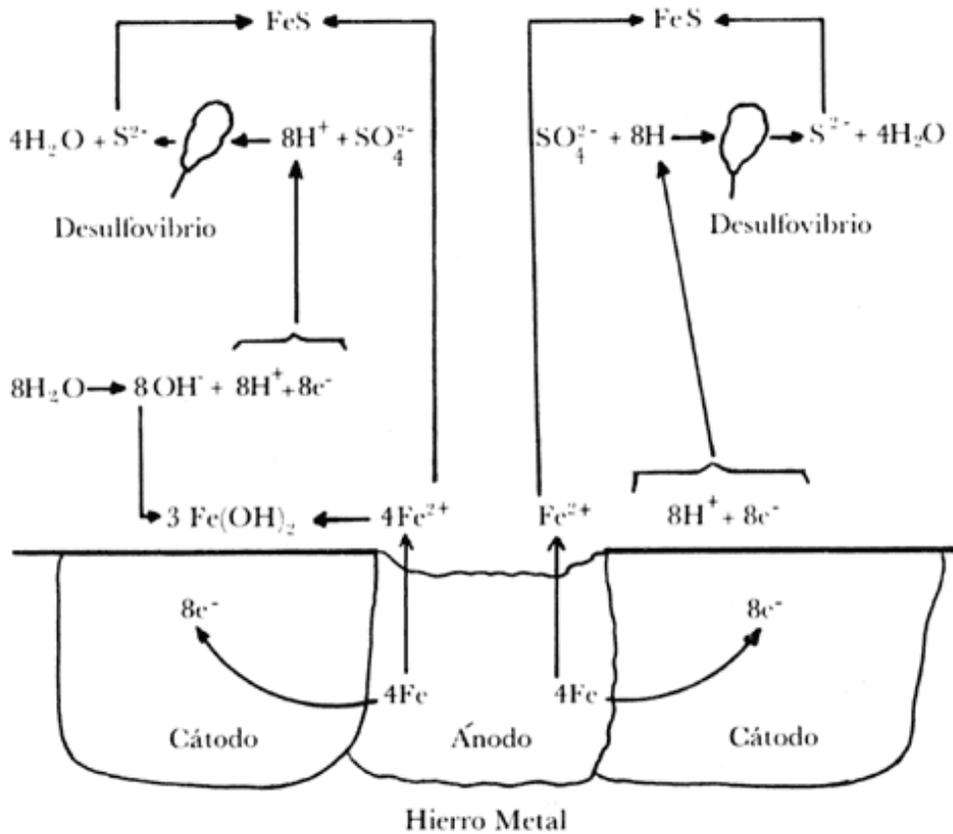


Figura IV. 4. Esquema representativo de la corrosión bacteriana del hierro por el *desulfavibrio*, de la cual se obtiene, como producto de corrosión, el fulfuroso ferros (Fes). reacción global: $4Fe + SO_4^{2-} + 4H_2O \rightarrow FeS + 3Fe(OH)_2 + 2OH^-$.

La teoría electroquímica de la corrosión bacteriana del acero por el *desulfavibrio* fue publicada por primera vez en 1934, por Von Wolzogen-Kuhr. Sin embargo, esta bacteria se asoció con la corrosión y deterioro de las tuberías enterradas en Holanda mucho antes, en 1923.

Aunque el mecanismo electroquímico de la corrosión bacteriana ha sido probado y aceptado, investigaciones posteriores han puesto de manifiesto que no es el único mecanismo a través del cual el *desulfavibrio* ataca al hierro y al acero. El mecanismo electroquímico de corrosión dispone de varias especies de *desulfavibrio*, las cuales producen la enzima hidrogenasa.

Recordemos que las sustancias que aceleran las reacciones químicas, sin que se consuman en el proceso, se llaman catalizadores; los catalizadores que están formados por células vivas de animales y plantas reciben el nombre de enzimas.

La hidrogenasa es una sustancia orgánica que cataliza la oxidación del hidrógeno (es decir cataliza la transferencia de electrones), activando, por tanto, la despolarización catódica:



Durante algún tiempo se llegó a pensar que sólo estas especies de *desulfovibrio*, las que producían la enzima, causaban la corrosión del hierro y del acero. Sin embargo, actualmente se sabe que tanto en las especies que producen hidrogenasa como en aquellas que no la producen la velocidad de corrosión es lineal y aproximadamente igual. Esto se debe a que la película parcialmente protectora de sulfuro ferroso no se forma sobre la superficie del metal. La velocidad de corrosión depende de la naturaleza y comportamiento de la película sulfurosa formada sobre la superficie del metal.

Con una película parcialmente protectora, formada sobre la superficie del metal, la velocidad de corrosión originada por la hidrogenasa positiva fue mucho mayor que la originada por la hidrogenasa negativa.

La acción corrosiva de la hidrogenasa negativa permite suponer que la corrosión ocurre como resultado del ácido acético formado en la interfase metal/sulfuro ferroso.

Es evidente también que hay corrosión por el simple ataque del sulfuro de hidrógeno generado por estos organismos sobre el hierro y el acero, dando lugar así a la formación y precipitación de sulfuro ferroso negro. Los iones sulfuro que así se forman actúan, por otro lado, como despolarizantes anódicos, al reaccionar con los iones ferrosos para formar el sulfuro ferroso.

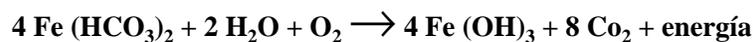
CORROSIÓN AEROBIA

Al igual que las bacterias anaerobias, las aerobias pueden ser también el origen de fuertes corrosiones. Por un lado, ocasionan la formación de ácido sulfúrico y, por otro, forman sobre el metal precipitados que, al quedar adheridos en forma aislada, originan procesos de aireación diferencial y, por lo tanto, de formación de picaduras.

Estas bacterias están representadas por las bacterias *ferruginosas* y *los thiobacillus*.

Bacterias ferruginosas. Estas bacterias están muy extendidas en la naturaleza; se las encuentra, a veces, en gran abundancia en aguas que contienen sales ferrosas disueltas. Van siempre asociadas a depósitos de hidróxido férrico.

Existen dos tipos de bacterias ferruginosas: las unicelulares y las pluricelulares. Las verdaderas bacterias ferruginosas son aerobias y, en principio, *autótrofas*. Se caracterizan por acumular hidróxido férrico alrededor de sus células, lo que origina que en sus proximidades aparezcan zonas manchadas con el conocido color de la herrumbre. La más conocida es la *Gallionella*. La clásica reacción de su metabolismo es la siguiente:



Estas bacterias son el origen de la formación de incrustaciones sobre la superficie metálica y, por lo tanto, de procesos de aireación diferencial que desembocan en la formación de picaduras.

Thiobacillus. Las bacterias *Thiobacillaceae* son aerobias autótrofas, y se caracterizan por crear en el medio donde se multiplican una reacción fuertemente ácida. Su pH óptimo de crecimiento se sitúa entre 3 y 4, y se pueden incluso cultivar a **pH 0.2-0.6**.

Todos los metales susceptibles al ataque por ácido sulfúrico diluido (10%) sufrirán una fuerte corrosión en presencia de estas bacterias. Estas bacterias son el origen de formación de **pH** muy bajos, concretamente de formación de **H₂SO₄**. En suelos que contengan sulfuros (piritas) pueden ocasionar fuertes corrosiones en cualquier estructura que pueda estar bajo sus efectos.

Los representantes más conocidos de este grupo son: *Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus thioparus*, *Thiobacillus denitrificans*, *Thiobacillus ferrooxidans*, etcétera.

Por último, cabe señalar que el medio marino, de pH próximos a 7.5-8, es siempre favorable al crecimiento microbiano. Desde el momento en que las partículas cargadas de microbios se depositan en la superficie de los metales para constituir la película microbiana (lo cual puede suceder en pocas horas), las bacterias entran en actividad y provocan la disminución del potencial redox. Las condiciones de corrosión se realizan *in situ* y el deterioro del metal aparece en unos días.

A modo de conclusión de todo lo anterior, es importante señalar que si no existen las condiciones para que haya

corrosión en un determinado medio, las bacterias pueden crearlas, a condición (para las heterótrofas) de que exista en el medio materia orgánica. Cuanto mayor sea la cantidad de materia orgánica contenida en un electrolito, mayores serán los gérmenes y mayor y más intensa la actividad bioquímica, y por lo tanto, la corrosión.

Las aguas de muchos puertos, lagunas y zonas costeras, fuertemente contaminadas por los desechos de las ciudades, son origen de graves problemas en las instalaciones portuarias, eléctricas, etc., que se encuentran en ellas.

Todo ello justifica plenamente los esfuerzos que realizan numerosos investigadores en todo el mundo para estudiar y conocer mejor el mecanismo de desarrollo de estos organismos, con el fin de tratar de combatirlos y reducir, en lo posible, las grandes pérdidas que ocasionan.

BIBLIOGRAFÍA

Existe abundante información relacionada con el tema de la corrosión atmosférica. Algunos libros que pueden ayudar al lector a profundizar en el tema son:

5. Felú y M. Morcillo, *Corrosión y protección de los metales en la atmósfera*, Ediciones Bellaterra, Barcelona, 1982.

W.H. Ailor, "Atmospheric Corrosion", John Wiley and Sons, Nueva York, 1986.

"Corrosión in Natural Environments", ASTM, STP 558, Filadelfia, 1974.

"Metal Corrosión in the Atmosphere", ASTM, STP 435, Filadelfia, 1968.

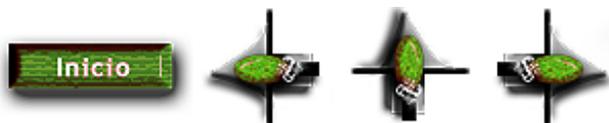
Para todos aquellos lectores que después de leer el libro sientan la inquietud de montar su propia estación de corrosión atmosférica, o decidan evaluar la agresividad potencial de una determinada atmósfera, pueden recibir asesoría en las siguientes direcciones:

Doctor Luis S. Hernández, Instituto de Metalurgia, Av. Dr. Manuel Nava Núm. 5, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, SLP.

Doctor Jorge Uruchurtu, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Palmira, Cuernavaca, Morelos.

Doctor J. Genescá, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F.

La coordinación en México del proyecto "Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica" (MICAT) se encuentra en el IIE y en la Facultad de Química de la UNAM.



APÉNDICE 1

1) PREPARACIÓN DE LOS PLATOS DE SULFATACIÓN PARA EXPOSICIÓN (ISO 9225:1992).

Equipo, material y reactivos utilizados. El equipo necesario es una estufa a una temperatura de 40 a 60 °C y un agitador magnético.

El material utilizado es el más común que existe en el laboratorio: vasos de precipitados, vidrio de reloj, papel filtro y cajas petri de poliestireno (se pueden utilizar cajas con un diámetro de 8.5 cm).

Los reactivos son: dióxido de plomo, goma de tragacanto, acetona y agua destilada.

PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE LOS PLATOS DE SULFATACIÓN

Se coloca un círculo de papel filtro en la base de la caja petri de modo que ésta quede cubierta por completo. Se vierte acetona en cantidad tal que moje totalmente el papel filtro de la caja Petri. Presionar firmemente el papel con el vidrio de reloj, cuidando que todas las partes del papel sean presionadas sobre la base de la caja; hacer esto hasta que la acetona se evapore.

Lavar y llenar los platos con agua destilada y dejarlos en reposo durante una hora.

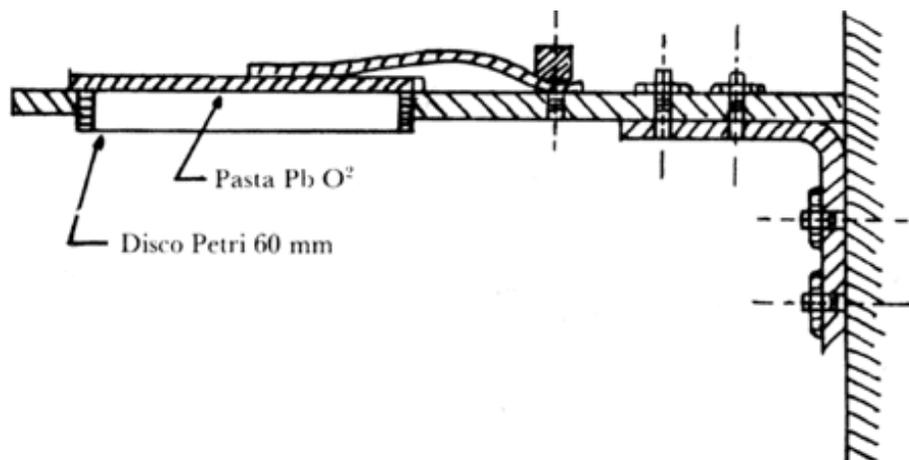
En la preparación de la pasta de dióxido de plomo debe mantenerse la relación de agua con la goma de tragacanto, que es de 900 ml de agua a 3.5 g de goma. Estas cantidades se mezclan a una velocidad alta hasta lograr la homogeneización de la mezcla. Disminuir la velocidad de agitación y continuar hasta completar dos horas de agitación.

Convertir 3.5 g de papel filtro a pulpa de papel y agregarla a 350 ml de la mezcla anterior (la mezcla restante puede ser almacenada). Agitar hasta lograr una mezcla suave y uniforme. Agregar 112 g de dióxido de plomo, aumentando la velocidad de agitación.

En los platos que se prepararon inicialmente, vaciar 16 ml de la mezcla anterior, extendiéndola hasta la orilla de cada plato. Después de esta operación, colocar los platos (destapados) en una estufa a una temperatura de 40-50 °C por un tiempo de 20 horas. Los platos que no vayan a ser expuestos deben taparse perfectamente bien.

2) EXPOSICIÓN A LA ATMÓSFERA DE LOS PLATOS DE SULFATACIÓN

Se utiliza un soporte para exponer los platos, los cuales deben estar en una posición tal que la pasta de dióxido de plomo quede hacia abajo. Estarán horizontales y no serán obstruidos por el viento normal ni por la circulación de corrientes de aire. El soporte debe ser de un material resistente a la corrosión atmosférica (por ejemplo, de aluminio). Un esquema del mismo se presenta en la figura 1.



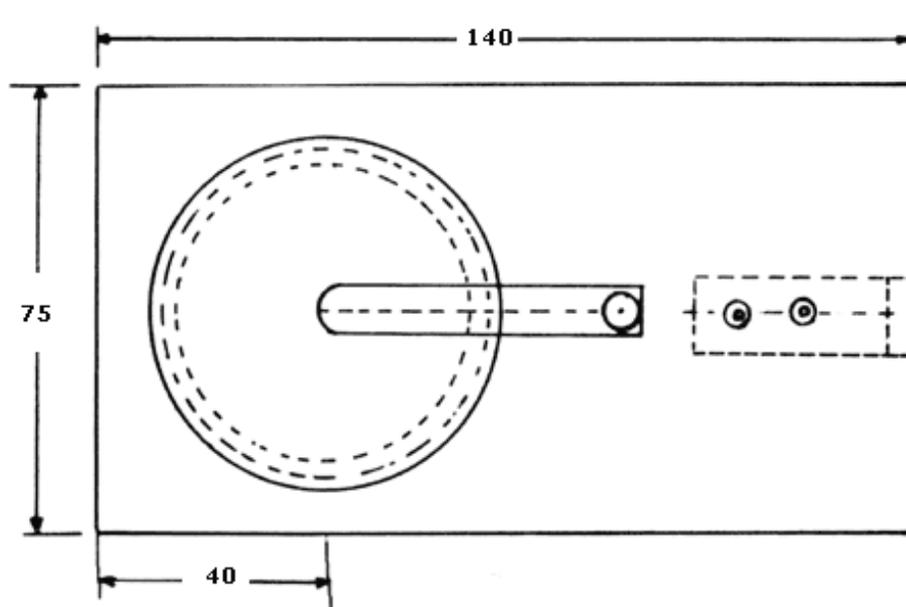


Figura 1. Apéndice 1. Soporte para plato de sulfatación.

El periodo de exposición recomendado es de 30 ± 2 días. Los platos pueden ser expuestos durante los 120 días posteriores a su preparación. Al concluir el periodo de exposición, los platos deben ser cubiertos perfectamente y su análisis debe realizarse dentro de los siguientes 60 días.

3) ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS PLATOS DE SULFATACIÓN

El contenido de sulfato del plato es removido y precipitado usando una solución de carbonato de sodio. Después el sulfato es precipitado con cloruro de bario, y su concentración se termina por medio de una turbidimetría.

Reactivos: solución de carbonato de sodio 5%: disolver 50 ± 0.5 g de Na_2CO_3 anhidro en un litro de agua.

Solución de ácido clorhídrico 0.7M: diluir 60 ml de ácido clorhídrico concentrado en un litro de agua.

Solución de sulfato de sodio: disolver 0.740 g de Na_2SO_4 anhidro y enrasar a un volumen de 1 litro.

Cloruro de bario grado reactivo ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Agua destilada.

Análisis. Desprender con una espátula el dióxido de plomo del plato y vaciarlo a un vaso de precipitados. Adicionar 20 ml de solución de carbonato de sodio y agitar. Dejarlo reposar (reaccionar) durante tres horas, agitando ocasionalmente.

Pasadas las tres horas someterlo a un baño maría durante 30 minutos. Enfriar y ajustar volumen a 50 ml con agua destilada.

Filtrar la solución en un papel filtro Whatman núm. 42. A 10 ml de esta solución adicionar de 5 a 7 ml de ácido clorhídrico con el fin de obtener un pH de 2.5 a 4. Si no resulta así, repetir el paso.

Vaciar una alícuota de 5 ml de la solución con pH de 2.5 a 4 a un tubo de ensaye y adicionar agua hasta completar un volumen de 20 ml. Agregar aproximadamente 0.3 g de cloruro de bario, agitar vigorosamente y dejar reposar durante unos 3 min. Efectuar la medida turbidimétrica en un espectrofotómetro (por ejemplo, Perkin Elmer) a una longitud de onda de 500 nm. Con el valor de la turbidez se obtienen los gramos de sulfato a partir de la curva de calibración elaborada previamente.

Se realiza el análisis de un plato no expuesto de la misma manera que el de los platos expuestos.

Curva de calibración. En un matraz volumétrico de 100 ml diluir 10 ml de la solución estándar de sulfato.

Pipetear los siguientes volúmenes de la solución anterior a tubos de ensaye: 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 ml. Diluir con agua cada tubo hasta un volumen de 20 ml. Agregar a cada tubo aproximadamente 0.3 g de cloruro de bario, mezclar vigorosamente y dejar reposar antes de hacer la medida. turbidimétrica a cada tubo.

Hacer una gráfica de la densidad óptica contra el contenido de sulfato correspondiente a: 50, 100, 150, 200, 250, 300 y 350 μg .

4) EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS

La velocidad de depósito de dióxido de plomo se calcula de acuerdo con la fórmula:

$$R = \frac{(S - SB)}{1000 at} 16.67$$

donde:

S = Contenido de sulfato en un plato expuesto (μg). Dato directo de la curva de calibración.

SB = Contenido de sulfato en un plato no expuesto (μg). Dato directo de la curva de calibración.

a = Área del plato expuesto (m^2). En este caso es de $5.67 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$.

t = tiempo de exposición (días).

R = Velocidad de depositación de SO_2 ($\text{mg}/\text{m}^2 \text{ día}$).

Es necesario hacer una comparación de los datos obtenidos a partir de este procedimiento con los resultados de otro método, con el fin de verificar la validez de las mediciones realizadas..

5) CURVA DE CALIBRACIÓN

La curva de calibración que se presenta en la figura 2 se construyó a partir de los siguientes valores:

CUADRO 1. Apéndice 1

C (μgSO_4)	A
50	0.035
100	0.055
150	0.065
200	0.07
250	0.075
300	0.078
350	0.08

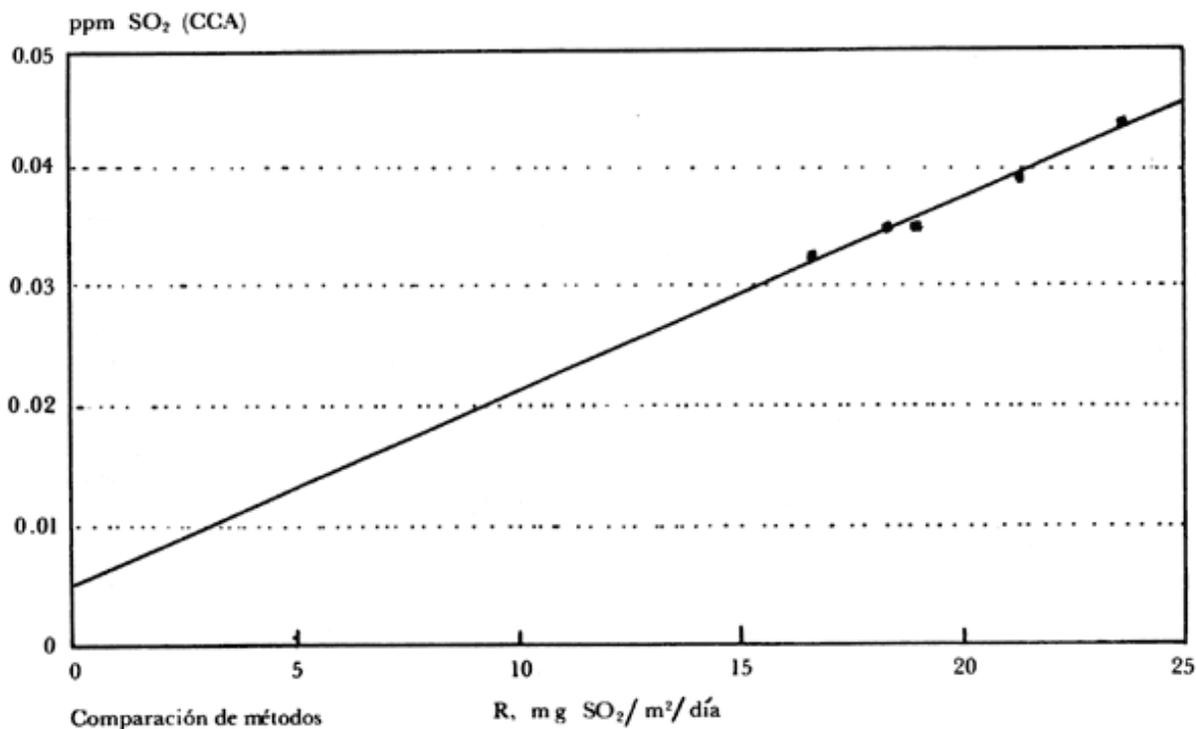


Figura 2. Apéndice 1. Curvatura de calibración.

6) DATOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS PLATOS DE SULFATACIÓN

Los datos obtenidos a partir del análisis de los platos se presentan en el cuadro 2:

CUADRO 2.

<i>Mes</i>	<i>Días</i>	μgSO_4	$R(\text{mgSO}_2/\text{m}_2\text{día})$	<i>CCA (ppm)</i>
Enero	30	350	23.32	0.0433
Febrero	18	215	21.25	0.0396
Marzo	30	264	16.46	0.0332
Abril	30	285	18.23	0.0347
Mayo	30	292.5	18.82	0.0351

CCA= Datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera.

μgSO_4 = Datos leídos en la gráfica de calibración.

R = Velocidad de depositación de SO_2 .

En el caso del plato no expuesto, se obtuvo un valor de **52.56 $\mu\text{g SO}_2$** .

En la figura 3 se presenta una comparación de los valores obtenidos con el método propuesto, con los obtenidos en el mismo periodo por el doctor Humberto Bravo, del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, situado a pocos metros de distancia del Edificio "D" de la Facultad de Química, que es donde se efectuaron estas mediciones. Como puede observarse, todos los puntos están sobre la línea recta que pasa aproximadamente por el origen de la gráfica, lo cual es una medida de la buena correlación existente entre los valores determinados por métodos distintos. Hay que resaltar que mientras unos valores se refieren a la concentración del **SO₂** en el aire, los otros dan idea de la cantidad de **SO₂** que llega a una superficie, valor importante con relación a la determinación de la influencia del **SO₂** en la velocidad de corrosión de un metal.

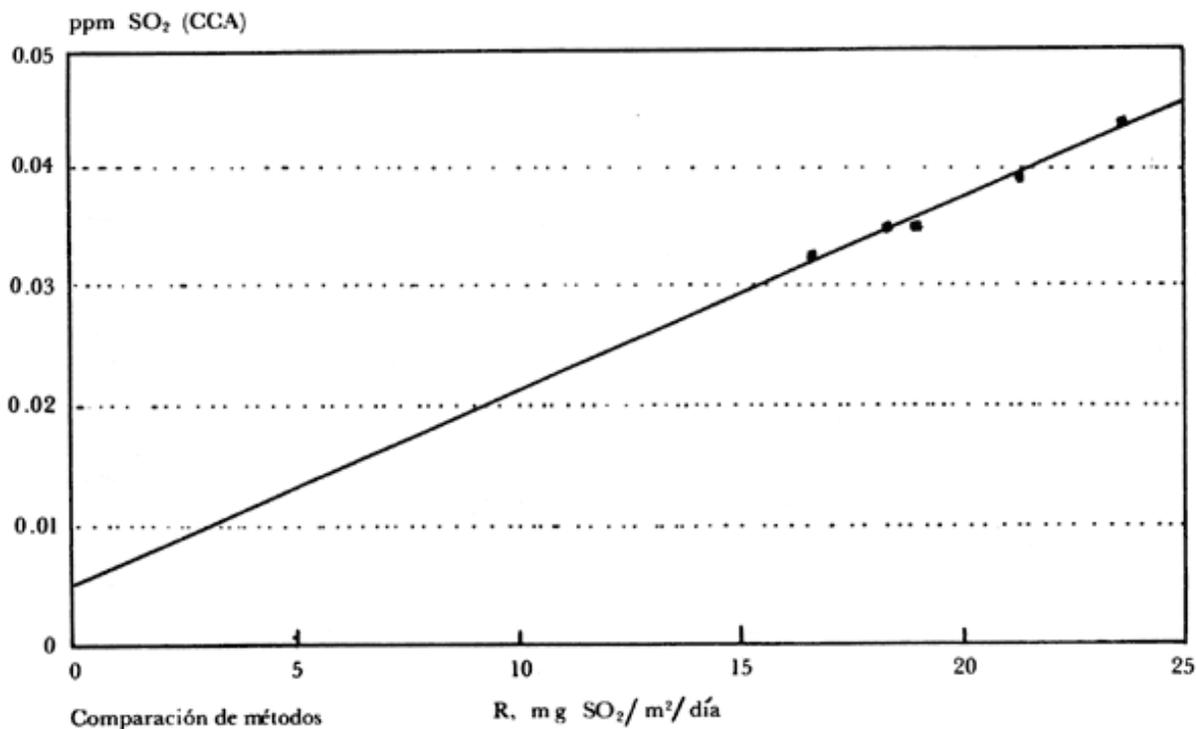
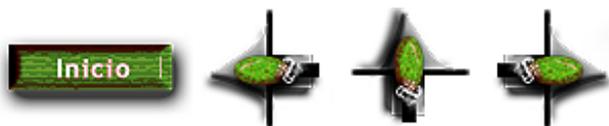


Figura 3. Apéndice 1. Rapidez de depósito de SO_2 .



APÉNDICE 2

DETERMINACIÓN DE CLORUROS

Si la estación de ensayos de corrosión atmosférica se encuentra situada relativamente cerca del mar, es conveniente analizar la influencia marina mediante dispositivos captadores especiales, dado que el NaCl presente en los aerosoles marinos, que es característico de una atmósfera marina, influye decisivamente en la corrosión de los metales expuestos a este tipo de atmósfera. Además, este contaminante "natural" casi nunca se detecta en las redes de seguimiento de la calidad del aire, por lo que hay que disponer de técnicas que permitan su determinación y cuantificación, con el fin de incorporar este parámetro en todas aquellas evaluaciones de la velocidad de corrosión que se realicen.

Los dos dispositivos más comunes son los basados en la probeta en ángulo de acero inoxidable o "teja" (1) y el de la "candela húmeda" (2). El primer dispositivo consiste en una probeta en ángulo de acero inoxidable, una chapa de unos 600 cm^2 de superficie, por lo general fija al pupitre en el cual se exponen las probetas metálicas, que recoge el agua de lluvia y mediante un tubo de goma apropiado la transporta al interior de un matraz o botella de plástico (véase la figura 1).

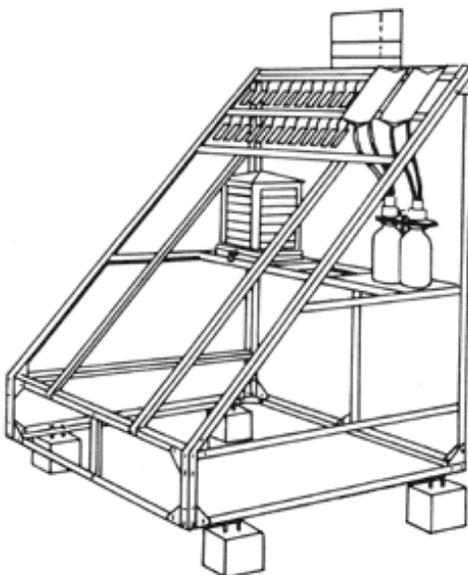


Figura 1. Apéndice 2. Apéndice de exposición de probetas. En la parte superior derecha se encuentra el dispositivo para la captación de cloruros en atmósferas marinas (partículas salinas de la atmósfera) conocido como dispositivo Hache.

Mensualmente se valoran químicamente los cloruros presentes en la muestra recogida de agua. Este método ha dado lugar a la norma DIN 50907-1952, para la determinación de cloruros en una atmósfera marina, ampliamente utilizada en todo el mundo por los especialistas en corrosión atmosférica por su sencillez y economía. Según la norma, la "teja" debe estar orientada al sur, con una inclinación de 45° y situada a unos 50 cm del suelo.

Diariamente debe realizarse una inspección visual el lavado de la "teja" con agua destilada (libre de cloruros), y cada mes debe recogerse el contenido de los depósitos. El segundo dispositivo, conocido como el método de "candela húmeda", se compone de un tubo de material inerte, vidrio o refractario, alrededor del cual se enrolla una cinta de papel de filtro o gasa hidrófila. Este tubo, de aproximadamente $25\text{-}30 \text{ mm}$ de diámetro y 30 cm de longitud, está colocado en un Erlenmeyer y bañado parcialmente por agua. Cada mes se valora el agua que baña a la candela para tener una idea de la concentración en sal del aire ambiental.

El análisis del contenido de cloruros puede efectuarse potenciométricamente, con un electrodo de plata/cloruro de plata, o bien mediante una titulación con nitrato de plata, AgNO_3 , empleando cromato de potasio, K_2CrO_4 , como indicador (método de Mohr). Para mayores detalles sobre las técnicas analíticas descritas, recomendamos al lector

dirigirse a cualquier texto de química analítica cuantitativa.

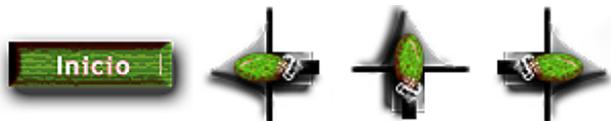
Los resultados del análisis se expresan en miligramos de **NaCl** por decímetro cuadrado y día, mg **NaCl/dm²** día.

REFERENCIAS

A. Hache, *Segundo Congreso Internacional de Corrosión Metálico*, 356, p. Nueva York, 1963.

H.R. Ambler y A. A. J. Bain, *Journal of Applied chemistry* 5, 437, 1955.

ISO: 9225:1992.



APÉNDICE 3

ANÁLISIS DE LA CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA MEDIANTE PROBETAS "ALAMBRE SOBRE TORNILLO"

El ensayo "alambre sobre tornillo" es una importante herramienta de trabajo en los estudios de corrosión atmosférica. Esta técnica fue iniciada en Estados Unidos por los Laboratorios Bell Telephone y posteriormente desarrollada por la compañía ALCAN.

Consiste, en lo esencial, en la evaluación de la pérdida de peso que experimenta un alambre que ha estado expuesto durante cierto tiempo en la atmósfera, enrollado firmemente en las roscas de un tornillo por lo normal de comportamiento catódico (más noble) con respecto al alambre (ánodo). También puede enrollarse en un tornillo de plástico.

En principio, el ensayo "alambre sobre tornillo" fue diseñado para estudios de corrosión galvánica en la atmósfera. En la actualidad, la compañía ALCAN lo utiliza para predecir en un tiempo corto (tres meses) la resistencia al ataque atmosférico del aluminio, en particular cuando se encuentra en contacto con metales distintos.

Hasta ahora son pocos los trabajos publicados que utilizan esta técnica. Un grupo de investigadores en Estados Unidos lo han aplicado con mayor frecuencia, y a ellos se debe su empleo como método de clasificación de las atmósferas marinas e industriales. ALCAN no sólo ha utilizado esta técnica para estudios de corrosión galvánica atmosférica, sino también para determinar la resistencia de cables conductores de aluminio reforzados con acero en zonas costeras, así como en la localización de fuentes de emisión de contaminación atmosférica y en planificación (diseño, material y recubrimiento protector) de estructuras metálicas en lugares donde la corrosividad atmosférica no es conocida.

En la actualidad este ensayo es conocido como "ensayo CLIMAT" (iniciales de Classification of Industrial and Marine Atmospheres).

En la figura 1 se puede observar la forma de las probetas "alambre sobre tornillo". Alambres de diferentes metales se enrollan fuertemente en la rosca de tornillos metálicos y de plástico. El diámetro del alambre es de 1 mm, mientras que el del tornillo es de 1 cm. Los tornillos tienen una longitud de 10 cm y un paso de rosca de 13 hilos por pulgada (aproximadamente cinco vueltas por cm). Se utilizan para cada muestra unos 80 cm de alambre, lo que supone la mitad del tornillo roscado.

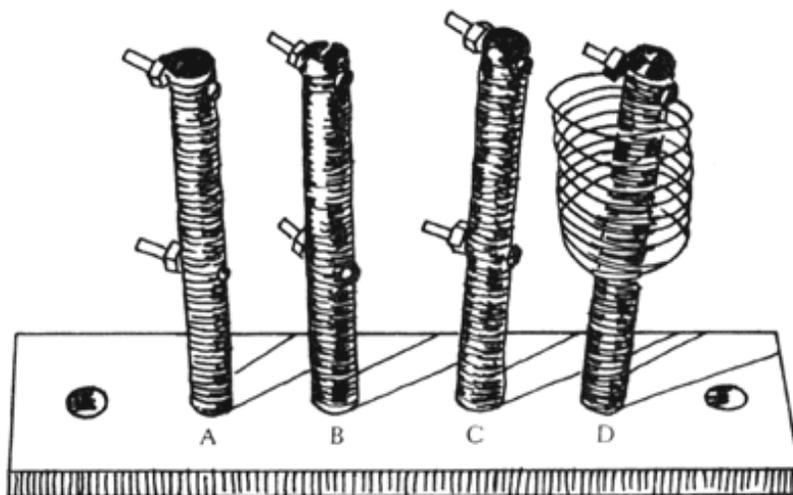


Figura 1. Apéndice 3. Probetas "alambre sobre tornillo". A: alambre-plástico, B: alambre-cobre, C: alambre-hierro, y D: alambre suelto (espiral).

Una vez limpio y pesado, con sensibilidad de 0.1 mg, el alambre se bobina en la rosca del tornillo, operación que debe realizarse con ayuda de guantes para no contaminar la superficie del alambre. Los terminales del alambre se

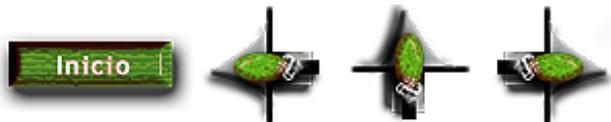
fijan al tornillo catódico con ayuda de dos tornillos de latón, que posteriormente se pintan para eliminar una posible acción galvánica no deseada.

En el cuadro 1 se presenta una combinación frecuentemente utilizada para determinar la agresividad de una determinada atmósfera

CUADRO 1. Apéndice 3. Combinaciones "alambre sobre tornillo".

<i>Alambre</i>	<i>Tornillo</i>
Aluminio	Hierro
	Cobre
	Plástico (roscado)
	Plástico (espiral)
Zinc	Hierro
	Cobre
	Plástico (roscado)
	Plástico (espiral)
Acero	Cobre
	Plástico (roscado)
	Plástico (espiral)

Los tornillos se exponen inclinados en ángulo de 45° con la horizontal. Al terminar el ensayo se desenrolla el alambre del tornillo, y después de eliminar los productos de corrosión mediante una limpieza química adecuada, se determina la pérdida de peso, expresándola como porcentaje de peso original.





APÉNDICE 4

LA MEDIDA POTENCIAL REDOX Y SU IMPORTANCIA EN LOS ESTUDIOS DE MEDIO AMBIENTE Y DE LA CORROSIÓN

Muy a menudo, la búsqueda de métodos elaborados para estudiar las especies complejas presentes en el medio ambiente ha hecho que no se preste la suficiente atención a parámetros básicos que, por su metodología, requieren de equipo sencillo pero son capaces de proporcionar datos importantes sobre las condiciones en que se encuentra el medio natural, así como sobre el efecto de agentes contaminantes. Uno de estos parámetros es el potencial redox, E_H . Su aplicación, aunque sencilla, requiere de condiciones muy cuidadosas para la obtención de datos que informen la realidad del medio que se estudia.

La medida del potencial redox en medios naturales demuestra la capacidad de óxido-reducción del sistema, causada directamente por las condiciones químicas de éste, que muy a menudo son inducidas por actividades microbiológicas (por ejemplo, bacterias sulfato-reductoras y ferrobacterias). Como ejemplo de esta actividad, se presenta en la figura 1 la formación de una vesícula gelatinosa en un proceso electroquímico de corrosión.

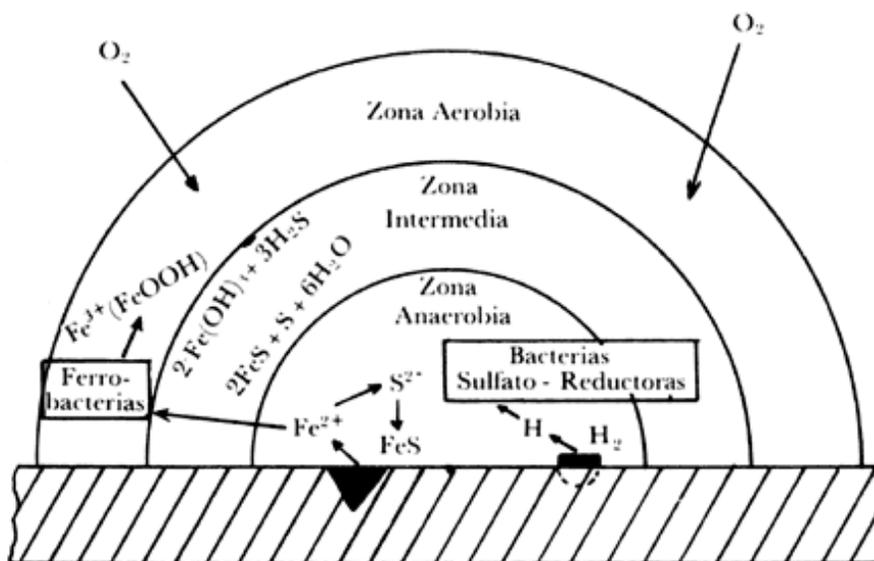


Figura 1. Apéndice 4. Vesícula gelatinosa.

Ahora bien, la medida de este parámetro no es fácil y su dificultad aumenta en los sistemas naturales, fundamentalmente aguas (superficiales y sobre todo subterráneas) y suelos. Esta dificultad se debe a diferentes causas, algunas de las cuales son: la presencia de pares redox a bajas concentraciones; su electroactividad en relación con el electrodo de medida (Pt, Au, grafito); la existencia de equilibrios como el sistema H_2O/O_2 , de difícil medida, etc. Otro aspecto que debe tomarse en cuenta es la influencia en la calidad de la medida de los electrodos, tanto el de referencia como el indicador.

Cabe señalar, asimismo, la importancia de las condiciones de conservación y las posibles transformaciones que puede experimentar la muestra, tanto si la determinación se hace *in situ* como en el laboratorio. En este último caso, los cambios producidos por el muestreo y el transporte pueden perjudicar la obtención de datos no representativos.

OBJETIVO

Determinación de la capacidad potencial de un medio natural para desarrollar bacterias sulfato-reductoras.

FUNDAMENTO

Medición del potencial redox (E_{redox}) mediante un electrodo de Pt, como índice de la capacidad de óxido-reducción del sistema, inducida por actividad microbiológica.

Para poder comparar los potenciales obtenidos a diferentes pH es necesario referirlos a una escala de $\text{pH} = 7$, según:

$$E_H = E_p + E_R + 0.059 (\text{pH} - 7),$$

donde: E_p = valor del potencial del electrodo de Pt respecto a un electrodo de referencia,

E_R = potencial del electrodo de referencia respecto al electrodo de hidrógeno, y

pH = potencial del suelo o del agua en que se efectúa la medición.

Con base en la medición del E_{redox} se puede determinar la agresividad potencial. Véase el cuadro a continuación.

CUADRO 1. Apéndice IV. Potencial redox del platino y su agresividad potencial frente a bacterias sulfato-reductoras.

E_H , mV	Agresividad potencial
<100	
100-200	Severa
200-400	Moderada
>400	Escasa
	Nula

INSTRUMENTAL

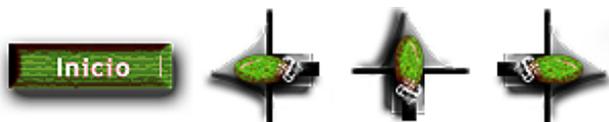
—Potenciómetro (por ejemplo, marca CRISON modelo DIGILAB 517).

—Electrodo indicador: Pt.

—Electrodo de referencia: Hg/HgCl₂ (calomelanos) o Ag/AgCl.

—Agitador mecánico magnético.

Temperatura de medición: 25° C.



Problema de larga trayectoria, pero que se ha visto acentuado con el surgimiento de la civilización moderna y sus miles de innovaciones, la herrumbre ha sido tratada en la colección La Ciencia desde México en otros dos libros. En el primero se presentaron las bases y conocimientos fundamentales necesarios para comprender el problema de la corrosión. El segundo se dedicó al método más usado en la práctica ingenieril de lucha contra la corrosión: la protección catódica. El tercer libro de esta serie versa sobre el binomio corrosión y medio ambiente. La corrosión es la alteración de los materiales provocada por el medio que los rodea y, dentro de la corrosión atmosférica, queda comprendido el ataque que ésta efectúa contra el exterior e interior de los edificios y las maquinarias, proceso que depende de los contaminantes presentes en el aire y de la humedad relativa del ambiente que son numerosos y entre los que sobresalen los dos que principalmente se tratan aquí, el dióxido de azufre, propio de los lugares donde hay concentración de industrias y los iones cloruro (Cl⁻), característicos de las zonas marítimas.

Más allá de la herrumbre III. Corrosión y medio ambiente es un libro que abunda en ejemplos para ilustrar los efectos de la corrosión en los instrumentos o aparatos que tenemos más a mano. Así, se nos dice que debido a la crisis económica se ha hecho necesario que los propietarios cuiden más sus automóviles para que duren más. Además, el deterioro por corrosión de la estructura del vehículo aumenta la posibilidad de accidentes pues pueden quedar afectadas partes vitales: dirección, suspensión y frenos. Asimismo se menciona la tragedia ocurrida en Bophal, India, cuando la corrosión de un tanque de almacenamiento subterráneo hizo que escaparan al aire 40 mil kg de metil isocianato con el resultado de miles de víctimas mortales.

Corrosión y medio ambiente es, pues, un libro que sirve al ingeniero encargado de la instalación de una fábrica y a aquellos que desean conservar su auto o su bicicleta en el mejor estado posible.

Joan Genescá es doctor en ingeniería química del Instituto de Química de Sarriá, España. Desde 1983 es jefe de la División de Ciencias Básicas de la Facultad de Química de la UNAM.



Inicio

