

se agoten las reservas de sustancias neutralizantes. En un suelo ácido se remueven más fácilmente los nutrientes, que han sido lixiviados y asimilados por las plantas, y el intemperismo no es suficientemente rápido para reemplazarlos. Con el tiempo, los suelos se empobrecen, con la consecuente repercusión sobre el sistema vegetal.

Desafortunadamente, esta acidez del ambiente no sólo se manifiesta en los bosques, suelos y lagos; también se nota en las aguas subterráneas cuya calidad está determinada principalmente por la de la precipitación pluvial, así como por la composición de los gases y partículas en la atmósfera, de los suelos y de las rocas con los que entra en contacto.

Si, como lo indica el ciclo hidrológico, la precipitación pluvial es el principal mecanismo de recarga de ríos, lagos y aguas subterráneas, una modificación intensa de su calidad, deberá reflejarse en estos sistemas acuáticos. Cuando la lluvia ácida llega a la superficie, se infiltra a través de suelos con mayor o menor cantidad de carbonatos y otras sustancias amortiguadoras. A su paso por estos estratos, el agua puede neutralizarse y aun volverse alcalina; sin embargo, los suelos arenosos o volcánicos contienen sustancias neutralizantes en cantidades tan pequeñas, que con el transcurso del tiempo pierden su capacidad reguladora. El agua ácida que se filtra a través de ellos permanece en ese estado y recarga los acuíferos, que llegan a tener un pH menor que 5.

Una de las consecuencias inmediatas del ataque de ácidos fuertes, como el nítrico y el sulfúrico, presentes en el agua de lluvia, es la dilución de una serie de metales, como el aluminio, que forma parte de los silicatos, como se observa claramente en la península escandinava, donde ya se han encontrado casos de acidez en sus mantos de agua subterráneos. A pesar de que hasta la fecha no se conocen con certeza los efectos que puede tener en los seres humanos beber agua con un alto contenido de aluminio (de uno a dos miligramos por litro), instituciones noruegas que se han dedicado al estudio de este problema, como el Buró Central de Estadística, demostraron que existe una correlación entre la demencia senil y los niveles de aluminio presentes en el agua.

La acidificación de los suelos es un problema grave y difícil de resolver a



Escultura de una de las fachadas del Palacio de Bellas Artes, en la que se observan los efectos de la lluvia ácida y la contaminación atmosférica (Foto A. Báez)

corto plazo, ya que cuando los suelos han acumulado gran cantidad de nitratos y sulfatos continúan contribuyendo a la acidificación de aguas subterráneas por muchos años. En el municipio de Mark, al suroeste de Noruega, esta acidificación afectó a más de 3 000 pozos particulares, en algunos casos con tal intensidad, que las regaderas y lavabos de las casas, y aun los cabellos de las perso-

nas, empezaron a adquirir una pátina de color verde, producto de las sales de cobre disueltas en el agua. Los análisis de los pozos demostraron que ésta era suficientemente ácida para corroer la tubería de cobre, de ahí que fuera capaz de producir los efectos señalados.

Otro caso parecido al anterior ocurre en la población de Värmland, Suecia, a 20 km de la frontera con Noruega; en

algunas casas de la localidad se ha acelerado la destrucción de los calentadores de agua. Los estudios realizados para establecer la causa de estos daños prematuros indican que la corrosión de las tuberías dentro de los calentadores se debe, principalmente, al bajo pH de las aguas subterráneas.

En un estudio realizado en 1978, se encontró que en ciertas regiones de Inglaterra y la República Federal de Alemania se liberaban a la atmósfera más de 30 toneladas de dióxido de azufre por hora, por cada área de 150 km². Durante ese mismo año, la lluvia depositó 586 mil toneladas de azufre en la superficie de Suecia, de las cuales los suecos consideran ser responsables de sólo unas 100 000 toneladas, es decir, un poco más de la sexta parte del total.

Medidas de control

Preocupados por la acidez de sus lagos, aguas subterráneas, suelos y bosques, los suecos han logrado reducir las emisiones de azufre y nitrógeno a la atmósfera, gracias a las medidas de control aplicadas, actualmente, del total de las emisiones de dióxido de azufre producidas en Escandinavia, Inglaterra y la República Federal de Alemania, las emisiones suecas se han reducido de una sexta a una décima parte.

También otros países como Inglaterra, la República Federal de Alemania, Estados Unidos y Japón han establecido leyes y reglamentos muy estrictos para reducir las emisiones no solo de las sustancias precursoras de la acidez ambiental, sino aun de otras que han tenido efectos negativos sobre la calidad del medio.

Es importante mencionar que mientras en otros países se multiplican las investigaciones y la aplicación de métodos correctivos para reducir la precipitación ácida, muy poco se ha hecho en México, que continúa su rápido crecimiento industrial, con una fuerte explosión demográfica. Los estudios realizados tanto en dependencias gubernamentales como en instituciones de investigación universitaria señalan que los niveles de contaminación en las grandes ciudades del país, y en particular en el valle de México, se incrementan constantemente.

El complejo metropolitano tiene una

población aproximada de 18 millones de habitantes; más de 30 000 pequeñas, medianas y grandes industrias, y aproximadamente tres millones de vehículos con motores de combustión interna. No causa, por lo tanto, extrañeza conocer la enorme cantidad de emisiones que se lanzan ahí a la atmósfera. En 1985, los valores estimados de los cuatro contaminantes más abundantes en el área metropolitana de la ciudad de México fueron los siguientes:

	Ton/año
Monóxido de carbono	3 720 000
Hidrocarburos	528 000
Dióxido de azufre	411 000
Oxido de nitrógeno	132 000

Como se deduce del cuadro anterior, la acidez atmosférica debe estar presente en el valle de México, ya que ahí son enormes las emisiones de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, ambos compuestos precursores de la lluvia ácida. En efecto, una serie de estudios que lleva a cabo desde 1984 el Laboratorio de Química Atmosférica, del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, confirma que la lluvia ácida está perfectamente establecida en el valle de México y que, además, muestra una tendencia hacia un continuo aumento.

Muestras secuenciales tomadas en Ciudad Universitaria en 1984, tuvieron un pH promedio de 4.47, un máximo de 5.8 y un mínimo de 3.56, simultáneamente, muestras tomadas a 80 km de distancia del valle, en Rancho Viejo, una zona próxima al Nevado de Toluca, tuvieron un pH con una media de 4.64, un mínimo de 4.31 y un máximo de 5.46. Esto señala la importancia de los mecanismos de transporte, y que aun las zonas rurales son afectadas por la contaminación originada en la ciudad de México.

A pesar de que en el valle de México se han registrado precipitaciones pluviales con un carácter fuertemente ácido y que se han encontrado valores de pH hasta de tres unidades, los efectos de la lluvia ácida parecen menos severos que en otras regiones del mundo. Esto se debe, en primer lugar, a que los suelos son fuertemente alcalinos y, en segundo

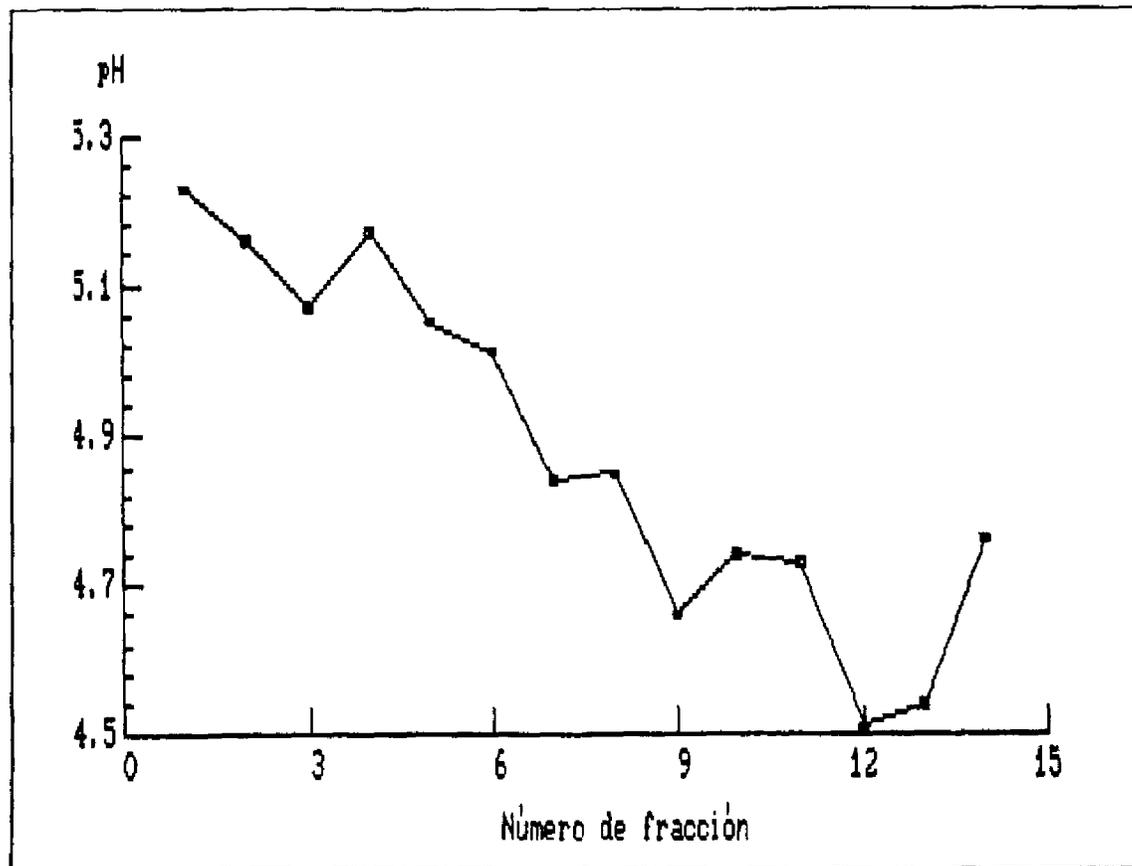
lugar, a que las fábricas de cemento, cal, yeso y cerámica, entre otras, arrojan a la atmósfera emisiones alcalinas. Estos dos factores contribuyen a neutralizar la acidez del aire, si bien sólo temporalmente; cuando se inicia la temporada de lluvias, por efecto del lavado atmosférico, las partículas alcalinas neutralizan las primeras lluvias, pero a medida que las precipitaciones se hacen más frecuentes o más abundantes se observa un incremento en su acidez. Esto se ha podido comprobar con el estudio de la composición química de la lluvia, que incluye la medición del pH mediante un muestreo secuencial. En la figura 2 se muestra gráficamente el comportamiento del pH del agua de una lluvia, colectada en forma secuencial en diversos recipientes. Como puede verse, las fracciones colectadas al inicio del evento fueron menos ácidas que las últimas.

En el valle de México ya no existen lagos importantes en los que pudiera observarse una posible acidificación, pero dadas las condiciones de los suelos calizos del valle, es probable que ésta no se hubiese producido.

Con respecto a los bosques situados al sur del valle de México, no se ha evaluado aún el efecto de la lluvia ácida sobre ellos ni sobre los suelos donde se desarrollan. La zona del Desierto de los Leones se encuentra muy dañada y se ha tenido que talar árboles en grandes extensiones; una de las causas que se atribuyen es el ataque de plagas, entre ellas la del gusano barrenador, pero es bien sabido que un bosque sometido al *stress* de la contaminación del aire es susceptible a plagas y a otros daños. Además, es muy probable que la lluvia ácida esté reduciendo el contenido de nutrientes, calcio y magnesio en los suelos de esa zona, y que ésta sea otra causa del daño a la vegetación.

Se mencionó anteriormente que en la zona metropolitana no existen lagos ni suelos que puedan ser acidificados rápidamente, pero no debe olvidarse la herencia cultural que existe en la ciudad, que sí es amenazada por la lluvia ácida, edificios, monumentos y otras obras invaluablemente dañados por ella. Recuérdese que los monumentos de Italia y Francia sufrieron más daños en los últimos 30 años, debido a la acidez de la atmósfera, que en varios siglos.

Figura 2 Esta figura muestra la variación del pH con respecto a cada una de las fracciones de lluvia colectadas en un evento en la ciudad de México



Es tan grande la preocupación que causa la acidez del ambiente, que los países altamente industrializados han establecido comités y grupos de estudio para que señalen metas tendientes a disminuir las emisiones contaminantes.

En los países escandinavos y otros del norte de Europa se considera necesario que para el año 1993 el azufre se haya reducido en 30%, si se quiere disminuir gradualmente la acidificación de los lagos; en este mismo porcentaje deberán reducirse las emisiones de óxido de nitrógeno para 1995.

Estos porcentajes han originado serias controversias entre los científicos y algunos de ellos han manifestado "que la naturaleza, que es la que está sufriendo, opina que el 30% no es suficiente para evitar los daños al ambiente, y que las emisiones de azufre deberán reducirse hasta en 90%, mientras que los compuestos de nitrógeno y el ozono deberán acortarse en 75%".

Una de las pocas pero acertadas medidas que se han tomado en el valle de México es la sustitución del combustible, un derivado de la refinación del petróleo con un alto contenido de azufre, por gas, en las termoeléctricas; esto repercute en una sensible disminución de las emisiones de bióxido de azufre.

Conclusiones

La reducción de los niveles de ciertos contaminantes en la atmósfera es un gran reto, aun para la más avanzada tecnología. En gran medida, la aplicación de sistemas para el control de las emisiones a la atmósfera supone un incremento sustancial en los costos de producción que, a la larga, recae directamente sobre el consumidor. No obstante, éste es el precio que hay que pagar para preservar un ambiente limpio y saludable.

Sin duda, cada vez serán más costosos los sistemas de control para abatir los niveles actuales de contaminación, esto da lugar a las siguientes preguntas: ¿Cuanto tendrá que pagar el hombre para recuperar sus bosques con la fauna que abrigan? ¿Cuál va a ser el costo de la neutralización de sus ríos y lagos, para evitar la extinción de la fauna acuática? ¿Está la humanidad dispuesta a aceptar la destrucción de la herencia cultural de muchos siglos, representada por sus grandes obras de arte? Y, por último, ¿por cuánto tiempo más la humanidad podrá soportar la lluvia ácida y sus efectos? ●

BIBLIOGRAFIA

- Acid Deposition. Effects on Geochemical Cycling and Biological Availability of Trace Elements. Subgroup on Metal of the Tri-Academy Committee on Acid Deposition*, Ed. National Academy Press, Washington, D. C., 1985.
- Amansson, B., "New Action Plan to Tackle Air Pollution and Acidification", *Acid Magazine*, Vol. 6, 1988, pp. 2-5.
- Báez, P. A., G. H. Padilla y G. O. González, "Acid Rain over Mexico City and Surrounding Rural Areas", *Geof. Int.*, Vol. 25, núm. 2, 1986, pp. 315-346.
- Bravo, A. H., G. F. Perrin, E. R. Sosa y J. R. Torres, "Incremento de la contaminación atmosférica por ozono en la zona metropolitana de la ciudad de México", *Ing. Amb.*, Vol. 1, núm. 1, 1988, pp. 8-14.
- Falk, H., "Green Hair and Sea Shells", *Acid Magazine*, Vol. 6, 1988, p. 28.
- Graust, L., "On the Relation Between pH and the Chemical Composition in Atmospheric Precipitation", *Tellus XXIV*, Vol. 6, 1972, pp. 550-560.
- Hanneber, P., "Keeping Tabs on Acidification", *Acid Magazine*, vol. 1, 1987, pp. 2-4.
- Mohnen, A. V., "The Challenge of Acid Rain", *Scientific American*, Vol. 259, núm. 2, 1988, pp. 14-22.
- Oden, S., "The Acidity Problem—An Outline of Concepts", *Water, Air and Soil Pollut.*, Vol. 6, 1976, pp. 137-166.
- Thumberg, B., "Two Water Heaters Corroded", *Acid Magazine*, Vol. 6, 1988, p. 29.
- Wilson, E. W., "Sulfates in the Atmosphere: A Progress Report on Project Mist", *Atmospheric Environment*, Vol. 12, 1978, pp. 537-547.