

Protección ambiental: Técnicas analíticas nucleares en la vigilancia y la investigación de la contaminación atmosférica

*Por conducto de proyectos apoyados por el OIEA en unos 30 países,
los investigadores localizan e identifican las fuentes de contaminación*

por
Robert M. Parr,
Susan F. Stone
y **R. Zeisler**

La contaminación atmosférica se ha convertido en una cuestión de preocupación mundial, particularmente en algunas de las ciudades más grandes del mundo. Esta contaminación tiene muchos y variados componentes que afectan al medio ambiente y, de manera directa o indirecta, a la salud de las personas. Los principales componentes incluyen dióxido de azufre, partículas, monóxido de carbono, compuestos de hidrocarburos reactivos, óxidos de nitrógeno, ozono y plomo.

Si bien las técnicas nucleares tienen importantes aplicaciones en el estudio de casi *todos* ellos, es en el estudio de las *partículas en suspensión en el aire (APM)* donde las técnicas nucleares analíticas tienen sus aplicaciones más importantes. El presente artículo centra la atención en estas aplicaciones y en la labor del OIEA en esta importante esfera de estudio.

¿Qué son las APM?

Las APM se pueden definir como una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en un medio gaseoso (el aire). En general, la frecuencia de tamaño de las partículas tiene una distribución, en la que los dos principales valores máximos se sitúan aproximadamente en 0,2 micrómetros y 10 micrómetros. (Véase la figura.) Los tamaños de las partículas también pueden clasificarse según las fuentes de origen. Las partículas menores de 2 micrómetros pueden atribuirse fundamentalmente a los procesos de combustión (actividad antropogénica) o a la transformación del gas en partículas. Las partículas mayores de 2 micrómetros se originan, en su mayor parte, en los procesos mecánicos (por ejemplo, la erosión de los suelos) o en la combustión incompleta.

¿Cuál es la razón para querer estudiar las partículas en suspensión en el aire? Una de las razones princi-

pales tiene que ver con sus efectos sobre la salud. (Véase el recuadro de la página siguiente.) Los problemas sanitarios asociados a las APM comienzan a ser motivo de gran preocupación en muchos países y sobre todo ahora en los países *en desarrollo*, donde en algunas ciudades muy pobladas, el total de partículas en suspensión (TSP) a menudo sobrepasa con creces los límites indicativos establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Según la OMS, el TSP medio anual no debe exceder de 60 a 90 microgramos/m³. Sin embargo, muchas ciudades por lo regular sobrepasan estos valores. No menos de 17 de esas ciudades (todas ellas de países en desarrollo) tienen niveles de contaminación por TSP que oscilan entre moderados y altos, en gran medida debidos a la combustión del carbón y a fuentes industriales, y en grado creciente en casi *todos* los países, a los escapes de vehículos automotores. En muchas ciudades contaminadas, las consecuencias más directas son las que se perciben de forma inmediata: la reducción de la visibilidad de la atmósfera y la irritación de ojos y garganta. Sin embargo, mucho más engañosas e importantes son las repercusiones a más largo plazo en la salud.

Como esas repercusiones se asocian principalmente a partículas del margen de tamaño de unos 10 micrómetros o menores (denominadas partículas PM-10), estas son las que atraen mayor atención. Lamentablemente, sin embargo, aún no existen normas de calidad del aire internacionalmente reconocidas en lo que respecta a las partículas PM-10, y la mayoría de los países ni siquiera las someten a vigilancia sistemática (o sólo comenzaron a hacerlo en los últimos cinco años). En la práctica, las normas de calidad del aire propuestas en los Estados Unidos son las que más comúnmente se usan como base de comparación, a saber, la concentración anual media de las partículas PM-10 no debe exceder de 50 microgramos/m³ y el promedio de 24 horas no debe ser superior a los 150 microgramos/m³ más de una vez al año. (Véase el gráfico de la página siguiente para hacer una comparación de estos promedios con los resultados notificados en relación con São Paulo por un participante del Brasil en un programa de investigaciones del OIEA.)

El Sr. Parr es funcionario de la División de Sanidad Humana del OIEA y la Sra. Stone es ex funcionaria de esa División. El Sr. Zeisler es ex funcionario del OIEA en los Laboratorios de Seibersdorf.

Elementos característicos de las partículas en suspensión en el aire determinados mediante técnicas nucleares y conexas

Análisis por activación neutrónica (AAN):

Aluminio (Al), arsénico (As), oro (Au), bario (Ba), bromo (Br), calcio (Ca), cadmio (Cd), cloro (Cl), cobalto (Co), cromo (Cr), cesio (Cs), europio (Eu), hierro (Fe), galio (Ga), yodo (I), indio (In), potasio (K), lantano (La), lutecio (Lu), magnesio (Mg), manganeso (Mn), sodio (Na), níquel (Ni), rubidio (Rb), antimonio (Sb), escandio (Sc), samario (Sm), torio (Th), titanio (Ti), vanadio (V), tungsteno (W), cinc (Zn)

Emisión de rayos X inducida por partículas

(PIXE): Al, Br, Ca, Cl, cobre (Cu), Fe, Ga, K, Mg, Mn, Mo, Na, niobio (Nb), Ni, fósforo (P), plomo (Pb), Rb, azufre (S), selenio (Se), silicio (Si), Ti, Zn, zirconio (Zr)

Análisis por fluorescencia X (FX-DE):

Br, Ca, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Pb, Rb, S, Se, Ti, Zn

Estudios sobre contaminación atmosférica apoyados por el OIEA

Ante lo anteriormente expuesto y a la evidente necesidad de los Estados Miembros de evaluar y controlar la contaminación atmosférica, el OIEA inició en 1992 un programa coordinado de investigación (PCI) titulado "Investigaciones aplicadas sobre la contaminación del aire con empleo de técnicas analíticas relacionadas con técnicas nucleares". Además se ha prestado apoyo a cuatro proyectos de cooperación técnica. No hace mucho, en 1995, se puso en marcha un PCI para la región de Asia y el Pacífico con los mismos objetivos y procedimientos que el primero. Este programa se ejecuta en el marco de un proyecto conjunto del OIEA, el Acuerdo de Cooperación Regional (ACR) para Asia y el Pacífico, y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), sobre el empleo de isótopos y radiaciones para fortalecer la tecnología y apoyar el desarrollo ambientalmente sostenible.

Los PCI tienen tres objetivos: apoyar la aplicación de técnicas nucleares y conexas para realizar investigaciones y estudios de vigilancia de la contaminación atmosférica con fines prácticos; determinar las fuentes principales de la contaminación atmosférica que afecta a cada uno de los países participantes (con particular énfasis en los metales pesados tóxicos); y obtener datos comparativos sobre los niveles de contaminación en zonas de elevada contaminación (por ejemplo, el centro de una ciudad o una zona habitada hacia donde soplan los vientos provenientes de una importante fuente de contaminación) y de poca contaminación (por ejemplo, zonas rurales).

En principio, se puede utilizar una amplia gama de distintos muestreadores para tomar muestras de las

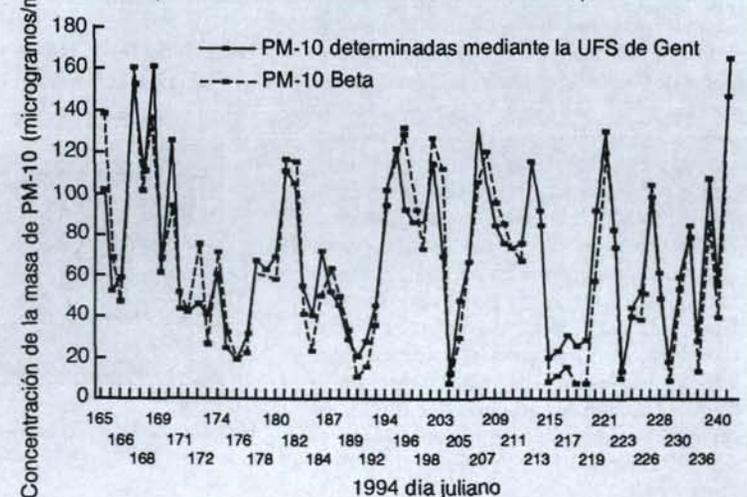
Efectos de la contaminación atmosférica en la salud

Que la contaminación atmosférica puede ocasionar la muerte se sabe al menos desde la tristemente célebre gran niebla contaminada de Londres de 1952, la cual se calcula que causó la muerte prematura a unas 4000 personas en el transcurso de una semana aproximadamente. Ese tipo de niebla ya no existe, pero las últimas investigaciones demuestran que la cantidad de muertes causadas en la actualidad por la contaminación atmosférica es probablemente mayor que lo que incluso se imaginaba.

Para averiguar qué provoca estas muertes y por qué, es necesario comprender primero cómo la contaminación atmosférica penetra en el cuerpo humano, proceso éste que tiene mucho que ver con el tamaño de las partículas. Las partículas mayores de 10 micrómetros suelen ser demasiado grandes y pesadas para recorrer largas distancias, y las que sí llegan al cuerpo humano, en su mayor parte son depuradas por la nariz. Las partículas *más pequeñas*, que en general se conocen como PM-10, de aproximadamente 10 micrómetros o menos, son las más peligrosas, pues mientras más pequeñas son, pueden penetrar *más profundamente* en los pulmones. Si bien todavía no se sabe con exactitud lo que hacen en ese órgano, algunos científicos han indicado que el sistema inmunológico puede reaccionar en su presencia como si fueran organismos invasores, lo que provoca una inflamación de los tejidos similar a la reacción alérgica de las personas que padecen la fiebre del heno, pero en el caso de partículas ultrapequeñas la inflamación se produce muy en el interior de los pulmones. Las peores consecuencias las padecerán aquellos que ya tienen una enfermedad respiratoria grave, por lo que muchos de los que mueren durante períodos de altos niveles de PM-10, probablemente habrían muerto de cualquier manera unas semanas o meses después. Esto es lo que los epidemiólogos llaman *eliminación selectiva*. Sin embargo, a partir de la comparación efectuada entre ciudades de los Estados Unidos con diferentes niveles de PM-10 se dispone de datos que demuestran que la esperanza de vida general disminuye si aumenta el nivel de PM-10, debido principalmente a incrementos de las tasas de mortalidad por enfermedades cardiopulmonares y el cáncer de pulmón. No se trata, pues, de una *eliminación selectiva* de los más débiles, sino de una verdadera amenaza para la salud de cualquier persona.

La cantidad de personas afectadas no puede calcularse con precisión, y ni siquiera los científicos que laboran en esta esfera han llegado a un consenso sobre la forma de hacerlo. Con todo, algunos reputados científicos de la esfera gubernamental apuntan que la contaminación atmosférica puede causar la muerte de unas 60 000 personas al año en los Estados Unidos, y de unas 10 000 en el Reino Unido. De ser correctas, estas cifras indican claramente que la contaminación atmosférica no sólo constituye un importante problema ambiental, sino también un gravísimo problema para la salud pública.

Caracterización de los aerosoles en São Paulo (concentración de la masa de PM-10 en 1994)



Muestreo de las partículas en suspensión en el aire

El muestreo de las APM está muy relacionado con la diferenciación del tamaño de las partículas. Para la caracterización de las APM se emplean diversos dispositivos de muestreo. Los métodos más sencillos entrañan la toma de muestras del total de partículas en suspensión, sin ninguna selección de tamaño, y constan de un filtro (sustrato colector), una bomba y un aforador o regulador que hace pasar el aire a través del filtro a una velocidad dada. De esa forma se toman las muestra de las APM en el filtro. Los muestreadores más complicados toman las muestras de APM según las diversas fracciones de tamaño.

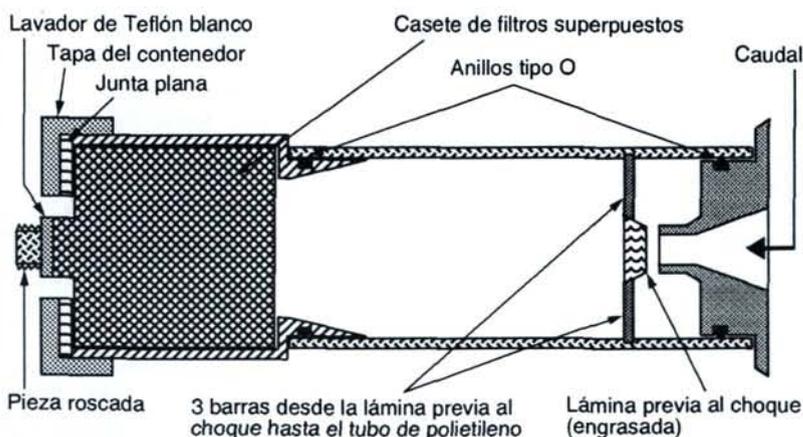
Toma de muestras de APM sin selección de tamaño. Toma de muestras de deposición en seco: Este tipo de muestreador depende sólo de la sedimentación gravitacional de las partículas. Consiste en la extracción de partículas hacia una superficie o colector sin precipitación, lo que se contrasta con la deposición húmeda (que es la extracción de partículas por precipitación, como la lluvia o la nieve) y la deposición en masa (que es la combinación de las deposiciones en seco y húmeda). **Toma de muestras del total de partículas en suspensión (TSP):** Normalmente, los muestreadores de este tipo son muestreadores de aire de "gran volumen", por los que se hacen pasar grandes volúmenes de aire a través de un filtro de poca resistencia (de vidrio o celulosa). El flujo de aire oscila entre 1,1 y 1,7 m³/min, o sea, unos 2000 m³/día. El conducto de entrada y el filtro colector tienen un diámetro de 25 a 30 cm. Este tipo de muestreo es particularmente útil para la observación de zonas apartadas, donde puede haber concentraciones de partículas relativamente bajas, o para la vigilancia de los productos de bajo nivel de las actividades nucleares artificiales.

Toma de muestras de APM con selección de tamaño. Muestreadores con etapas de dispositivos de impacto físico. El principio que aplican estos muestreadores es el de separar las partículas por tamaño utilizando "obstáculos" o dispositivos de choque. Las partículas se extraen hacia superficies sólidas mediante fuerzas de inercia; el aire fluye alrededor de un obstáculo (dispositivo de choque) y las partículas en este flujo siguen la corriente de aire o, según la masa (tamaño) de la partícula, chocan con el obstáculo y de esa forma se toman muestras de las mismas. Un dispositivo de choque en cascada consta de una serie de etapas de colectores de partículas, y en cada etapa se toman muestras de partículas de diferentes márgenes de tamaño. Las muestras de las partículas más grandes se toman en las primeras etapas. **Muestreadores con dispositivos de choque virtual:** La separación en estos muestreadores se produce en una superficie "virtual" que se forma al desviar corrientes de aire. Las partículas finas y gruesas pasan entonces a filtros separados. La separación por tamaños que hacen estos dispositivos no es tan marcada como en los dispositivos de choque físico y en su funcionamiento con partículas menores de un micrómetro aproximadamente parece difícil, pero se evita la mayoría de los problemas con las superficies colectoras. Un ejemplo de este tipo de muestreador de aire es un muestreador dicotómico, que tiene un conducto de entrada que selecciona las partículas por tamaño para muestrear partículas mayores de 10 a 15 micrómetros, y un dispositivo de choque virtual que además separa las partículas en dos fracciones, finas y gruesas. Estos muestreadores funcionan con un caudal volumétrico "mediano". **Muestreadores que emplean fuerzas centrífugas:** Estos tipos de muestreadores, por ejemplo, los ciclones, también pueden seleccionar las partículas por tamaños mediante un flujo en una cámara cilíndrica o cónica. Las partículas grandes se extraen de un flujo de aire constante mediante choque, y las partículas más grandes impactan las paredes del ciclón. Estas partículas se quedan en las paredes o se depositan en el fondo del ciclón y generalmente no se analizan. Los ciclones se utilizan frecuentemente para separar fracciones finas y gruesas de las APM. **Unidades de filtros superpuestos (SFU):** Este tipo de muestreador aplica el principio de filtración en secuencia donde el fraccionamiento de las partículas se logra mediante filtros de policarbonato parcialmente eficientes. Estos filtros se emplean debido a la forma en que toman las muestras de partículas específicas según las fracciones de tamaño deseadas. Un SFU consta de dos filtros en serie, ubicados contra corriente de una bomba. El primer filtro (etapa para partículas gruesas) toma muestras de partículas entre unos 3 y 15 micrómetros. El segundo filtro (etapa para partículas finas) toma muestras de partículas que pasan por el primer filtro, es decir, partículas menores de unos 3 micrómetros. Estos muestreadores también funcionan a un caudal volumétrico "mediano" (unos 18 L/min o 360m³/día).

Muestreadores personales. Estos son muestreadores de aire compactos y pequeños, que constan de una bomba y una unidad para la toma de muestras de partículas en un filtro. Estos muestreadores pueden reunir partículas de todo tamaño o tener un dispositivo de diferenciación de partículas por tamaño y, por lo general, son muestreadores de poco volumen (1 a 5m³/hora). La persona objeto de observación es la que porta el muestreador que se emplea para evaluar la exposición individual a las partículas en suspensión en el aire.

Muestreador de aire de filtros superpuestos "Gent": El SFU "Gent" está expresamente diseñado para tomar muestras de APM en la fracción de tamaño en que pueden ser inhaladas (PM-10), aplicando el principio de filtración en secuencia (véase el esquema). Este muestreador, diseñado en la Universidad de Gent, Bélgica (y actualmente suministrado por la Universidad Clarkson de los Estados Unidos), es el que utilizan todos los participantes en los programas coordinados de investigación del OIEA para los proyectos de investigación de la contaminación atmosférica y otros proyectos conexos. Este muestreador emplea una unidad de filtros superpuestos

tipo "abierto" en la que se utilizan dos filtros de policarbonato Nuclepore de 47 mm (un filtro con poros de 8 micrómetros y el otro con poros de 0,4 micrómetros) para tomar muestras de APM. El filtro se introduce en un contenedor cilíndrico que está provisto de una lámina previa al choque para la toma de muestras de partículas mayores de 10 micrómetros. El muestreador está diseñado para funcionar con un caudal de 18 L/min, y la etapa previa al choque proporciona un punto de corte de las PM-10 a temperatura y presión normales. Con este caudal, el filtro Nuclepore grueso (con poros de 8 micrómetros) tiene un valor d₅₀ de 2 micrómetros, de modo que realmente toma la fracción de partículas de entre 2 y 10 micrómetros de tamaño, mientras que en el filtro fino reúne las partículas menores de 2 micrómetros.



Países que participan en las actividades apoyadas por el OIEA en materia de vigilancia e investigación de la contaminación atmosférica

Participantes en el Programa coordinado de investigación (PCI) a nivel mundial: Australia, Tailandia, Bangladesh, China, Kenya, India, Irán, Turquía, Eslovenia, Portugal, Hungría, Bélgica, Austria, República Checa, Argentina, Chile, Brasil, Jamaica y Estados Unidos

Participantes en el PCI regional: Mongolia, China, Myanmar, Tailandia, República de Corea, Filipinas, Viet Nam, Nueva Zelanda, Indonesia, Singapur, Malasia, Bangladesh, Sri Lanka y Pakistán.

Proyectos de cooperación técnica: Costa Rica, Chile, Filipinas, Sri Lanka y Portugal

APM. (Véase el recuadro de la página 18.) Sin embargo, por razones prácticas, todos los participantes en los PCI están empleando un dispositivo de muestreo relativamente sencillo y barato. Todos tienen el mismo diseño para asegurar que los datos analíticos resultantes se puedan comparar. Una unidad de filtros superpuestos para partículas PM-10 de poco volumen, diseñada en la Universidad de Gent, Bélgica, toma muestras de partículas del aire en dos fracciones de tamaño. El Organismo ya ha suministrado muestreadores con este diseño a unos 30 países. (Véase el recuadro supra.)

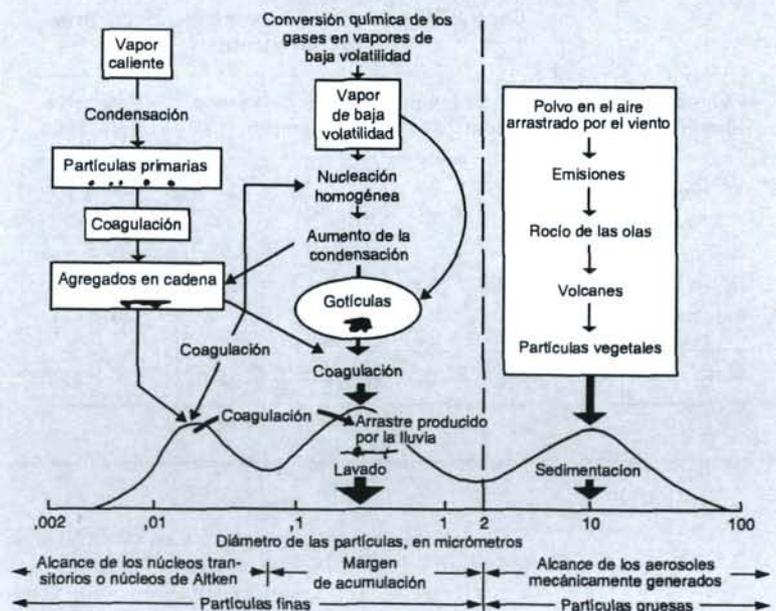
Estos PCI también se apoyan en el trabajo que se realiza en los Laboratorios del OIEA en Seibersdorf, que han instalado uno de los muestreadores de Gent para tomar muestras de las APM en Viena y en una localidad rural austriaca. (Véase el recuadro de la derecha.) Además, los Laboratorios participan activamente en la preparación de materiales de referencia para los estudios sobre contaminación atmosférica, incluidas muestras de filtros de aire de referencia para uso de todos los participantes en los PCI. De esta forma, se espera poder asegurar que los datos que se reúnan durante la ejecución del PCI tengan alta calidad, y que puedan hacerse comparaciones bien fundadas entre los datos proporcionados por distintos analistas. Por la misma razón, también se ha decidido que un solo coordinador de información evalúe centralmente la mayoría de los datos.

Aplicabilidad de las técnicas analíticas nucleares y conexas. Si bien en estos programas se aplican diversas técnicas analíticas, el mayor hincapié se hace en las técnicas nucleares y conexas como el análisis por activación neutrónica (AAN), el análisis por fluorescencia X basada en la dispersión de la energía (FX-DE) y la emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE). Estas técnicas, por sus características, son muy adecuadas (de hecho únicas) para realizar análisis multielementos no destructivos de las partículas en suspensión en el aire tomadas en los filtros. (Véase el recuadro de la página 17.) Los demás métodos alternativos exigen un prolongado proceso de disolución de los filtros, y por lo general sólo se

Aportación de los Laboratorios del OIEA en Seibersdorf

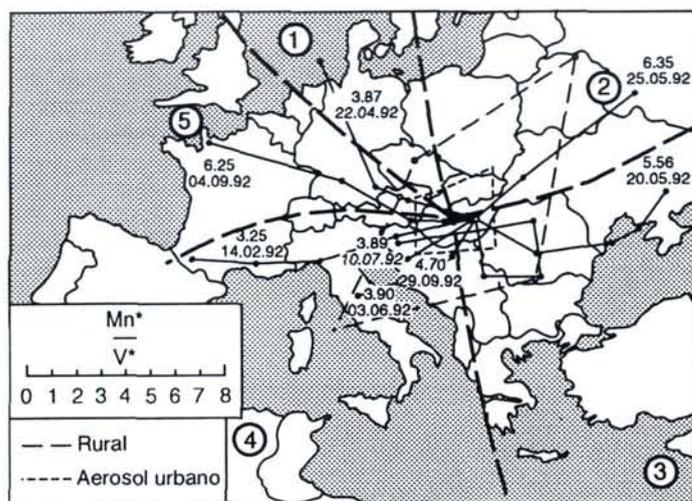
Una de las formas en que los Laboratorios del Organismo en Seibersdorf participan en los programas sobre contaminación atmosférica es mediante la evaluación de los procedimientos, incluida la toma de muestras, la preparación, el análisis y la manipulación de los datos. En una zona residencial urbana de Viena se establecieron puntos de toma de muestras de las APM que utilizaron el muestreador de PM-10 "Gent", así como en el emplazamiento de los Laboratorios en Seibersdorf, que se tomó como una zona rural representativa. Se investigaron los posibles escollos que podrían encontrarse en las etapas de muestreo y preparación, y la aplicabilidad de diferentes técnicas analíticas, y se obtuvo información sobre la adaptabilidad del muestreador de partículas de relativamente poco volumen en los países en desarrollo. Como las masas de APM tomadas con los muestreadores empleados en los PCI son de poco volumen se requieren métodos de análisis muy sensibles. Las técnicas analíticas nucleares como la AAN o la PIXE demostraron ser particularmente apropiadas para el análisis de las muestras obtenidas. El enfoque analítico de varias técnicas que se empleó en Seibersdorf no sólo produjo resultados para un gran número de elementos, sino que también en el caso de varios elementos, produjo resultados con dos técnicas diferentes, lo que hace más fiables los datos obtenidos. Si bien la cantidad de muestras tomadas fue limitada, se logró tomar una pequeña "instantánea" de la composición de los oligoelementos de las APM en la zona de Viena y en la zona rural en Seibersdorf. En el caso de las muestras tomadas en zonas más apartadas (por ejemplo, una zona rural), se hizo especial hincapié en la importancia de la caracterización del "vacío" (es decir, la composición en oligoelementos del "sustrato" o filtro) debido a que muchas de las concentraciones de oligoelementos tienen este mismo valor de vacío o están por debajo de éste. Incluso con las dificultades con que se tropezó en la toma y análisis de las muestras de las APM, se puede obtener mucha información sobre la composición en oligoelementos de las fracciones de APM que se pueden inhalar, mediante un análisis cuidadoso, así como sobre las fuentes de las APM (tanto naturales como artificiales).

Partículas en suspensión en el aire



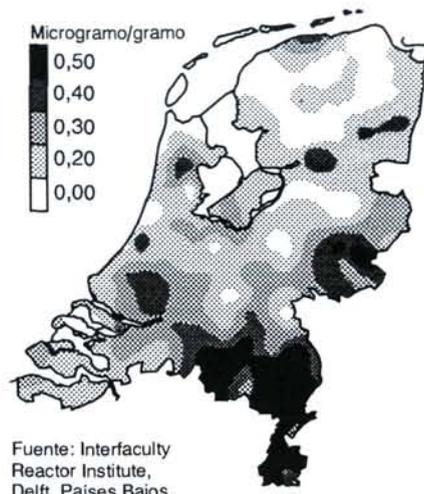
El diagrama muestra los márgenes de tamaño, los principales modos, las principales fuentes de masa de cada modo, y los principales mecanismos mediante los cuales se eliminan las partículas del aire.

Diagramas de distribución del sector de viento en Debrecen, Hungría, atendiendo a las partículas en suspensión en el aire en los medios urbano y rural



El gráfico, aunque un tanto complicado, demuestra básicamente que los componentes de la contaminación atmosférica bajo estudio habían provenído sobre todo de dos direcciones: Donets'k, Moscú, y las regiones de los Urales de la Comunidad de Estados Independientes; y del norte de Italia y los Balcanes noroccidentales. Además, se pudieron determinar algunos sucesos de contaminación en particular, así como sus fuentes y fechas específicas.

Aportación estimada de las fundiciones de cinc a la contaminación atmosférica con cadmio en los Países Bajos (basada en el análisis de muestras de musgo)



Identificación y distribución de las fuentes. Las fuentes de contaminación se caracterizan por estar compuestas por distintas mezclas de elementos en diferentes proporciones. A continuación se ofrecen algunos ejemplos de elementos asociados con seis fuentes *identificadoras* de partículas pequeñas, tomados del trabajo realizado por el participante de Australia en el programa de investigación del OIEA:

- vehículos motores: H, Na, Al, Si, S, Cl, Fe, Zn, Br, Pb, Elt.C (carbono elemental)
- combustión del carbón: H, Na, Al, Si, P, S, K, Ca, Fe, Elt.C
- humo: H, Cl, K, Ca, Elt.C
- suelo: Al, Si, K, Ca, Ti, Mn, Fe
- rocío de mar: Na, S, Cl, K, Ca
- industria: H, P, S, V, Cr, Cu, Pb, Elt.C

Si se procediera a la medición de varios elementos característicos de cada una de estas fuentes en un conjunto de muestras tomadas mediante filtros de aire, podrían emplearse técnicas estadísticas para calcular la contribución de cada una de las fuentes *identificadoras* en por ciento. (Véase el cuadro.) Este tipo de información resulta extremadamente útil para los organismos responsables de la protección del medio ambiente, ya que les permite conocer la procedencia de la contaminación en el sentido de cuánto puede aportar cada una de las distintas fuentes.

Las fuentes de contaminación también pueden identificarse combinando información sobre el contenido de oligoelementos en las muestras tomadas en los filtros de aire, con información *meteorológica*, sobre todo la referida a la dirección del viento y los movimientos recientes de masas de aire (las llamadas trayectorias de aire hacia atrás). (Véase el gráfico de

Distribución de la contaminación atmosférica (partículas PM-2,5) en una ciudad de Nueva Gales del Sur, Australia

Fuente identificadora	Contribuciones de las fuentes identificadoras en por ciento		
	Mes de invierno julio 1994	Mes de verano diciembre 1994	Promedio para 1994
Vehículos motores	68 ± 7	19 ± 5	54 ± 21
Humo	18 ± 7	—	8 ± 12
Suelo	—	2,7 ± 0,9	5 ± 4
Rocío de mar	3,5 ± 0,9	5,4 ± 0,8	4 ± 2
Industria	11 ± 2,6	73 ± 7	35 ± 21
Masa total	30 ± 2 µg/m ³	9,5 ± 0,6 µg/m ³	14 ± 8 µg/m ³

pueden aplicar a un elemento, o a un pequeño grupo de ellos (el ICP-MS, que es un método *relacionado* con las técnicas nucleares, es una excepción). Si bien algunos de estos elementos, como el plomo (cuyo símbolo químico es Pb), son de interés *directo* atendiendo a sus efectos en la salud, la mayoría de ellos son objeto de estudio ya que pueden aportar un *identificador* singular que permite determinar las distintas fuentes de contaminación.

la página anterior en que se ofrece un ejemplo de Hungría.)

Vigilancia biológica. Las mismas técnicas analíticas y estadísticas se pueden aplicar no sólo a las muestras tomadas en los filtros de aire, sino también a otros tipos de indicadores de la contaminación atmosférica. En los últimos años ha aumentado notablemente el interés por usar diversos tipos de biodetectores de la contaminación atmosférica, como muestras de musgo, líquen e incluso corteza de árboles. La "clave" al aplicar este tipo de técnica consiste en seleccionar un biodetector que obtenga la mayoría de sus nutrientes del aire y no del suelo u otra matriz a partir de la cual alimenta su crecimiento.

Las principales ventajas de los biodetectores son: 1) las muestras se pueden tomar casi "gratuitamente" (no hace falta emplazar costosos dispositivos para filtrar el aire que requieran energía eléctrica con las consiguientes labores frecuentes de supervisión y mantenimiento); y 2) las muestras ya se encuentran "en el lugar" en emplazamientos de muestreo que abarcan extensas zonas (pueden abarcar, incluso, a todo el país).

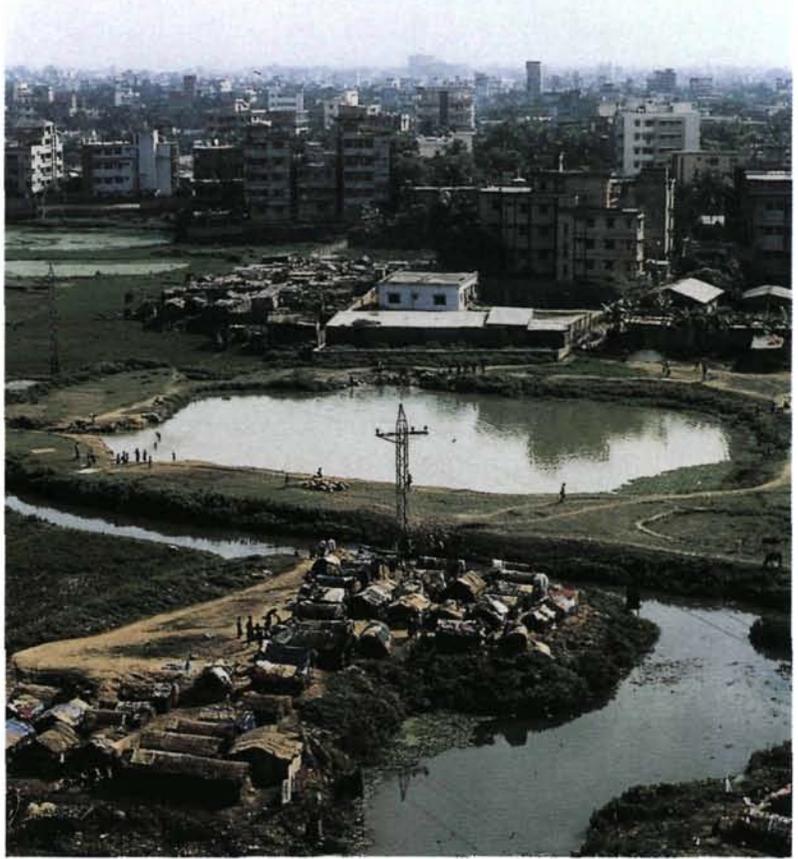
De esta manera se puede obtener información increíblemente detallada sobre la distribución geográfica de los contaminantes atmosféricos, no sólo respecto de los niveles de contaminantes específicos, sino también (mediante la identificación estadística) de las fuentes de dicha contaminación. (Véase la figura de la página anterior en la que se ofrece un ejemplo de los Países Bajos.) Varios participantes en el PCI del Organismo están estudiando también el uso de este tipo de técnica. El OIEA se halla en buenas condiciones para seguir apoyando la labor en esta esfera al haber certificado recientemente un material de referencia analítica adecuado, el líquen, con el concurso de 42 investigadores de 26 países.

Esferas que se priorizarán en el futuro

El PCI de alcance mundial sobre contaminación atmosférica que dirige el Organismo concluirá en 1997, y el PCI regional en Asia y el Pacífico, en 1999. La información que ellos proporcionan constituirá una base de datos excepcional sobre los niveles y las fuentes de tipos concretos de contaminación atmosférica en las principales ciudades de muchos países en desarrollo.

Puesto que las partículas objeto de medición son las que presuntamente afectan de manera directa a la salud humana, la base de datos del Organismo puede servir para estudiar los posibles vínculos entre la contaminación atmosférica y la incidencia de las enfermedades cardiopulmonares en las ciudades y regiones que se investigan. En la mayoría de los países, nunca antes se ha notificado este tipo de datos. Como todos los participantes en la investigación están usando el mismo tipo de muestreadores de aire y procedimientos de control de calidad analítica, se prevé un elevado nivel de fiabilidad en los resultados que permita hacer comparaciones significativas entre diferentes ciudades y países.

Actualmente en los Estados Unidos se estudian nuevas normas de calidad del aire que deben brindar



orientación no sólo sobre las partículas PM-10, sino también las PM-2.5. El programa del OIEA ya está proporcionando este tipo de información.

Una parte de la labor del Organismo está recibiendo apoyo en la región de Asia y el Pacífico en el marco del proyecto conjunto PNUD/ACR/OIEA sobre el empleo de isótopos y radiaciones para fortalecer la tecnología y apoyar el desarrollo ambientalmente sostenible. Se están celebrando debates con el PNUD con vistas a prolongar este trabajo en el período 1997-1999. De adoptarse tal decisión, los estudios sobre la contaminación atmosférica seguirán siendo un importante componente de dicho proyecto.

Asimismo, se espera que en América Latina, en el marco del programa regional ARCAL, se pueda fomentar el uso de técnicas nucleares y conexas para la vigilancia e investigación de la contaminación atmosférica; en este caso haciendo hincapié en el empleo de biodetectores.

En todo este trabajo se ha demostrado que las técnicas nucleares y conexas pueden proporcionar información valiosa sobre los niveles y las fuentes de contaminación atmosférica. Se trata de un género de información no sólo directamente valiosa en sí misma, sino que es prácticamente imposible de obtener por cualquier otro método de análisis instrumental no destructivo.

Bangladesh, uno de los países que participan en la investigación sobre la contaminación atmosférica con apoyo del OIEA.