

# Las técnicas nucleares y la evacuación de los desechos sólidos no radiactivos

*A menudo se utilizan métodos basados en la energía nuclear, para identificar y analizar los metales pesados y otros contaminantes del medio ambiente contenidos en los desechos sólidos*

por Sheldon  
Landsberger y  
Bruce Buchholz

Uno de los problemas vitales y más persistentes que afrontan los gobiernos locales, estatales y nacionales en la esfera de la salud pública es la evacuación de los desechos sólidos provenientes de la industria, las compañías de electricidad y las fuentes municipales.

Existe un interés cada vez mayor en la vigilancia, el control y la evacuación segura de los componentes químicos generados por estas fuentes. Por ejemplo, ya es harto conocido que la liberación de derivados procedentes de centrales alimentadas con carbón, a saber, las partículas aisladas suspendidas en el aire, las cenizas dispersas a niveles más bajos y las cenizas volantes, pueden tener efectos nocivos sobre la calidad del aire y del agua. Otra preocupación importante es la evacuación de los desechos sólidos municipales mediante incineración y recubrimiento directo por sus posibles efectos negativos para el medio ambiente, dada la alta concentración de metales pesados que contienen esos desechos. En muchos procesos industriales, el uso de cantidades muy grandes de minerales puede ocasionar también problemas algo complicados en materia de gestión de desechos.

Por esta razón, es importante disponer de técnicas analíticas químicas fiables que permitan evaluar las consecuencias de las prácticas generalizadas de evacuación de sustancias químicas orgánicas e inorgánicas. En las principales esferas de la ciencia y la tecnología se ha extendido el uso de técnicas analíticas nucleares y otras conexas, como el análisis por activación neutrónica, la fluorescencia X basada en la dispersión de la energía y la emisión de rayos X inducida por partículas. Estos métodos y técnicas tienen importantes aplicaciones prácticas ya que pueden utilizarse en la determinación individual de contaminantes concretos (por ejemplo, metales pesados tóxicos), y en los análisis multielementos destinados a identificar la fuente y determinar la distribución. Asimismo, ha recibido una amplia aceptación en el uso de otras técnicas nucleares, como los trazadores isotópicos, en la caracterización de los

regímenes de difusión de los metales en los suelos y medios acuosos y en las corrientes de aguas contaminadas. Estos parámetros son importantes para comprender la presencia en el nivel hidrostático de lixiviados móviles e inmóviles provenientes de los desechos sólidos y pronosticar su mecanismo general de transporte en el medio ambiente.

## Las técnicas nucleares y otras técnicas conexas

**Análisis por activación neutrónica (AAN).** El AAN es una técnica capaz de determinar de 40 a 50 elementos, muchos de los cuales tienen una importancia crucial para el medio ambiente (por ejemplo, antimonio, arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, selenio, vanadio, zinc y otros). También puede determinar importantes elementos como el sodio, el cloro y el potasio, así como muchos elementos que figuran entre las tierras raras. La determinación de las concentraciones de elementos se basa en la medición de la radiactividad inducida tras irradiarse la muestra en un reactor de investigación nuclear. La desintegración radiactiva de cada elemento produce un espectro energético de rayos gamma característico. En consecuencia, se puede medir y cuantificar una "huella" nuclear individual.

El análisis por activación permite medir la cantidad total de un elemento determinado contenido en un material, independientemente de su forma química o física. Ofrece las siguientes ventajas:

- las muestras utilizadas para el AAN pueden ser líquidas, sólidas o polvos;
- el AAN es una técnica no destructiva, y como no requiere análisis químicos previos, excluye completamente la presencia de contaminantes introducidos por reactivos;
- se pueden analizar simultáneamente muchos elementos;
- es altamente sensible a los oligoelementos.

Estos factores han llevado los límites de detección de muchos elementos de interés a niveles muy bajos, lo que no es fácil de lograr mediante otras técnicas analíticas. Además, la presencia de material orgánico en la muestra no afecta en lo más mínimo los resultados del AAN. El material orgánico constituye un problema característico y significativo en diversos tipos de métodos químicos convencionales.

El Dr. Landsberger es profesor asociado del Departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad de Illinois, 103 South Goodwin Ave., Urbana, Illinois, Estados Unidos de América 61801, y afiliado al Instituto de Estudios Ambientales. El Sr. Buchholz es candidato a Doctor en Filosofía del Departamento de Ingeniería Nuclear.



La planta municipal de incineración de desechos de Viena, cuya fachada fue diseñada por el pintor vienés Friedensreich Hundertwasser. (Cortesía: E. Schauer, Viena)

**Fluorescencia X basada en la dispersión de la energía (FX-DE) y emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE).** En ambas técnicas, la cuantificación de la concentración de los elementos se basa en la detección de rayos X. En la FX-DE las muestras son irradiadas con rayos X desde un tubo o una fuente radiactiva. En la PIXE se suelen utilizar protones como partículas cargadas para irradiar las muestras e inducir la emisión de rayos X. Ambos métodos tienen ventajas similares a las del AAN, pero, en general, con las técnicas FX-DE y PIXE pueden detectarse menos elementos que con el AAN. Sin embargo, este último no permite detectar elementos como el azufre y el plomo, aunque emplea las otras dos técnicas.

**Técnica de trazadores isotópicos.** Esta técnica se basa en el principio de que es posible inyectar en un sistema ambiental sólido o acuoso cantidades muy pequeñas de radiactividad mediante un radisótopo soluble, y detectarlas posteriormente, después que el radisótopo es transportado por algún mecanismo. Este método se ha empleado satisfactoriamente en estudios de hidrología y se ha difundido más su aplicación en la solución de problemas ambientales.

En esta técnica se suelen utilizar isótopos de bromuro, cadmio, cromo, cesio, cloro, sodio y zinc. El período de semidesintegración de la mayoría de estos radionucleidos es relativamente corto en comparación con el de los desechos nucleares; por lo cual resultan sumamente idóneos para los estudios en tiempo real.

### Instalaciones mundiales

La técnica del análisis por activación neutrónica se utiliza actualmente en más de 250 reactores de investigación destinados a la vigilancia ambiental ordinaria. Además, en muchas universidades, labo-

ratorios gubernamentales e instituciones privadas existen más de 100 instalaciones PIXE y un número mayor de unidades FX-DE.

Hay muchos científicos altamente calificados en prácticas analíticas que respaldan el uso continuado de estos métodos nucleares y otros afines en la investigación de los desechos sólidos. En las secciones siguientes se presenta una muestra de algunos de los programas mundiales en que se utilizan estas poderosas técnicas.

### Materia en forma de partículas suspendidas en el aire

Durante los últimos dos decenios se han iniciado numerosos estudios con miras a determinar y estudiar el destino y transporte de los metales pesados liberados en la atmósfera por las centrales alimentadas con carbón, las instalaciones de incineración, los diversos procesos de fundición, los escapes de los automóviles, los procesos industriales bajo techo, etc.

Existen diversos motivos para la toma de muestras y el análisis de la materia en forma de partículas suspendidas en el aire. La toma de muestras puede hacerse para determinar si la concentración total de materia en forma de partículas es lo suficientemente elevada para producir efectos nocivos en la salud pública. Por consiguiente, la toma de muestras puede ser parte de una evaluación de la exposición en la que se evalúe el riesgo, se reúna información con miras a la gestión de los riesgos o se realicen actividades de vigilancia en apoyo de estudios epidemiológicos. El muestreo puede realizarse también para determinar el cumplimiento de las leyes y los reglamentos sobre calidad de la atmósfera. Por último, los estudios de los procesos de transporte atmosférico, transformación y depósito pueden requerir una

Elemento	Cenizas volantes	Suelo
Aluminio	1,07-11,1%	7,1%
Antimonio	618-1665	(2-10)
Arsénico	75,3-229	6,0
Bario	< 700-1300	500
Bromo	1420-5180,00	5
Cadmio	80,4-314	0,06
Calcio	8,44-28,1%	1,37%
Cerio	4,42-51,90	50
Cesio	2,06-3,31	6
Cloro	3,6-20,9%	100
Cobalto	4,78-37,3	8
Cromio	94,1-865	100
Encandio	0,89-8,37	7
Estroncio	< 600	300
Hierro	0,26-2,12%	3,8%
Indio	0,49-1,91	—
Lantano	2,47-27,9	30
Manganeso	180-1000	850
Mercurio	18,5-209	0,03
Plata	31,4-60	0,1
Rubidio	12,2-40,6	100
Samarío	< 0,43-4,6	—
Selenio	< 2,51-10,9	0,2
Silicio	< 1,21-17,0%	33%
Sodio	1,52-2,83%	0,63%
Tantalio	< 0,24-3,36	—
Titanio	0,25-2,46%	5000
Torio	0,79-9,10	5
Vanadio	< 9,93-81,1	100
Zinc	8690-18 200	50

Notas: Todas las concentraciones se expresan en microgramos por gramo, a menos que se indique otro cosa.

Los datos se obtuvieron de un estudio realizado en la Universidad de Illinois, Estados Unidos de América.

### Compendio de la abundancia de elementos presentes en las cenizas volantes y en el suelo, liberados por la incineración de desechos sólidos municipales

amplia caracterización de las partículas. En esencia, el procedimiento consiste en colocar dispositivos para la toma de muestras atmosféricas en zonas estratégicas de las localidades urbanas, rurales y remotas, y posteriormente analizar los filtros de aire. Entre los análisis ulteriores se pueden incluir diversos modelos matemáticos para determinar las fuentes de la contaminación atmosférica producida por los elementos o evaluar sus consecuencias para la salud de la población en general o de los trabajadores industriales.

El análisis de los filtros de aire, que generalmente contienen una masa muy baja de la materia en forma de partículas suspendidas en el aire, se ha beneficiado sobremanera de todas las técnicas mencionadas en este trabajo. Entre los países que han participado en esas investigaciones, en virtud de un programa coordinado de investigación auspiciado por el OIEA, se encuentran Alemania, Argentina, Bélgica, Brasil, Canadá, Chile, China, Estados Unidos, Grecia, Hungría, India, Nigeria, la República Eslovaca, la República Checa, Turquía, Viet Nam y Zaire.

### Desechos sólidos

Quizás los desechos sólidos que más han sido analizados mediante métodos nucleares, especial-

mente el AAN, sean los residuos de la quema del carbón, a saber, las cenizas de dispersión a niveles más bajos y las cenizas volantes.

Mundialmente, se ha registrado un aumento constante del uso de carbón para generar electricidad destinada a diversas actividades industriales, residencias, edificios comerciales, así como para el sistema de calefacción.

Sin embargo, este uso en gran escala ha provocado la evacuación de millones de toneladas métricas de residuos de cenizas de dispersión a niveles más bajos y de cenizas volantes, evacuación que debe ser objeto de una gestión adecuada. Asimismo, se han emprendido numerosos estudios encaminados a determinar qué elementos, especialmente metales pesados como el plomo, el arsénico, el mercurio, el cadmio, el antimonio, y otros, pueden lixiviar de los desechos sólidos y convertirse en un posible peligro para las aguas subterráneas.

En los últimos años, la evacuación de los desechos sólidos municipales (DSM) se ha convertido en otra cuestión importante desde el punto de vista ambiental y político. La mayor parte de los DSM se puede evacuar mediante recubrimientos de tierra, pero éstos no eliminan los enojosos problemas de la lixiviación generada por la infiltración del agua de lluvia y la producción de gas metano (resultado de la descomposición). La sustitución de los recubrimientos se hace cada vez más difícil y otras soluciones como el reciclado sólo aliviarían parcialmente el problema. La incineración de los DSM reduce su volumen y masa entre el 80% y el 90%. Sin embargo, la ceniza resultante contiene altas concentraciones de muchos metales pesados como el plomo, el cadmio, el mercurio, el antimonio, el zinc y la plata. La amenaza que estos metales podrían constituir para las aguas subterráneas es real, de ahí que sea imprescindible emprender estudios a largo plazo sobre la composición química, la distribución de los elementos y las características de la lixiviación.

El OIEA publicó recientemente un documento técnico detallado que incluye directrices para la realización de estudios relativos a la lixiviación de las cenizas volantes y otros desechos sólidos, con especial referencia al uso de los métodos nucleares\*. En el documento se tratan diversos aspectos importantes, incluidas la caracterización física, la distinción entre los diferentes ensayos de lixiviación, la toma de muestras sobre el terreno y la aplicación de radiotrazadores.

En nuestro laboratorio de la Universidad de Illinois hemos empleado una serie de técnicas de análisis por activación neutrónica a fin de determinar 30 oligoelementos contenidos en las cenizas volantes liberadas por la incineración de los DSM\*\*. La distribución del tamaño de las partículas es una

\* *Guidelines for Leaching Studies on Coal Fly Ash and Other Solid Wastes With Special Reference to the Use of Radioanalytical Techniques*. IAEA TECODC 616, Viena (1991).

\*\* "Elemental Characterization of Size-Fractionated Municipal Incinerator Ash", S. Landsberger, B.A. Buchholz, M. Plewa y M. Kaminski, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* (en imprenta, 1993).

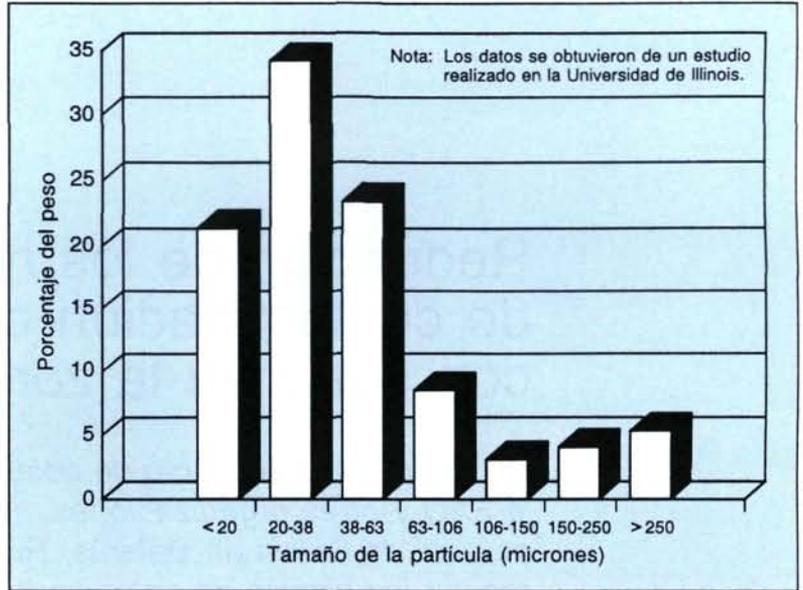
característica física importante. Los resultados han demostrado que más del 75% de las cenizas volantes está compuesto por partículas cuyo diámetro es inferior a los 63 micrones. (Véase el gráfico.) Estas partículas más pequeñas poseen un área superficial total extensa con muchas posibilidades de lixiviación. Nuestros datos confirman que la mayoría de los elementos potencialmente tóxicos se concentran en las partículas más pequeñas. Al compararlas con los valores normales del suelo, las cenizas volantes contienen cantidades muy elevadas de un sinnúmero de elementos. (Véase el cuadro.) Algunos, como el antimonio, el arsénico, el cadmio, el cromo, el indio, el mercurio, la plata y el zinc, están especialmente enriquecidos. Esos elementos pueden servir de marcadores de la fuente.

Una esfera de crucial importancia que ha sido descuidada por la gran mayoría de los investigadores en materia de incineración de los DSM es la caracterización de los elementos presentes en los enseres domésticos corrientes. Por ejemplo, es harto conocido que las pilas de plomo y ácido y las pilas secas corrientes contribuyen de manera significativa a aumentar los niveles de plomo, mercurio, cadmio, cobre y zinc de las cenizas liberadas por la incineración. Recientemente, investigadores de los Países Bajos y el Canadá, utilizando el AAN, demostraron que diversos plásticos contenidos en los desechos de los hogares son una fuente importante de cadmio. Así pues, sería muy prudente adoptar medidas para identificar los enseres domésticos que puedan contener estos metales pesados. La identificación de las fuentes de metales pesados podría llevar a las industrias a cambiar sus procedimientos de elaboración y eliminar o reducir drásticamente la cantidad de metales pesados que entran en la corriente de desechos.

Otro aspecto que causa gran preocupación es la evacuación de los desechos sólidos industriales, que se diferencian de los desechos sólidos municipales en que generalmente contienen menos variedad de metales pesados, pero en cantidades y concentraciones que pueden ser mucho mayores. Esto es especialmente válido para las industrias con producciones basadas en minerales. Los recubrimientos de tierra y las vías acuáticas son generalmente los destinatarios de los desechos industriales. Numerosos países utilizan métodos nucleares y otros métodos conexos para definir los desechos desde el punto de vista químico y estudiar sus características de lixiviación.

Las técnicas isotópicas, que normalmente utilizan trazadores radiactivos, se han empleado con éxito en muchos tipos diferentes de investigaciones. En el Simposio Internacional del OIEA sobre aplicaciones de isótopos y radiaciones en la conservación del medio ambiente\*, celebrado recientemente, se informó acerca de algunas de estas aplicaciones que incluyen estudios en las siguientes esferas:

- establecimiento de las rutas de descarga de las aguas residuales industriales en Malasia, en diferentes fases de la marea;
- pronóstico de las tasas de transporte de la contaminación proveniente de los recubrimientos y depo-



sitorios húngaros mediante el marcaje radiactivo de los elementos tóxicos presentes en el suelo;

- determinación de las distribuciones del tiempo de permanencia y los regímenes de circulación de los desechos y el sedimento en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales en la República Checa y la República Eslovaca;
- investigación de la eficiencia de los dispositivos de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales en Polonia.

En recientes investigaciones francesas en que se aplicaron las técnicas isotópicas se incluyeron la evaluación del riesgo de los desechos de la industria del hierro y el acero, la caracterización de una cubierta técnica y barreras de contención para los emplazamientos urbanos de desechos industriales, y el aprovechamiento de los desechos en la silvicultura y la industria.

**Distribución por tamaño de los oligoelementos contenidos en las cenizas volantes liberadas por la incineración de desechos sólidos municipales**

**Una cuestión de creciente importancia**

Es poco probable que disminuya el interés en la evacuación de los desechos sólidos. En la medida que los países en desarrollo y desarrollados incrementen el uso de los combustibles fósiles, amplíen sus industrias y aumenten el consumo de bienes y servicios con miras a lograr un nivel de vida más elevado, la evacuación de los desechos sólidos continuará siendo un aspecto importantísimo de la gestión de desechos.

Los métodos de las técnicas analíticas nucleares y otras técnicas conexas pueden aprovecharse al máximo juiciosamente en la caracterización de los desechos sólidos suspendidos en el aire, industriales y municipales, y de sus lixiviados, así como en el pronóstico de sus regímenes de transporte en el medio ambiente.

\* Véanse las actas del Simposio, publicadas por el OIEA, STI/PUB/904, Viena, Austria (1992).