

# Técnicas nucleares en la exploración, extracción y tratamiento de minerales

*Sinopsis de las aplicaciones típicas y de las actividades del OIEA en esa esfera*

por Rolf J. Rosenberg y Jacques Guizerix

Las materias primas minerales constituyen la base para la producción de energía y la industria manufacturera. Los gastos en materias primas pueden constituir o no una parte fundamental del costo del producto final. No obstante, la disponibilidad de materias primas es imprescindible en ambos casos. En los países en desarrollo las materias primas nacionales cumplen dos objetivos: son fuente directa de ingresos y constituyen la base natural para el desarrollo de la industria manufacturera nacional.

Una característica común de las materias primas minerales es que no son renovables. Incluso en la actualidad, cuando sólo una pequeña parte del mundo tiene un alto nivel de consumo de materias primas, podemos observar que algunas de ellas se están agotando. Si deseamos asegurar su disponibilidad futura habrá que tomar medidas, desarrollar métodos más eficaces y económicos de exploración y extracción de minerales, emplear métodos de producción más racionales a fin de ahorrar energía y materias primas. Los desechos tendrán que ser reciclados.

Las técnicas nucleares analíticas pueden, en general, elevar el nivel de eficiencia de la exploración, la extracción y el tratamiento de las materias primas de manera de lograr un ahorro de energía y materiales. Por lo tanto, pueden aportar su contribución a las economías nacionales y a los programas de desarrollo. Estas técnicas tienen la ventaja de que son rápidas, suelen ser específicas o multielementos y de fácil utilización. En el caso de algunas aplicaciones, pueden utilizarse en lugares donde no es posible aplicar otro tipo de técnica, por ejemplo, en medios agresivos o donde la cantidad de calor o de polvo sea elevada, o en aquellos lugares en que sea necesario realizar las mediciones de control a través de las paredes de las vasijas. Estas técnicas permiten asimismo tomar muestras de todo o de casi todo el proceso y, por lo tanto, pueden arrojar resultados más representativos que los análisis basados en muestras individuales. Más importante aún es el hecho de que se pueden obtener resultados en un tiempo casi real, lo que permite que las mediciones se utilicen en el control directo del proceso.

## Investigación geológica básica

Toda exploración mineral se basa en un conocimiento general de los procesos geológicos y de la geología de la zona investigada en particular. Las técnicas nucleares son especialmente útiles para la determinación de la edad y para llegar a conocer la distribución de los elementos en los diferentes tipos de roca.

El análisis por activación neutrónica (AAN) se ha utilizado ampliamente en la investigación geológica básica para el análisis de los elementos. Este es uno de los métodos más sensibles de análisis de muchos elementos. Con él se pueden analizar incluso las muestras pequeñas, muy poco comunes, como las muestras lunares o los minerales separados. En general, el AAN es preciso, puede aplicarse sin destruir la muestra, puede utilizarse también para el análisis de multielementos y es fácil de automatizar.

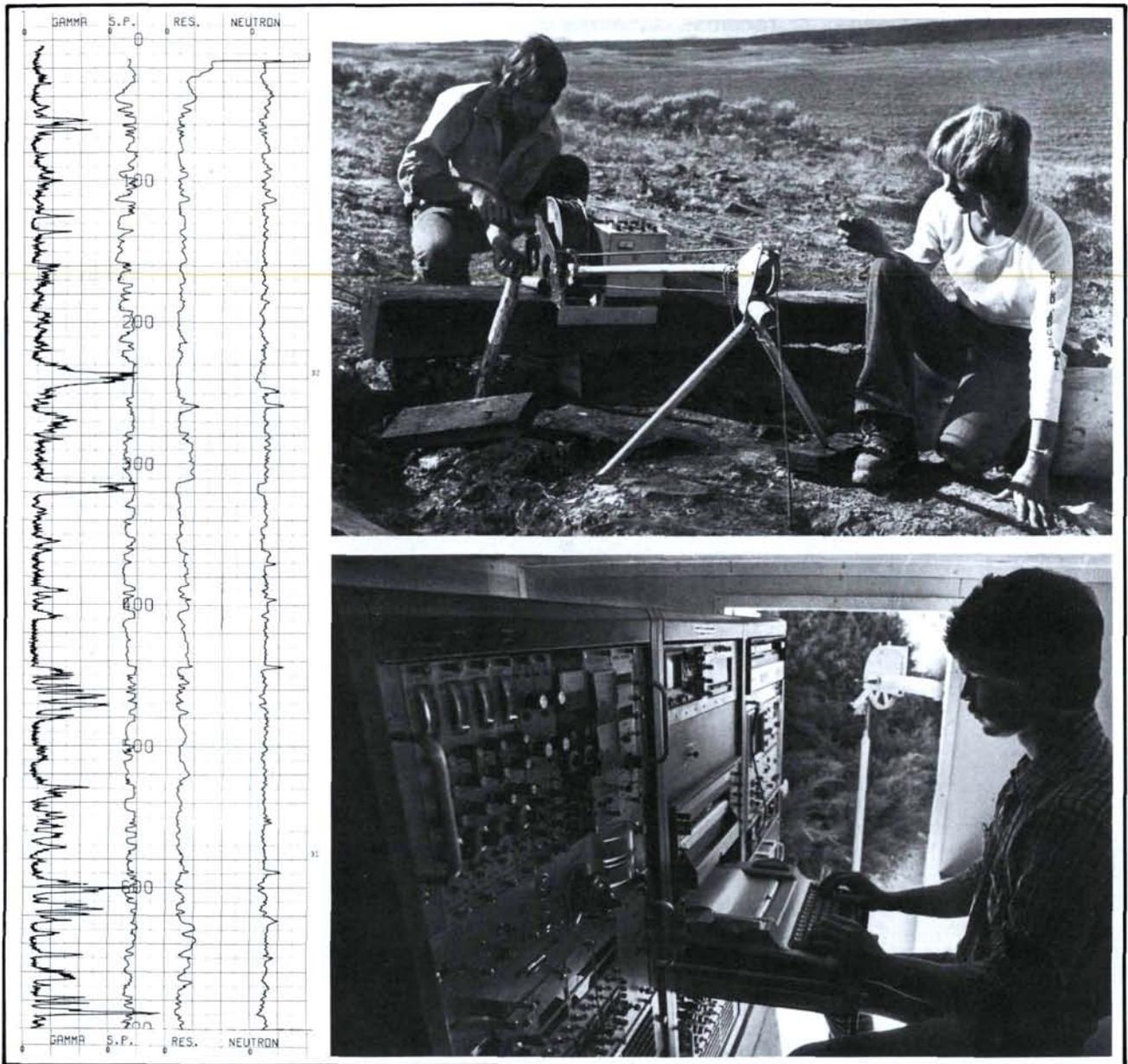
Aplicando el AAN se pueden determinar más de 40 elementos diferentes en muestras de rocas. (En las muestras lunares y en las pequeñas muestras de minerales se ha utilizado comúnmente para analizar 40 elementos.) En el caso de las muestras de rocas comunes, el AAN (comparado con la técnica no nuclear) reporta mayores beneficios en el análisis de los alógenos, el antimonio, los elementos de tierras raras, el oro, los elementos del grupo del platino, el uranio y el torio.

## Exploración geoquímica

La composición química de los sedimentos orgánicos e inorgánicos, las plantas y el agua puede revelar la composición de las rocas subyacentes. Otros tipos de sedimentos están más o menos desplazados de su lugar original y pueden revelar la composición química de las rocas situadas en la ruta de transporte. Por esa razón, se puede utilizar la composición elemental de los sedimentos y el agua en la búsqueda de mineralizaciones de valor económico. Lo usual es que la mayoría de los elementos aparezcan en los sedimentos en concentraciones de partes por millón, por lo tanto, hacen falta métodos analíticos sensibles.

El AAN se utiliza en varios países en la investigación de la composición geoquímica, especialmente para analizar el oro, los metales de platino y en algunos casos el uranio. Se suelen utilizar procedimientos muy automatizados que hacen que el análisis sea poco costoso. En algunos países, incluidos el Canadá, los

El Sr. Guizerix es Jefe de la Sección de Química y Aplicaciones Industriales de la División de Ciencias Físicas y Químicas del Organismo. El Sr. Rosenberg es funcionario de esta Sección.



Registros gamma-gamma y neutrón-neutrón, y equipo necesario para obtener los resultados.

Estados Unidos, Finlandia y el Reino Unido, existen laboratorios que cuentan con el sistema AAN donde se analizan diez mil o varias decenas de miles de muestras geológicas al año.

### Exploración geofísica del uranio

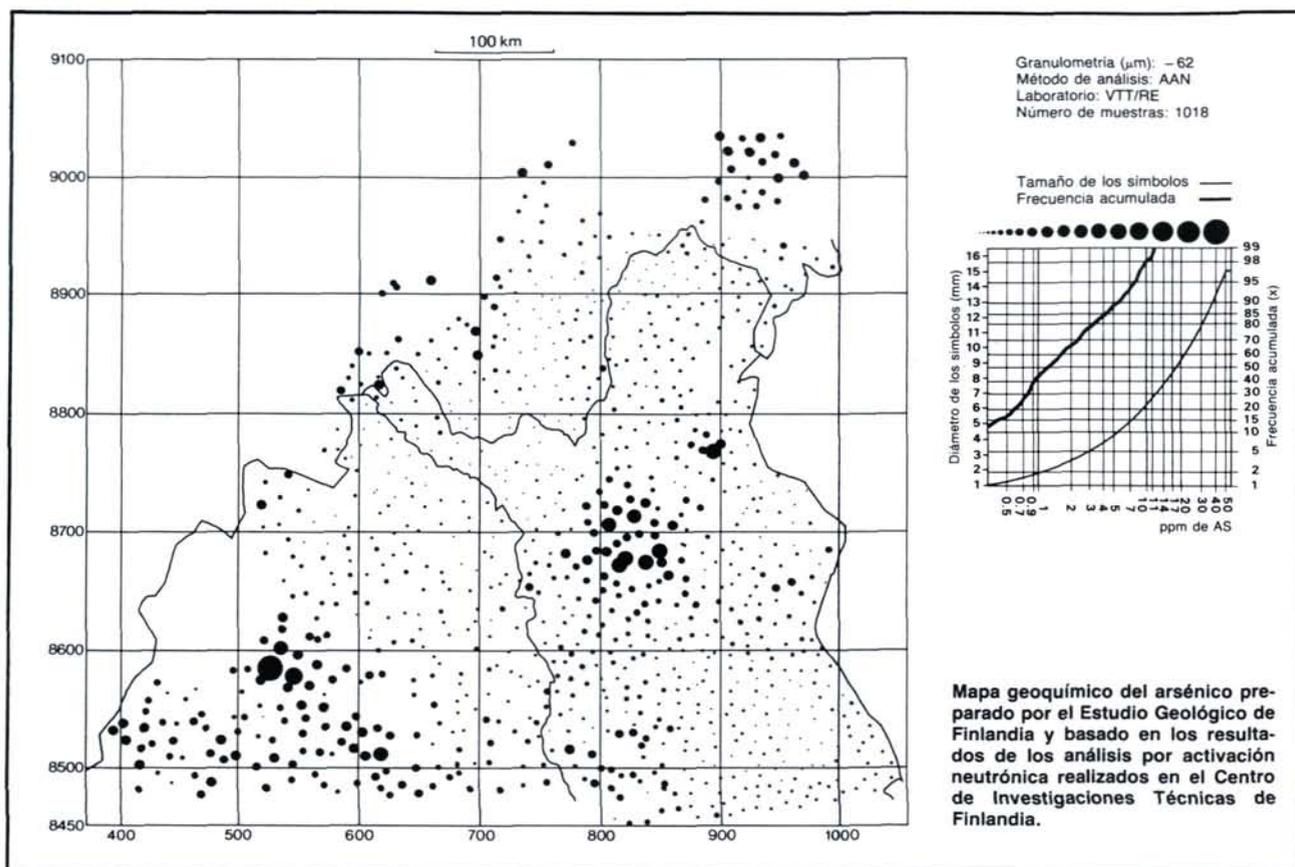
El elemento uranio está compuesto de una mezcla de isótopos radiactivos que se desintegran formando una serie de nucleidos descendientes. Son radiactivos y pueden utilizarse en la búsqueda de mineralizaciones de uranio. Un método se basa en la medición directa de la radiactividad gamma de los nucleidos descendientes del uranio (en particular el bismuto 214). Para ello, se puede simplemente medir el nivel total de radiación de fondo en la superficie, o la actividad total de la superficie de una roca o de bloques erráticos por separado, con un equipo portátil de detección de radiación gamma. También se pueden realizar estas mediciones utilizando sistemas de medición de rayos gamma colocados en vehículos o en aviones.

Otro método consiste en medir los isótopos de radón, que son productos de desintegración del uranio. El radón es un gas inerte muy móvil que sale a la superficie a través de las fisuras existentes en las rocas. Se puede medir por su actividad alfa.

### Diagrafía de pozos de sondeo

En la exploración de petróleo y de minerales, hay que perforar antes de que se pueda determinar si vale la pena explotar el mineral o no. La perforación es siempre costosa, especialmente cuando se realizan miles de perforaciones (de un metro de profundidad). Por lo tanto, hay que reunir toda la información posible sobre la perforación.

Los testigos podrían mandarse al laboratorio para su análisis. No obstante, en la mayoría de los casos resulta más rápido analizarlos en el lugar. Con este objetivo se han creado diversos equipos (que pueden ser portátiles o transportados) para el análisis por fluorescencia X basados en la dispersión de la energía. Una técnica muy



conveniente es hacer pasar una sonda a través de la perforación y obtener un análisis de la roca circundante.

Se emplean corrientemente algunos dispositivos para la diagrfía de pozos de sondeo, otros se encuentran en proceso de desarrollo. La técnica más directa es registrar la radiactividad natural (radiactividad espectrométrica bruta o gamma). Esto permite obtener una información directa sobre el uranio, el torio y el potasio, y de forma indirecta sobre la composición mineral. De esta manera, por ejemplo, se consigue información sobre el carbón. Las vetas de carbón tienen una concentración de elementos radiactivos diferente de la de la roca circundante.

Los otros dispositivos nucleares para la diagrfía de pozos de sondeo se basan en la interacción de la radiación con la roca circundante. Estas sondas están compuestas de una fuente de radiación y de un detector protegido contra esa fuente. La radiación proveniente de la fuente reacciona con el material circundante. Al ocurrir estas reacciones cambian las propiedades de la radiación. Se mide la nueva radiación y se puede llegar a conclusiones sobre la composición de la roca. La utilización de la radiación nuclear tiene la ventaja de que por lo general es muy penetrante. Por esa razón, se puede obtener información en los pozos perforados llenos de agua y se puede analizar de forma simultánea un gran volumen de roca.

**Sondas gamma-gamma.** Estas sondas constan de una fuente gamma y uno o más instrumentos — detectores de centelleo — apropiados para la medición de la radiación

gamma. La intensidad de la radiación gamma, que retorna al detector en retrodispersión depende de la densidad de la roca. Por lo tanto, esta técnica se utiliza más comúnmente en la exploración de petróleo y carbón. El carbón tiene una densidad mucho menor que la roca circundante y por ende puede observarse fácilmente en los registros gamma-gamma. Asimismo, el método detecta variaciones en la porosidad por lo que resulta útil para detectar en qué capas de la roca hay petróleo, gas o agua. Se pueden detectar también minerales metálicos de alta densidad.

**Instrumentos neutrón-neutrón.** Se utilizan actualmente varios instrumentos de diagrfía de pozos de sondeo que tienen como base la interacción de las partículas neutrónicas con los materiales. Cuando los neutrones rápidos interactúan con la materia, las reacciones más importantes son la dispersión y captura neutrónicas. En los procesos conocidos como dispersión elástica, los neutrones rápidos de alta velocidad inicial son moderados gradualmente. Este proceso es más eficaz en un medio que contenga hidrógeno. El contenido de hidrógeno se puede determinar midiendo el flujo de neutrones térmicos durante la irradiación de la roca con neutrones rápidos. Este método se puede utilizar también en las diagrfías en busca de petróleo, gas o agua. Se suele aplicar en la exploración de petróleo y gas, y también se emplean corrientemente otros instrumentos neutrón-neutrón para la diagrfía.

El análisis de los elementos en los pozos de sondeo se puede realizar por fluorescencia X y una técnica

denominada "Análisis por activación gamma de captura". Hasta el presente ninguno de los dos métodos ha recibido amplia utilización, si bien se ha determinado diversas aplicaciones muy prometedoras. La técnica gamma será especialmente útil en la exploración del carbón. Con esta técnica se pueden determinar casi todos los componentes del carbón, lo que significa que se pueden evaluar con precisión tanto el contenido de cenizas como la potencia calorífica. El método se emplea también para registrar metales específicos, y se han obtenido buenos resultados en el caso del cobre y la plata.

### Aplicaciones en la extracción

En el proceso de extracción se utilizan fundamentalmente las técnicas nucleares para la recuperación de uranio, carbón y petróleo. En la extracción del uranio, la radiactividad de la roca sirve para separar al mineral de la roca de desecho y determinar la proporción de mineral. En la minería del carbón es importante conocer la potencia de la capa de carbón en los túneles a fin de evitar la extracción de roca de desecho. Otra de las técnicas que ha tenido gran éxito ha sido la absorción de la radiación gamma natural de la roca, aunque no se puede aplicar cuando la roca receptora tiene una baja radiactividad. En esos casos se han ensayado técnicas de retrodispersión gamma, pero sus resultados no han sido del todo satisfactorios.

En la extracción de petróleo se utilizan trazadores radiactivos para solucionar problemas de diferentes tipos. Un ejemplo es la investigación de la extracción del petróleo mediante la inyección de agua. Cuando la presión del petróleo en un depósito es muy baja, el petróleo no brota espontáneamente. En estos casos, es usual forzar la salida del petróleo a la superficie inyectando diversos tipos de fluidos en el yacimiento. Posteriormente se estudia la eficiencia de este proceso inyectando un trazador radiactivo en uno de los pozos.

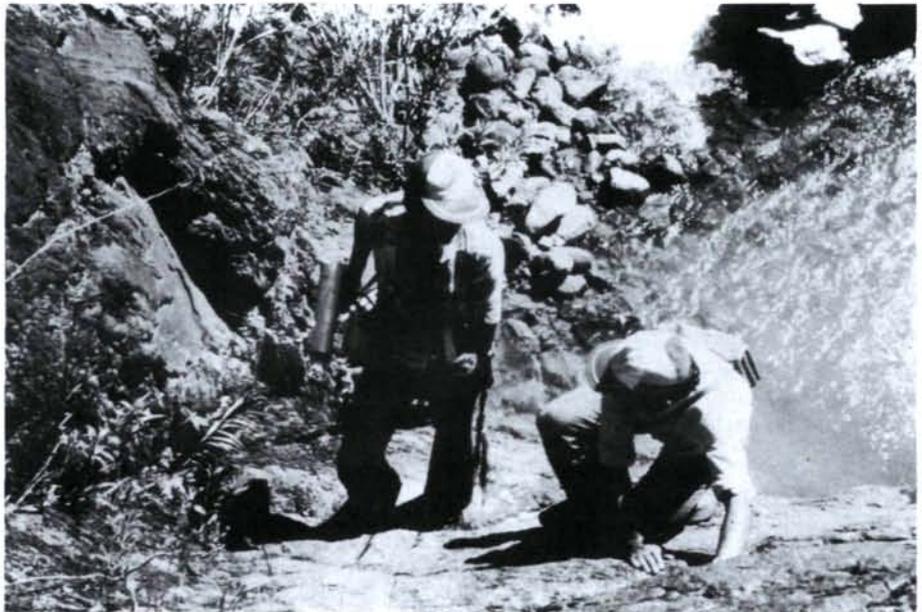
Se aplica presión y se analiza el recorrido del trazador radiactivo por los demás pozos adyacentes.

### Tratamiento de los minerales

Hay varias posibilidades de utilizar las técnicas nucleares en el tratamiento de los minerales, así como en la producción y purificación de los metales del carbón y del petróleo. En las diferentes fases de los procesos se utilizan sistemas de control nucleónico, analizadores de elementos y trazadores.

En el tratamiento de los minerales, una de las técnicas nucleares que se utiliza con más frecuencia es la espectrometría por fluorescencia X, que permite realizar un análisis continuo de los elementos. En el mundo existen algunas empresas que fabrican analizadores por fluorescencia X con fines comerciales, y también funcionan varias instalaciones de este tipo. Esto permite que se analicen a la vez varios aspectos del proceso. En general, se analizan al menos el material de entrada, el producto final y las colas. Se suelen tener en cuenta dos sistemas diferentes. En uno de ellos, se introducen las sondas en los recipientes o tuberías del sistema principal. En el otro se realiza un muestreo automático y se transportan las muestras por tuberías al analizador. Con una sonda se puede determinar simultáneamente varios elementos.

El nivel de un material en un recipiente cerrado se puede medir utilizando técnicas nucleares, a saber, la dispersión y la absorción de rayos gamma. La primera es más eficaz, pero en los casos en que el acceso se limita a solo una parte del recipiente o cuando el diámetro de éste es demasiado grande, se puede utilizar la técnica de retrodispersión. Las aplicaciones corrientes son el control automático del nivel de llenado en los hornos, en las vasijas de almacenamiento y en los dispositivos de transporte. Las técnicas de absorción de rayos gamma pueden emplearse en aquellos casos en que el calor, los materiales corrosivos o el estado físico del material impiden la utilización de otros métodos.



Parte de un estudio geoquímico y radiométrico realizado en Colombia. Los geólogos del país recibieron capacitación en el empleo mientras realizaban el estudio bajo la supervisión de un experto del OIEA.  
(Cortesía: M. Tauchid del OIEA)

Cuando el diámetro de un canal de flujo, a saber, una tubería, es constante, la absorción de rayos gamma puede servir para medir la densidad del material. En las mezclas de agua y mineral triturado se mide directamente la cantidad de mineral transportado cuando se conoce el caudal de agua. También pueden insertarse sondas especiales en la mezcla para determinar su densidad. En condiciones controladas la densidad es proporcional a la cantidad de mineral, carbón o de un metal determinado en la mezcla.

Si se conoce la densidad del material, por la absorción de rayos gamma se puede medir su peso. Una de las aplicaciones típicas es la medición del flujo de materiales en una correa transportadora.

El contenido de agua en el carbón se suele determinar directamente, por lo general, con ayuda de la técnica neutrónica mencionada anteriormente; el principio de esta técnica es el mismo que el que se utiliza para determinar el agua y el petróleo en los pozos de sondeo. En general, las técnicas AAN, las de rayos gamma de captura y de rayos gamma diferidos son muy útiles en el análisis del proceso por las mismas razones que para las diagráfias de pozos de sondeo. La radiación nuclear tiene un gran poder de penetración, lo que permite analizar un gran volumen de material en bruto. A pesar de estas ventajas evidentes, las técnicas de activación neutrónica no tienen un uso amplio. Esto quizás se deba a cierta reticencia a utilizar fuentes radiactivas en las plantas industriales.

No obstante, en las plantas de producción y aprovechamiento del carbón, se prefieren los analizadores por activación neutrónica debido a que el carbón es una matriz muy favorable para el AAN. Esto permite medir el carbón y todos los componentes importantes de las cenizas con exactitud y rapidez.

### Trazadores en el tratamiento de los minerales

Diversas razones explican que las técnicas de trazadores radiactivos tengan amplia utilización para la investigación y optimización del tratamiento de los minerales, proceso en que la mayoría de las operaciones se realiza en gran escala. Por lo tanto, el rendimiento no siempre coincide con el pronóstico de las pruebas experimentales realizadas. En los procesos industriales, las mejoras de relativamente poca importancia dan por resultado ahorros de gran magnitud, y los métodos de radiotrazadores ofrecen posibilidades únicas para el estudio de su comportamiento.

Entre otras muchas aplicaciones, los métodos de radiotrazadores se emplean para el estudio del flujo, la mezcla y el triturado de los materiales. También se utilizan en el análisis de las reacciones físico-químicas, la separación del metal y la escoria, la determinación del volumen del material en proceso en las vasijas de reacción y el desgaste de dichas vasijas. En el control de la calidad los métodos de radiotrazadores sirven para determinar las inclusiones no metálicas en los metales.

### Actividades del OIEA en esta esfera

El organismo cuenta con una larga tradición en la promoción del empleo de los métodos nucleares en la esfera de los recursos minerales. Se han organizado

varios simposios, conferencias, grupos de expertos, grupos asesores y consultores y se han publicado muchos informes técnicos.

Mediante su programa de cooperación técnica el Organismo continúa prestando ayuda a los países en desarrollo. Se ha volcado la máxima atención en tres esferas, a saber, la exploración y explotación de los yacimientos de uranio; la creación de laboratorios que utilizan las técnicas nucleares analíticas en los programas de exploración de minerales; y la utilización de trazadores en el tratamiento de los minerales. Por ejemplo, el Organismo ha apoyado el perfeccionamiento del análisis por activación neutrónica en reactores; el análisis por activación neutrónica de 14 megavoltios; y los laboratorios de análisis por fluorescencia X basados en la dispersión de la energía, así como su aplicación en la investigación geológica y la exploración de minerales. También se han impartido cursos sobre el manejo de los equipos y cursos de capacitación, se han realizado misiones de expertos y se han otorgado becas.

En Rumania, por ejemplo, el Organismo apoya el perfeccionamiento de instrumentos para la diagráfia de pozos de sondeo en la exploración de petróleo en el caso de perforaciones muy profundas. También en varios países se ejecutan proyectos para la exploración y explotación del uranio.

La División de Ciencias Físicas y Químicas del Organismo patrocina un programa de investigación bastante amplio en esta esfera. En 1986 se terminó un programa de investigaciones coordinadas (PIC) sobre técnicas nucleares analíticas para la exploración, extracción y tratamiento de minerales. Entre las actividades en marcha y planificadas por conducto de la División y de otras dependencias del Organismo, figuran:

- La celebración en los Estados Unidos en noviembre de 1987 de la primera reunión de coordinación de investigaciones de un programa sobre exploración y explotación de los recursos naturales. En este PIC, que cumple su segundo año de vigencia, figura la concertación de cinco contratos y cinco acuerdos por parte de Australia, el Canadá, China, los Estados Unidos, Hungría, el Japón, Polonia, la URSS, y Viet Nam.
- Se ha programado celebrar en junio de 1987 en Finlandia una reunión del grupo asesor sobre las técnicas nucleares analíticas para los análisis directos de los elementos en los procesos.
- En noviembre de 1987 se celebrará en los Estados Unidos una reunión de consultores sobre las tendencias actuales de las técnicas nucleares de diagráfia de pozos de sondeo para el análisis de los elementos.
- La Sección de Datos Nucleares del OIEA ejecuta un programa de reunión de datos sobre secciones eficaces neutrónicas indispensables en la esfera de la geofísica y las técnicas nucleares analíticas. Se han celebrado a este respecto varias reuniones y se han preparado otras.
- La División del Ciclo del Combustible Nuclear cuenta con un programa amplio de exploración, extracción y tratamiento de minerales de uranio. Para 1987 se prevén 13 reuniones sobre las técnicas de exploración del uranio, la geología del uranio, la extracción y el tratamiento del mineral, y los recursos existentes. Algunas de las reuniones se ocuparán de preparar una guía para los equipos de investigación de los países en desarrollo.