

Ultimas novedades en la exploración del uranio

por P.M. Barretto*

Incluso en las manos más experimentadas y competentes, la exploración de minerales es una operación costosa, arriesgada y engorrosa. Se ha dicho que en ella se mezclan el arte y la ciencia: la mayoría de los proyectos de exploración empiezan a partir de nociones y conceptos geológicos generales y entrañan una gran variedad de trabajos de campo y de laboratorio, desde la sencilla inspección visual del terreno hasta una evaluación detallada de las perspectivas económicas de la prospección.

La exploración del uranio no se distingue de la exploración general de minerales; su sola ventaja reside en que este mineral puede detectarse a distancia gracias a la radiación gamma que emite. Por consiguiente, las técnicas de exploración más útiles son las radiométricas. En los países en desarrollo interesados en iniciar programas de exploración de uranio o que los han iniciado ya, además de los problemas mencionados se plantean otros:

- Inexistencia o dificultad de conseguir personal competente para trabajos de campo y de laboratorio (falta de personal);
- Inexistencia de una infraestructura administrativa y tecnológica para apoyar los trabajos de exploración (falta de tecnología);
- Un presupuesto relativamente reducido para un programa plurianual (falta de fondos).

En vista de ello, es muy importante utilizar racionalmente el tiempo y los recursos disponibles en un programa de exploración. Esto equivale a seleccionar los métodos óptimos de obtención de las informaciones precisas, evitándose así una duplicación innecesaria de las actividades de organismos oficiales, ya que tales duplicaciones en la labor de exploración son fenómeno común en los países en desarrollo. Se han dado casos en que tres organismos oficiales han levantado mapas geológicos de una misma zona.

Como el volumen, calidad y disponibilidad de los datos geológicos varían de un lugar a otro, y como la importancia y los objetivos de los programas de exploración pueden ser diferentes, es difícil emplear un método universal. Los métodos o secuencias esbozados más abajo (Figura 1) se sugieren para zonas que se prospeccionan por primera vez. Si se siguen sistemáticamente, será posible obtener, con una inversión mínima y una eficacia máxima, un inventario geológico y una evaluación del potencial mineralífero de una zona dada.

* Miembro de la Sección de Materiales Nucleares y del Ciclo del Combustible de la División del Ciclo del Combustible Nuclear del OIEA.

Estudios radiométricos

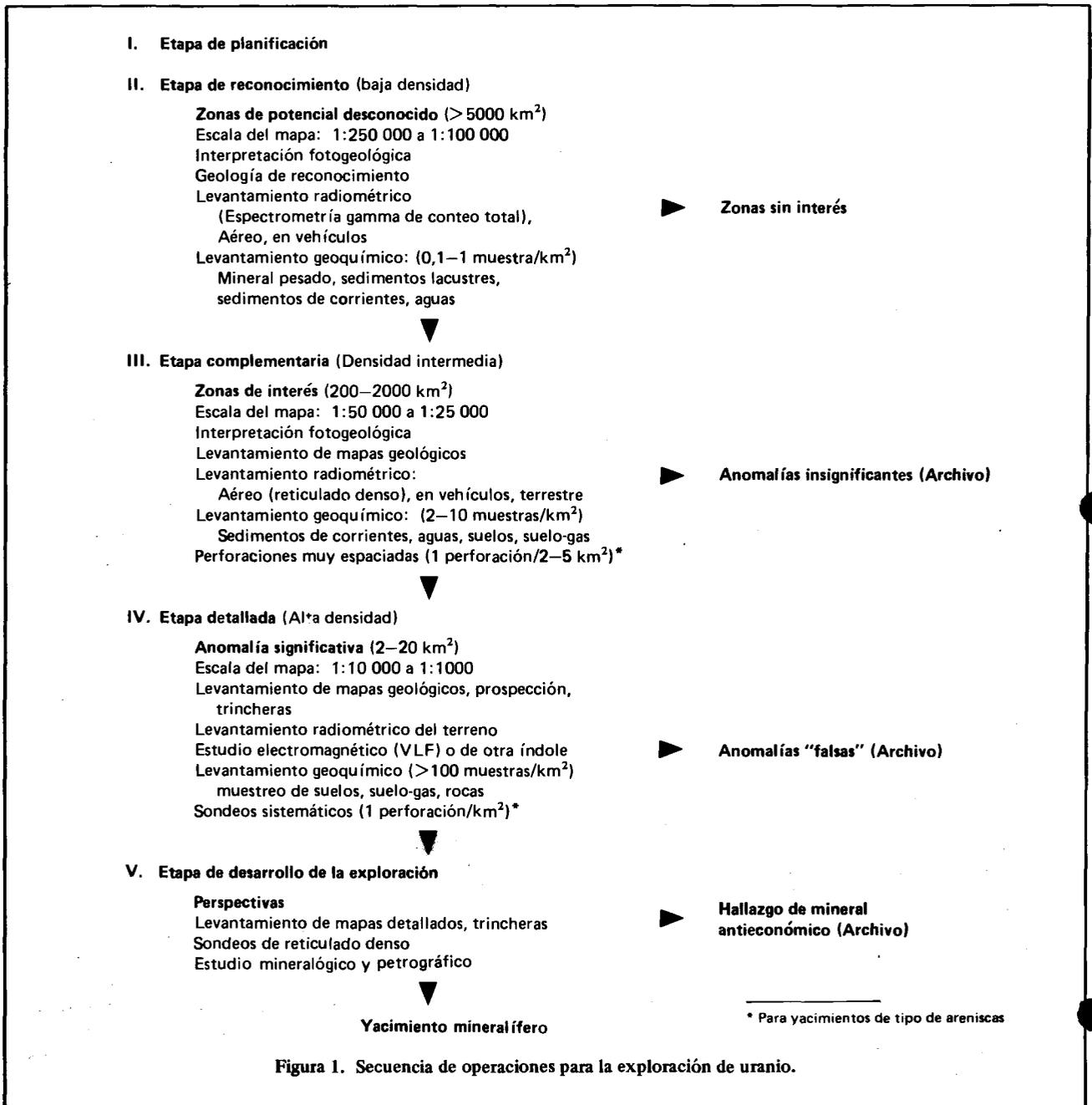
Las técnicas más útiles en la exploración de uranio son, sin duda alguna, las radiométricas. De hecho, combinando los estudios radiométricos aéreos con el examen de las anomalías detectadas en el terreno y el perfilaje gamma de los sondeos se ha descubierto una gran proporción de los recursos uraníferos conocidos. Los estudios radiométricos en los que se mide la actividad gamma específica o total se prestan a una variedad de aplicaciones. En consecuencia, los instrumentos de campo y de laboratorio utilizados son muy variados. A continuación se describen las principales técnicas.

Los estudios radiométricos aéreos se realizan para la evaluación inicial de grandes zonas. A bordo de helicópteros o de aviones de ala fija se utilizan detectores gamma muy sensibles (Figura 2). Una vez detectadas, las anomalías radiactivas se registran y se representan en mapas con miras a una subsiguiente verificación sobre el terreno. Para estudiar la zona suele establecerse un reticulado.

A pesar del costo relativamente elevado por kilómetro lineal, los estudios aéreos por espectrometría gamma son muy interesantes desde el punto de vista de su rentabilidad. Los gastos totales de este método en concepto de vuelos, levantamiento de mapas, evaluación y selección de zonas para su ulterior exploración se comparan favorablemente con los de otras técnicas. Los datos espectrométricos, si se evalúan bien, permiten reducir el volumen de costosas comprobaciones sobre el terreno esenciales para determinar los resultados del estudio (las comprobaciones de campo son parte necesaria del estudio y a menudo cuestan más por km² o por anomalía que el estudio aéreo).

Estudios radiométricos de superficie: El estudio complementario de las anomalías uraníferas en el terreno exige el empleo de escintilómetros o espectrómetros manuales y portátiles, aparatos para el perfilaje de sondeos y emanómetros (monitores de radón).

Los contadores de centelleo se utilizan para medir los rayos gamma emitidos por los elementos radiactivos naturales contenidos en las rocas (U, Th, K). Estos instrumentos sirven sobre todo para buscar anomalías radiométricas que eventualmente permitirán descubrir yacimientos uraníferos. Los instrumentos se caracterizan por una elevada eficacia de detección gamma, altas tasas de cuenta y fluctuaciones estadísticas relativamente bajas. Con ello es posible reconocer pequeños cambios en la concentración de elementos radiactivos. Los escintilómetros son los instrumentos de equipo de campo utilizados más a menudo en la exploración del uranio.



Se emplean en todas las fases de dicha exploración combinándolos con estudios geoquímicos y geofísicos.

Los escintilómetros se instalan en vehículos para realizar estudios radiométricos móviles. Estos estudios representan un método muy práctico de prospección de uranio a condición de que la red de carreteras y pistas sea buena. Con esta técnica se han descubierto varios yacimientos.

El espectrómetro de campo es un instrumento perfeccionado del equipo radiométrico que permite determinar la energía particular de la radiación gamma y, en consecuencia, el nucleido radiactivo emisor. De esta manera se pueden detectar concentraciones equivalentes relativas de U, Th y K. El costo de adquisición de un espectrómetro de campo es varias veces más elevado que el de un escintilómetro. Entre las desventajas de los

espectrómetros de campo cabe citar que las mediciones espectrales requieren más tiempo que los estudios por conteo total, que su mantenimiento es difícil en zonas alejadas y que es necesario calibrar los instrumentos con frecuencia. El valor de los resultados depende en general del conocimiento de los parámetros geológicos y geoquímicos de una zona determinada. Es necesario obrar con gran juicio para determinar la utilidad de la espectrometría de campo en una etapa dada de exploración.

Perfilaje radiométrico de sondeos: La inspección en el terreno de las anomalías de uranio puede servir de base para afirmar que una zona no posee ningún potencial de mineralización uranífera o, por el contrario, recomendar su investigación detallada. Si se decide proseguir la exploración, se requerirán generalmente datos

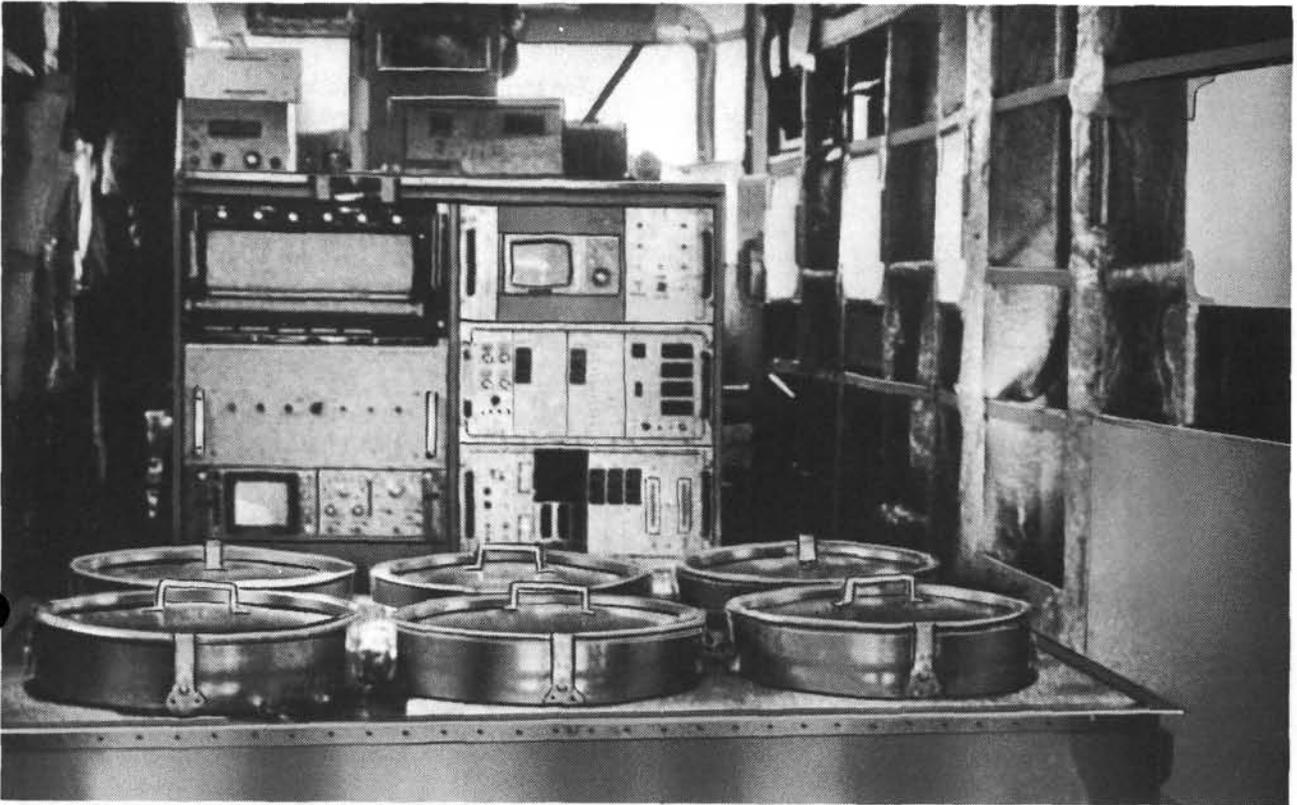


Figura 2. Sistema aerotransportado de espectrometría gamma formado por seis grandes detectores de yoduro de sodio, (NaI(Tl)), que se ven en el primer plano de la foto instalados dentro del avión de reconocimiento, con los dispositivos electrónicos asociados detrás de los detectores.

Figura 3. Perforando un pozo en el Pakistán. El trabajador está detrás del aparato de perfilaje y el torno utilizado para descender la sonda en el pozo; tiene entre sus manos la propia sonda.





Figura 4. Muestreo y examen de testigos en Saskatchewan (Canadá). En general, esta técnica es más costosa que la perforación de pozos.

radiométricos del subsuelo, los cuales se obtienen mediante el perfilaje de sondeos y el examen de testigos tomados de las perforaciones.

En los próximos años, tanto las empresas privadas como los Gobiernos realizarán perforaciones que sumarán decenas de millones de metros, como parte de los trabajos de exploración del uranio. La perforación suele representar del 50 al 80% del costo de un programa de exploración, por lo que, para una buena exploración del uranio, una perforación eficaz resulta probablemente más importante que cualquier otra actividad.

Para el perfilaje de sondeos se hace descender un detector gamma (sonda) por una perforación y se registra la radiactividad hallada (Figura 3). El método facilita rápida y económicamente la mayor parte de los datos del subsuelo que necesita el geólogo explorador. Permite el muestreo y análisis *in situ*, la identificación litológica, la correlación estratigráfica y, con programas de sondeo más detallados, facilita parámetros petrofísicos tales como densidad, y humedad y diversos datos geoquímicos. A menudo el sondeo puede reducir grandemente los costos de perforación permitiendo obtener los datos necesarios a base de perforaciones sin testigos menos costosas o perforaciones efectuadas anteriormente con otros fines. En general, mediante el perfilaje se obtienen datos más representativos y objetivos en menos tiempo y a un coste más bajo que con la descripción de testigos, el muestreo y el análisis de testigos o cortes. El costo del perfilaje de sondeos geofísicos multiparamétricos solo

raras veces debería exceder el 10% del costo de perforación (Figura 4).

Las técnicas de perforación y perfilaje son también muy importantes para la evaluación, explotación minera y fases de control del grado de producción de uranio.

En vista de la gran demanda de información sobre técnicas de perfilaje, el OIEA está preparando un manual sobre el perfilaje de sondeos en la exploración de uranio destinado a los Estados Miembros. Se tratará de un manual detallado, actualizado y "práctico" que probablemente estará listo para su distribución a finales de 1981.

Estudios con radón: Esta técnica se basa en la detección del radón, gas radiactivo, en suelo, rocas y agua. La medición del radón es específica del uranio, mientras que la radiación gamma del medio ambiente natural procede de otros elementos de la serie del uranio. Las mediciones de radón sirven para indicar la presencia de uranio entre 5 y 50 metros de profundidad, mientras que la emisión gamma puede quedar disimulada por una cubierta de 0,5 metros.

Los instrumentos de campo utilizados son los emanómetros, denominados también monitores de radón (Figura 5), que detectan concentraciones anómalas de radón ($Rn-222$) y de torón ($Rn-220$), y de sus productos de desintegración inmediata. Esta técnica permite distinguir entre el radón y el torón y, a continuación, efectuar mediciones independientes de la radiación gamma de fondo. Para medir la concentración de radón existen varios tipos de instrumentos, todos ellos basados en la detección de partículas alfa emitidas como productos de desintegración del gas radón ($Rn-222$) en un nucleido hijo, el polonio sólido ($Po-216$).

Ultimamente se han producido algunos progresos en este tipo de detección. Una técnica utiliza los daños inducidos por la radiación alfa (trazas) en detectores de plástico de estado sólido ("Track-etch"). Otra emplea un detector de barrera superficial de silicio ("Alpha nuclear"), y una tercera (método del colector) utiliza el "depósito activo" resultante de la desintegración de productos de radón acumulados en un pequeño disco de milar aluminizado, de pequeño espesor ("Alpha card").

El año pasado se comercializó otra técnica elaborada en Sudáfrica: se denomina *Roac*, acrónimo de "radon on activated charcoal" (radón en carbón vegetal activado). Se basa en la absorción del radón por el carbón vegetal activado; a continuación, se mide el radón presente con ayuda de cualquier detector de centelleo montado en el interior de un castillo de plomo. Los procedimientos de campo para la colocación de los vasos *Roac* son idénticos a los utilizados en los sistemas de trazas alfa.

Los métodos de conteo alfa y de trazas alfa poseen la ventaja, frente al método del emanómetro, de eliminar la variación de la señal en el tiempo que se produce en muchos medios. Además, no es necesario transportar al terreno complicado equipo electrónico.

En último término, el objetivo es ayudar a seleccionar los lugares más favorables para las actividades complementarias de exploración, tales como las perforaciones y la abertura de zanjas.

Estudios geoquímicos

Las técnicas geoquímicas se utilizan en estudios de zonas de extensión muy variable. Estos estudios pueden clasificarse de la siguiente manera: de baja densidad (reconocimientos), 0,1–2 muestras/km²; de densidad intermedia (estudios complementarios), 10–20 muestras/km²; y de alta densidad (estudios detallados), 200 muestras/km². Las investigaciones preliminares indicarán si conviene utilizar o no métodos geoquímicos y deben facilitar también los datos necesarios para planificar y ejecutar un estudio de tipo corriente. Antes de iniciar un programa sistemático de exploración se precisa un estudio de orientación o una investigación preliminar para seleccionar el método a utilizar.

Las investigaciones preliminares deben efectuarse, siempre que fuese posible, en zonas donde la mineralización es análoga al tipo que se trata de descubrir, situadas lo más cerca posible de la zona de estudio. Cuando esto no es posible, puede obtenerse orientación a base de otros estudios efectuados en regiones de condiciones geológicas y climáticas similares.

Los estudios de muestreo de baja densidad (escala 1:250 000–1:250 000) se realizan para seleccionar las zonas más favorables situadas en una región más extensa sin tratar de efectuar una delineación precisa. La experiencia demuestra que las aguas y los sedimentos de corrientes (Figura 6) de una red hidrográfica muy dispersa se adaptan perfectamente a este tipo de prospección. El intervalo de muestreo se determina durante el estudio de orientación, de modo que los halos de dispersión de la red hidrográfica que rodea un hallazgo de significación media se indicarán con tres muestras anómalas como mínimo.

Estudios de muestreo de densidad intermedia (escala 1:20 000–1:50 000): El objetivo de esta fase intermedia es localizar y determinar el origen de anomalías superficiales observadas en zonas de interés delineadas durante el muestreo de baja densidad. Esto se consigue aumentando la densidad de muestreo hasta 10–20 muestras/km².

Al mismo tiempo se procura relacionar la anomalía con la geología, estratigrafía y tectónica locales. Se toman muestras de sedimentos de corrientes y aguas de todas las corrientes de la zona anómala. Siempre que sea posible se muestrean, además del agua de pozos, las aguas de infiltración y de manantiales. Si no se conoce la geología de la zona anómala, conviene obtener más datos geológicos de la misma. Si bien con esta prospección intermedia raras veces se localizan minerales uraníferos, sin embargo se circunscribe de modo quizás sustancial la zona de interés, se evalúa su potencial y se conoce mejor el origen de la anomalía geoquímica. A continuación es posible seleccionar el método mejor adaptado a nuevos estudios — por ejemplo, técnicas geoquímicas, radiométricas o geofísicas.

Estudio de muestreo de alta densidad (escala 1:5 000–1:500): El objetivo de los estudios de alta densidad es localizar posibles fuentes de anomalías y/o determinar la extensión de cuerpos mineralizados asociados y evaluar el estudio radiométrico. En términos generales, en esta fase se trata de distinguir entre anomalías resultantes de una mineralización rentable de otra que no lo sea o de otras causas. En esta etapa se prefiere la prospección



Figura 5. Medición del radón gaseoso del suelo.

geoquímica, sobre todo cuando la meteorización es importante o cuando existe una cubierta estéril (que hace ineficaz los métodos radiométricos). La experiencia ha demostrado que el muestreo de suelos es el método más adecuado en esta fase. Suele adoptarse una retícula de muestreo con intervalos que varían entre 10 y 50 m. Debe prestarse atención a la posible contaminación resultante de operaciones de minería, del empleo de ciertos fertilizantes fosfatados y de otras actividades humanas.

Otras técnicas

Existen otras técnicas que, aunque no aplicables específicamente a la prospección de uranio, se utilizan para conocer mejor la localización o la estructura de la mineralización. Entre otras se hallan las siguientes:

Resistividad superficial y polarización inducida: Estas técnicas se basan en la transmisión (conductividad) y distribución de corrientes eléctricas en el suelo. La elección de un conjunto adecuado de electrodos depende de muchos factores: en particular de la forma del cuerpo mineralizado y de la conductividad y espesor de la cubierta. Los conjuntos denominados de Wenner-Schlumberger y dipolo-dipolo son los más utilizados. En general, las técnicas de interpretación de la PI (polarización inducida) no han progresado tanto como las de la resistividad. Estas técnicas eléctricas se utilizan únicamente en la fase detallada de exploración, cuando ya se ha definido un objetivo, en otras zonas conductoras, y para determinar el espesor de los estratos sedimentarios



Figura 6. Tomando muestras de agua de un pozo de utilización doméstica (Turquía) a fin de analizar su contenido de radón y uranio.

que descansan sobre yacimientos o estructuras conocidos. Los estudios de resistividad y de PI pueden facilitar orientación para la planificación de programas de perforaciones.

Detección a distancia: Los datos sobre la reflectancia multiespectral obtenidos con ayuda de satélites o fotografías aéreas pueden ayudar al levantamiento rápido de mapas de grandes zonas de terrenos descolorados, posiblemente alterados. La intensificación de la imagen por computadora aumenta de modo pronunciado la capacidad de distinguir estas zonas estudiadas en comparación con las fotografías en blanco y negro e incluso a menudo en color. Algunos estudios indican que las bandas espectrales en imagen obtenidas por satélite (*Landsat*) no son las mejores para la sutil discriminación necesaria en la exploración del uranio. Sin embargo, los datos procedentes de estos satélites han sido mejorados por computadora para señalar de modo característico los terrenos alterados rojizos utilizados en el pasado para orientar la exploración en las zonas de prospección de uranio en los Estados Unidos. Los lineamientos observados en estas imágenes pueden revelar estructuras que, localmente, podrían haber afectado al depósito en la formación uranífera.

De modo complementario, en ciertas circunstancias, las imágenes térmicas-infrarrojas constituyen un medio excelente para detectar y delimitar zonas potenciales para la exploración de uranio (por ejemplo, canales llenos de

conglomerados situados dentro de formaciones).

Las técnicas de detección remota constituyen solo un método indirecto de exploración del uranio y se utilizan únicamente para obtener datos geológicos y tectónicos a escala regional. Por ello se emplean en la investigación preliminar y en la selección de zonas.

Nuevas técnicas: Se están investigando algunas técnicas potencialmente interesantes, aunque no se hayan utilizado aún en escala apreciable y algunas no han sido ni siquiera ensayadas en condiciones experimentales. Entre éstas figuran las basadas en el calor radiogénico, el magnetismo remanente, en mediciones del helio y del plomo radiogénico.

Trabajos de investigación y desarrollo

Los métodos y equipo antes descritos son resultado de considerables trabajos de investigación y desarrollo. El Organismo se interesa por estos trabajos destinados a mejorar las técnicas y el equipo y aumentar la cadencia de descubrimientos. Por tal razón, en 1976 el OIEA y la Agencia para la Energía Nuclear (AEN) de la OCDE crearon conjuntamente un grupo para examinar el progreso de los trabajos de investigación y desarrollo en relación con la exploración del uranio. Este grupo, denominado Grupo mixto de expertos AEN/OIEA sobre investigación y desarrollo de las técnicas de prospección de uranio, ha identificado varias zonas para las que sería posible mejorar de modo significativo las técnicas existentes mediante la cooperación internacional o elaborar nuevos métodos. Desde su creación, los países han colaborado en la preparación de un proyecto internacional que abarca ocho zonas de interés.

La difusión de las informaciones resultantes de los estudios ejecutados gracias a los proyectos es parte vital de estas actividades. Por consiguiente, se redacta y distribuye un boletín titulado *Newsletter* destinado a la industria del uranio y a otros interesados en la prospección de los minerales uraníferos. El principal objetivo de dicha publicación es dar a conocer, dos veces aproximadamente por año, los progresos alcanzados en los diversos proyectos de investigación y desarrollo, coordinados por el citado Grupo de expertos, mediante la publicación de informes sobre la marcha de los trabajos, reseñas de estudios específicos iniciados por varios grupos de trabajo, un programa provisional de actividades futuras y detalles sobre simposios y reuniones pertinentes. Sin embargo, se confía también que en lo sucesivo ese boletín contenga breves notas oficiosas relacionadas con otros trabajos de investigación y desarrollo además de los ejecutados en virtud del proyecto combinado, acompañadas de comentarios sobre las actividades en curso o de sugerencias para futuras actividades de investigación y desarrollo. Los países u organizaciones interesadas en recibir este *Newsletter* pueden solicitarlo del OIEA. Para presentar y discutir los resultados de los trabajos de investigación y desarrollo tendrá lugar en París un simposio del 31 de mayo al 3 de junio de 1982.