

La investigación de los recursos hídricos del desierto: La contribución de los isótopos

por R. Gonfiantini*

De cuando en cuando, en los periódicos y revistas aparecen artículos acerca de las enormes reservas de agua almacenadas en el subsuelo del Sahara, cuya explotación racional permitiría el desarrollo agrícola del desierto. Aunque la ejecución de tales proyectos es bastante problemática en la realidad, lo cierto es que las aguas subterráneas son relativamente abundantes en la mayor parte del Sahara (como en otros desiertos), aunque raras veces sean fácilmente accesibles. ¿Qué se sabe realmente de estas aguas subterráneas y de la manera en que se han acumulado en zonas de tan escasas precipitaciones? ¿Qué sabemos de la historia hidrológica del desierto? Estos problemas son importantes para una correcta evaluación del contenido hídrico y del empleo del agua subterránea del desierto. Las técnicas isotópicas contribuyen a su solución.

El término "desierto" se aplica a todas las regiones áridas del mundo de tan escasas lluvias que no pueden ser habitadas de modo permanente por el hombre. Aunque el límite superior de las precipitaciones comúnmente establecido para los desiertos es de 250 mm anuales, hoy día en la mayoría de ellos las precipitaciones son inferiores — a menudo de valores muy inferiores a 100 mm por año, límite equivalente a un 15% de las precipitaciones en la mayor parte de Europa — e irregularmente distribuidas en el tiempo y en el espacio, siendo frecuentes los años sin precipitación alguna (desiertos hiperáridos). Por ello, en la superficie no se encuentran masas de agua dulce, como ríos y lagos, y las aguas subterráneas suelen hallarse a tal profundidad que ni las raíces de las plantas ni los pozos llegan hasta ellas. Las formas permanentes de vida vegetal o animal son inexistentes o muy raras. Los asentamientos humanos son escasos y solo tienen lugar en los oasis, depresiones del desierto donde el nivel freático alcanza o se aproxima a la superficie terrestre: en esos lugares el agua se puede utilizar para la irrigación y otros fines, incluso a base de primitivos medios técnicos.

Los desiertos ocupan vastas regiones situadas sobre todo en la zona de latitud comprendida entre 15° y 30°. El Sahara, situado en África del Norte, es el más grande de todo el mundo, con una superficie de unos 9 millones de km², comparable a la de los Estados Unidos de América. Otros grandes desiertos son los de la Península Arábiga y del Irán — que podrían considerarse como una continuación del Sahara —, el desierto del Turkestán en la Unión Soviética, el desierto de Thar en la India, el de Gobi en China y Mongolia, el Gran Desierto Americano; y — en el hemisferio sur — el desierto de Kalahari en África del Sur; el Gran Desierto Australiano, y el desierto

de Atacama en Chile septentrional. Este último, si bien es de superficie relativamente reducida, es sin duda alguna el más seco: no se ha registrado ninguna precipitación en su mayor parte durante más de un siglo.

Cambios climatológicos

Sin embargo, en la historia de la Tierra, el clima ha cambiado repetidamente, y los actuales desiertos no han sido siempre tan áridos, tan desprovistos de vida y vegetación. Los grabados y pinturas rupestres, así como los restos de industrias humanas en muchos puntos del Sahara, demuestran que en el pasado el clima y el medio ambiente eran favorables para la vida humana. Esto significa que, en algún momento en el pasado, las lluvias eran relativamente abundantes y el agua fácilmente obtenible. El último de estos períodos "pluviales", denominado "Neolítico húmedo", duró desde hace 7000 años hasta hace 3000 años aproximadamente. Después de este período, las condiciones se fueron deteriorando progresivamente, desapareciendo de la superficie las masas de agua, disminuyendo gradualmente el caudal de los manantiales y descendiendo el nivel freático. Sin embargo, hasta hace solamente 2000 años las condiciones eran con toda probabilidad mejores que las actuales. Las legiones romanas atravesaron dos veces el desierto de Libia y llegaron hasta el gran oasis de Wadi Ajal, en el Fezzan, para luchar contra los garamantes: la primera vez en el año 20 a. de J.C., partiendo de Sabratha (65 km al oeste de Trípoli) a Ghadames y cruzando entonces la meseta de Hamada-el-Hamra (desierto de piedras rojas), un total de 1200 km; la segunda vez en el año 70 d. de J.C. siguiendo una vía más oriental, a través del oasis del Jufrah y el Jebel Sawda (Montaña Negra).

Al sur del Sahara, aproximadamente entre 18° y 12° de latitud norte, las precipitaciones aumentan, aunque siguen siendo bastante escasas. Pero — lo que es más importante — la lluvia es un fenómeno regular en verano, debido al desplazamiento septentrional del monzón. En consecuencia, en la estación lluviosa aparece una escasa vegetación, suficiente para la ganadería nómada. Esta región se denomina el Sahel, que en árabe significa "costa", ya que el desierto se compara con el mar. El habitat del Sahel es sin embargo bastante precario: uno o dos años de lluvias escasas bastan para provocar desastres: la muerte por hambre de miles de animales y, a menudo, de personas, especialmente de niños. Estos trágicos acontecimientos se han producido repetidamente en la última década. Tales sequías pueden causar también la desertificación, fenómeno que hoy día constituye la principal preocupación de los países del Sahel.

*Miembro de la Sección de Hidrología Isotópica, División de Investigaciones y Laboratorios, OIEA.



Uno de los grabados rupestres más finos en Wadi Zizyah (Fezzan, Libia) que demuestra la existencia en el pasado de condiciones ambientales favorables a la vida animal.

Unico recurso disponible: el agua subterránea

Es evidente que para mejorar las condiciones de vida en los oasis y en el Sahel y proteger estos lugares contra los fenómenos naturales, la primera necesidad es conseguir un abastecimiento suficiente de agua. Es asimismo evidente que ésta solo puede proceder del subsuelo. Por consiguiente, todos los países de las zonas áridas han iniciado proyectos agrícolas — financiados a menudo por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) — destinados a estudiar y evaluar sus recursos de agua subterránea y abrir pozos para explotarlos. En estos proyectos las técnicas isotópicas se han utilizado repetidamente para evaluar correctamente los recursos de agua subterránea.

Un problema básico en las zonas áridas que a menudo es de difícil solución por medio de las técnicas hidrológicas tradicionales es determinar si la masa de agua subterránea es recargada activamente. En otras palabras, se trata de saber si la extracción agotará el agua subterránea de una vez para siempre o si se trata de un recurso renovable. El agua subterránea puede renovarse por infiltración pluvial en la zona de recarga, donde aflora la formación geológica acuífera (denominada acuífero). Los análisis a base del tritio pueden a menudo arrojar luz sobre este problema.

El lecho actual desnudo y seco de Wadi Zizyah. En este cauce fluía probablemente el agua durante el Pleistoceno superior (hace unos 65 000 a 10 000 años) y el Neolítico húmedo (hace unos 7000 a 3000 años).



El tritio es un isótopo radiactivo del hidrógeno, de masa 3 y un período de 12,43 años. En los años 1952 a 1963 grandes cantidades del mismo se difundieron por la atmósfera debido a los ensayos realizados en ella con la bomba H. Antes de ese período, el único tritio presente en el medio ambiente era el producido por la radiación cósmica, el cual sumaba únicamente unos 3 a 4 kg para toda la Tierra. La concentración de tritio alcanzó su máximo en las lluvias de primavera de 1963, cuando en el hemisferio Norte se observaron valores hasta 1000 veces superiores al nivel natural. Después de 1963, la concentración de tritio disminuyó de modo continuo, como consecuencia de la prohibición de las explosiones termonucleares en la atmósfera.

La concentración de tritio en las aguas naturales, especialmente las subterráneas, suele ser muy baja. No obstante, las técnicas de recuento más avanzadas permiten detectar un átomo de tritio en 10^{18} átomos de hidrógeno. Una técnica reciente permite medir con un espectrómetro de masas los átomos de helio-3 producidos por desintegración del tritio. Se ha conseguido así disminuir el nivel de detección en un orden de magnitud, creyéndose posible reducir dicho nivel en otro orden de magnitud en un futuro próximo.

La presencia del tritio indica sin lugar a dudas que el agua subterránea ha recibido nueva carga después de 1952. Por tanto, el tritio sirve para detectar la recarga que ha tenido lugar durante los tres últimos decenios. Sin embargo, debido a la escasez de lluvias en las regiones áridas, un período de tiempo de esta magnitud podría no ser significativo estadísticamente, o ser demasiado corto para que el agua infiltrada alcanzase el nivel freático (el nivel del agua subterránea a poca profundidad). De hecho, en el Sahara las aguas subterráneas a poca profundidad no poseen ninguna cantidad significativa de tritio, lo que indica que la recarga moderna es despreciable o no ha alcanzado todavía el nivel freático.

Sin embargo, en caso de infiltración debería ser posible detectarla y evaluarla por medio de la variación del contenido de tritio en la humedad del suelo por encima del nivel freático. Los resultados hasta la fecha indican que este método es fiable y prometedor, especialmente si se utiliza en conjunción con modelos físicos que describan el movimiento del agua. Para estudiar mejor este método, el OIEA inició recientemente un programa coordinado de investigaciones. La República Federal de Alemania presta apoyo financiero por conducto de la Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF). El programa estudiará los procesos de infiltración del agua en zonas áridas.

Otro método para estimar la edad del agua subterránea es medir la cantidad de carbono-14 presente en el carbono inorgánico disuelto. El carbono-14 es un isótopo radiactivo, con un período de 5730 años, producido por radiación cósmica. La concentración de este isótopo radiactivo en el dióxido de carbono contenido actualmente en la atmósfera es muy baja, del orden de un átomo por 10^{12} átomos. El carbono es transferido de la atmósfera por fotosíntesis y respiración vegetales hasta el suelo y el agua subterránea, donde se disuelve sobre todo como bicarbonato. La datación del agua subterránea, aunque se vea complicada por la interacción de los iones bicarbonato con la matriz acuífera, facilita una indicación acerca de si se trata de agua muy vieja: el método es válido solo para edades superiores a

2000–3000 años. El límite superior es hoy día de unos 30 000 años, pero posiblemente este límite podrá aumentarse hasta 70 000 años o aún más mediante el desarrollo de nuevas técnicas de recuento, utilizando el ciclotrón o el acelerador Van de Graaff.

Un tercer método isotópico es tal vez el más interesante para los estudios del agua subterránea en zonas áridas: la variación de las razones de los isótopos estables del deuterio/hidrógeno y del oxígeno-18/oxígeno-16 en el agua. Hoy se sabe que en el pasado estas razones en el agua de lluvia han variado con los cambios climáticos. Por tanto, las razones isotópicas del agua subterránea que sean considerablemente más bajas que las previstas para modernas precipitaciones, indican que el agua subterránea no es reciente y que fue recargada hace miles de años, cuando el clima era más húmedo.

Aguas muy antiguas

En zonas áridas, y en particular en el Sahara o en zonas subsaharianas, donde el OIEA ha efectuado investigaciones hidrológicas con técnicas isotópicas por contrata con otras organizaciones de las Naciones Unidas (FAO, UNESCO y PNUD), el agua subterránea profunda puede ser muy vieja. El contenido de carbono-14 es con frecuencia igual o inferior al 2% del contenido moderno, lo que indica una edad de más de 20 000 años (teniendo en cuenta los errores y las incertidumbres inherentes del método). Esto parece indicar que la recarga ocurrió probablemente durante el período pluvial del Pleistoceno superior (hace unos 10 000 a 65 000 años). A latitudes más elevadas este período corresponde a la última época glacial, denominada wúrmica y weichseliana en Europa y wisconsiniana en América del Norte. Una prueba suplementaria de esta edad elevada es el relativo empobrecimiento en los isótopos estables pesados, deuterio y oxígeno-18, lo que también indica que la recarga ocurrió durante un período más húmedo que el actual.

Se han hecho observaciones análogas a las que se acababan de describir, por ejemplo, para el denominado acuífero "Intercalar Continental", principal formación acuífera del Sahara occidental: está situada en su mayor parte en Argelia, desde el Atlas hasta las montañas Ahaggar en dirección norte-sur; y de Túnez y Libia occidental al valle Wadi Saura, en dirección este-oeste. Su superficie total es de unos 600 000 km², cerca del 10% mayor que la de Francia y siete veces la de Austria. La cantidad de agua almacenada en dicho acuífero es enorme, del orden de millares de kilómetros cúbicos.

El Intercalar Continental ocupa sobre todo zonas desérticas, a menudo a grandes profundidades: por ejemplo, en las proximidades de Tuggurt es extraído mediante pozos perforados, cuya sección filtrante (secciones perforadas) se encuentra a una profundidad de 1500 a 1700 m. La carga hidrostática está situada entre 260 y 290 m por encima de la superficie terrestre, y la temperatura del agua es superior a 70°C, de modo que es necesario enfriarla antes de su distribución. En los bordes, donde la formación aflora, el carbón-14 aumenta, lo que indica la presencia de agua más joven. Una fuente de recarga que ha sido identificada con ayuda de isótopos estables es el acuífero a poca



Pozo artesiano en Wadi Qirzah.

profundidad del Gran Erg Occidental. Se trata de una vasta formación de dunas de arena que cubre la parte noroccidental del Intercalar Continental, que se formó durante el período hiperárido que siguió al Pleistoceno superior pluvial y precedió al Neolítico húmedo. Igualmente, la técnica de isótopos estables ha permitido confirmar definitivamente la descarga del agua del Intercalar Continental en una formación más superficial, donde el agua subterránea profunda asciende a través del sistema de fallas de El Hamma.

Los últimos ejemplos indican también que las mediciones con isótopos estables sirven para identificar el origen del agua subterránea y las interconexiones hidráulicas entre acuíferos. Este tipo de información es desde luego esencial en cualquier tentativa de evaluar el balance de una formación acuífera.

En un reciente estudio efectuado en la Jamahiriya Árabe Libia, los isótopos estables ayudaron a reconstruir el flujo de aguas subterráneas regionales. El flujo principal va de sur a norte en grandes acuíferos (Paleozoico, Kicla), que son cada vez más explotados para los numerosos nuevos proyectos agrícolas y granjas experimentales creadas en varios grandes oasis desde el Fezzan hasta el mar (Murzuk, Wadi Ajal, Wadi Ash Shati, Al Jufrah, Wadi Zamzam, etc.). En este caso también el agua subterránea suele ser vieja (más de 20 000 años), según el carbono-14, edad que viene corroborada por el contenido relativamente bajo de deuterio y oxígeno-18. Además,

Desierto de dunas (Erg) en el Fezzan.





El pueblo de Butilimit en el Sahel, Mauritania meridional.

los isótopos estables han contribuido a esclarecer las relaciones entre varios acuíferos y determinar la cantidad de agua subterránea procedente de distintas fuentes.

Escasa información

Por muchas razones, el estudio de los recursos de agua subterránea de las zonas áridas es complejo y difícil. Los pozos perforados, cuyo perfil estatigráfico sirve para la evaluación hidrogeológica de las diversas formaciones acuíferas, suelen ser escasos; a menudo hay grandes zonas desprovistas totalmente de los mismos; cuando los pozos existen, la documentación a ellos referente se ha perdido, a veces, o es incompleta. Los tipos de datos disponibles (meteorológicos, climatológicos, hidrológicos, piezométricos, etc.) son pocos, si se tiene en cuenta la extensión de las zonas de que se trata. Además el tiempo transcurrido desde el comienzo de las observaciones es a menudo demasiado corto, en especial considerando la desigualdad y la rareza de los fenómenos observados:

por ejemplo, se conoce poco acerca de las precipitaciones en el desierto, el valor medio y la probabilidad de repetición de lluvias que exceda cierto valor; por consiguiente, toda evaluación de la tasa de renovación del agua subterránea resulta discutible.

En este contexto, las técnicas isotópicas facilitan *informaciones adicionales imposibles de obtener por otros medios*. La variación en función del tiempo de la composición isotópica del agua de lluvia es importante porque arroja luz sobre el problema de la recarga moderna y permite evaluar la edad del agua subterránea. Los isótopos estables pueden utilizarse como trazadores ambientales para seguir el movimiento del agua subterránea en grandes distancias. Comparados con los trazadores inyectados artificialmente, los isótopos ambientales poseen la ventaja de alcanzar de modo continuo toda la zona de estudio, y, por tanto, los resultados obtenidos son válidos en el tiempo y en el espacio. Con respecto a otros trazadores ambientales, como los elementos químicos disueltos en el agua, los isótopos de hidrógeno y de oxígeno poseen la ventaja de que su concentración es mucho más estable (excepto el tritio, cuya ley de desintegración, sin embargo, se conoce bien), con una interacción despreciable o limitada con la matriz del acuífero y con un comportamiento exactamente igual al del agua, porque están incorporados en la molécula de este elemento.

El empleo de técnicas isotópicas en estudios hidrológicos en zonas áridas fue examinado a fondo en una reunión del Grupo asesor celebrada por el OIEA en 1978. Se presentaron 17 memorias, publicadas ahora en las actas de la reunión (*Arid-zone hydrology: investigations with isotope techniques*, STI/PUB/547, OIEA, Viena, 1980) que resume la mayoría de los datos y la experiencia adquirida después de un decenio de trabajo en zonas áridas.

El lago Um el Maih (Madre de la Sal) en el Mar de Arena de Ubari, Fezzan. En esta zona hay otros lagos pequeños análogos, que ocupan depresiones entre las dunas, donde aflora el agua subterránea. Debido a la elevada tasa de evaporación, el contenido de sal de los lagos es elevado y a menudo alcanza el nivel de saturación, son la consiguiente formación de yacimientos de sal compuestos sobre todo de cloruro de sodio. La sal suele ser recogida para su venta por las pequeñas comunidades que viven en el oasis del lago.

