

# Hidrología isotópica, un medio para investigar la contaminación de las aguas subterráneas

*Utilización de isótopos ambientales  
para el estudio de problemas graves de contaminación*

por V. Dubinchuk, K. Fröhlich y R. Gonfiantini

Durante los últimos cien años, las aguas subterráneas han llegado a constituir una fuente cada vez más importante de abastecimiento de agua para usos domésticos, agrícolas e industriales en todo el mundo. A ello han contribuido la presencia casi ubicua de formaciones acuíferas, la calidad de las aguas subterráneas y el desarrollo de las técnicas de perforación de pozos.

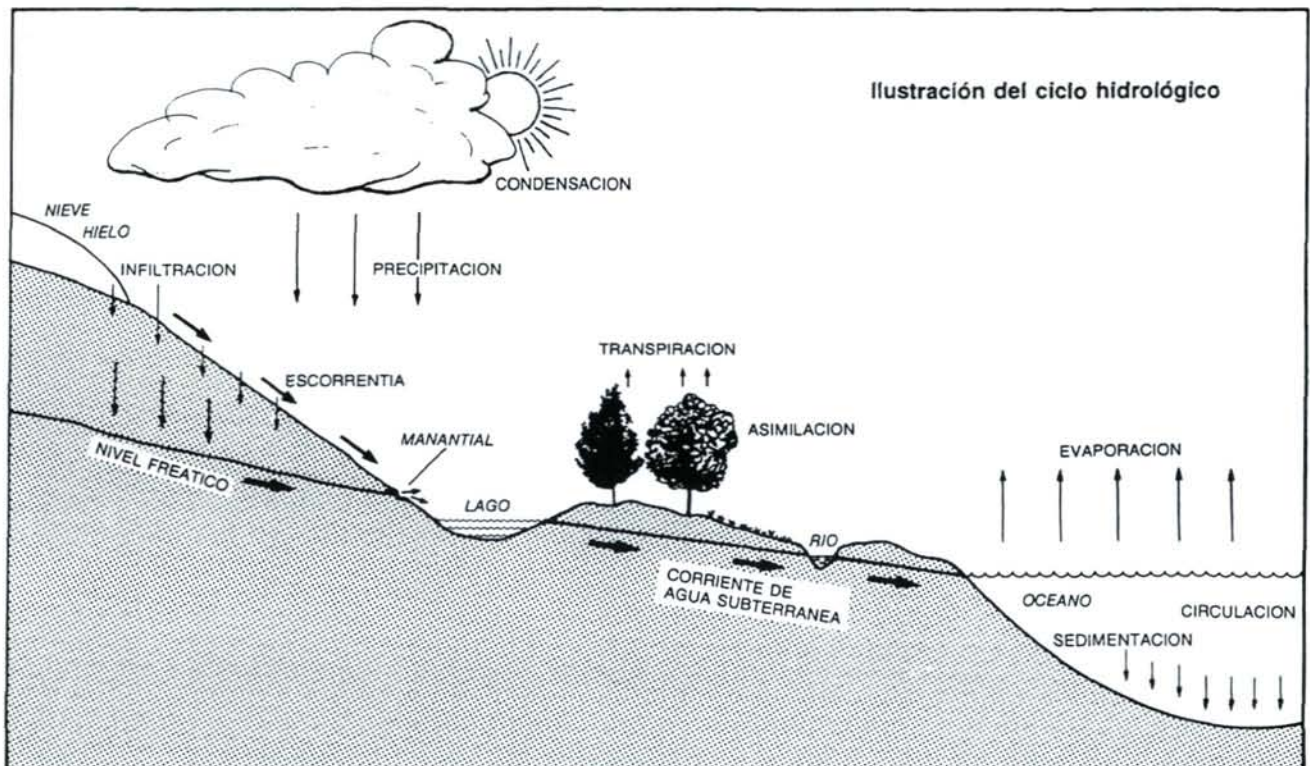
Gracias a la protección natural que les es propia, las aguas subterráneas han logrado escapar a la contaminación por mucho tiempo. Esas aguas se han mantenido más limpias y transparentes que las aguas superficiales. De hecho, desde tiempos de Hipócrates —siglo V a. de

J.C.— se ha considerado que las aguas superficiales en remanso son causa de enfermedades.

Con todo, en los últimos tiempos la calidad de las aguas subterráneas de muchas regiones se ha deteriorado y, en ocasiones, las consecuencias han sido graves. El proceso de descontaminación de las aguas subterráneas es sumamente lento y, algunas veces, imposible de realizar debido a los prolongados tiempos de permanencia de las aguas en la mayoría de las formaciones geológicas.

Las principales causas de contaminación son el uso inadecuado de las aguas subterráneas, que suele ser resultado de las presiones que ejercen las necesidades sociales inmediatas, y la falta de reglamentos y de control sobre la utilización y evacuación de las sustancias contaminantes. Entre las fuentes de contaminación más importantes se encuentran las prácticas agrícolas y el uso

El Sr. Dubinchuk y el Sr. Fröhlich son funcionarios de la Sección de Hidrología Isotópica de la División de Ciencias Físicas y Químicas del OIEA; el Sr. Gonfiantini es Jefe de la Sección.



a veces indiscriminado y con frecuencia excesivo de abonos, plaguicidas y herbicidas. Por ejemplo, los niveles de nitratos que suelen derivarse del uso de abonos están aumentando en los acuíferos poco profundos.

Las sustancias contaminantes industriales y domésticas se cuentan entre las más peligrosas. Ello obedece, en parte, al hecho de que se producen principalmente en zonas urbanizadas donde la demanda de agua es mayor y la extracción de aguas subterráneas, más intensa. En estos casos, a medida que disminuye la presión del agua subterránea, las aguas superficiales contaminadas pueden llegar a penetrar hasta profundidades donde antes la presión artésiana había impedido la infiltración.

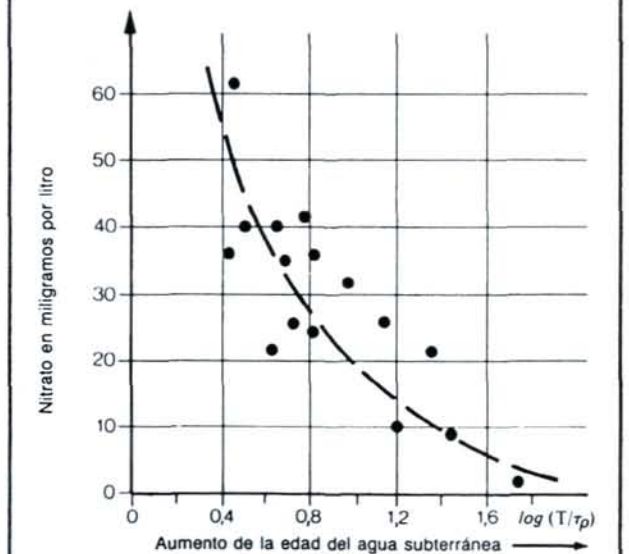
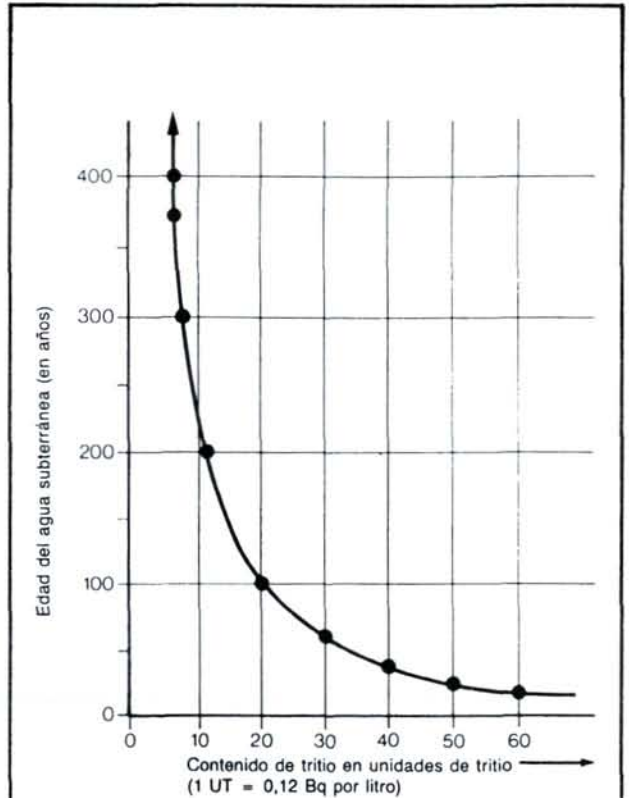
En las regiones costeras el desarrollo excesivo suele ser la causa de la invasión de las aguas de mar y la consiguiente salinización de las aguas subterráneas. En las zonas áridas, el exceso de desarrollo suele provocar la rápida disminución de los recursos hídricos subterráneos que no se reponen lo suficiente debido a las condiciones climáticas imperantes. Además, los proyectos de regadío mal concebidos pueden apresurar el proceso de salinización del suelo que, a la larga, se vuelve estéril.

Por ejemplo, una investigación sobre las aguas subterráneas realizada en el Valle de Mexicali, en la árida región noroccidental de México, ayudó a los investigadores a encontrar la fuente de salinización. La química por sí sola no pudo solucionar el problema de si el empobrecimiento de las aguas subterráneas se debía a prácticas de regadío incorrectas o a la infiltración de las márgenes de la Presa Morelos o del canal de avenamiento Wellton-Mohawk. Mediante el uso de técnicas isotópicas, los investigadores examinaron las correlaciones lineales entre las concentraciones de cloro y oxígeno 18 y entre los dos isótopos pesados de deuterio y oxígeno 18. Los resultados (dados a la publicidad en 1979 por Payne, Quijano y Latorre) indicaron inequívocamente que se había producido mezcla con el canal de avenamiento Wellton-Mohawk, lo que permitió considerarle como la fuente principal de contaminación.

Estos y otros tipos de problemas han dado lugar a una demanda creciente de investigaciones con el objeto de aumentar los conocimientos acerca del comportamiento de las sustancias contaminantes en el ciclo hidrológico. Los principales objetivos son impedir la contaminación y degradación de los recursos hídricos subterráneos, o, si la contaminación ya está presente, determinar su origen para proponer medidas correctivas.

**Isótopos ambientales**

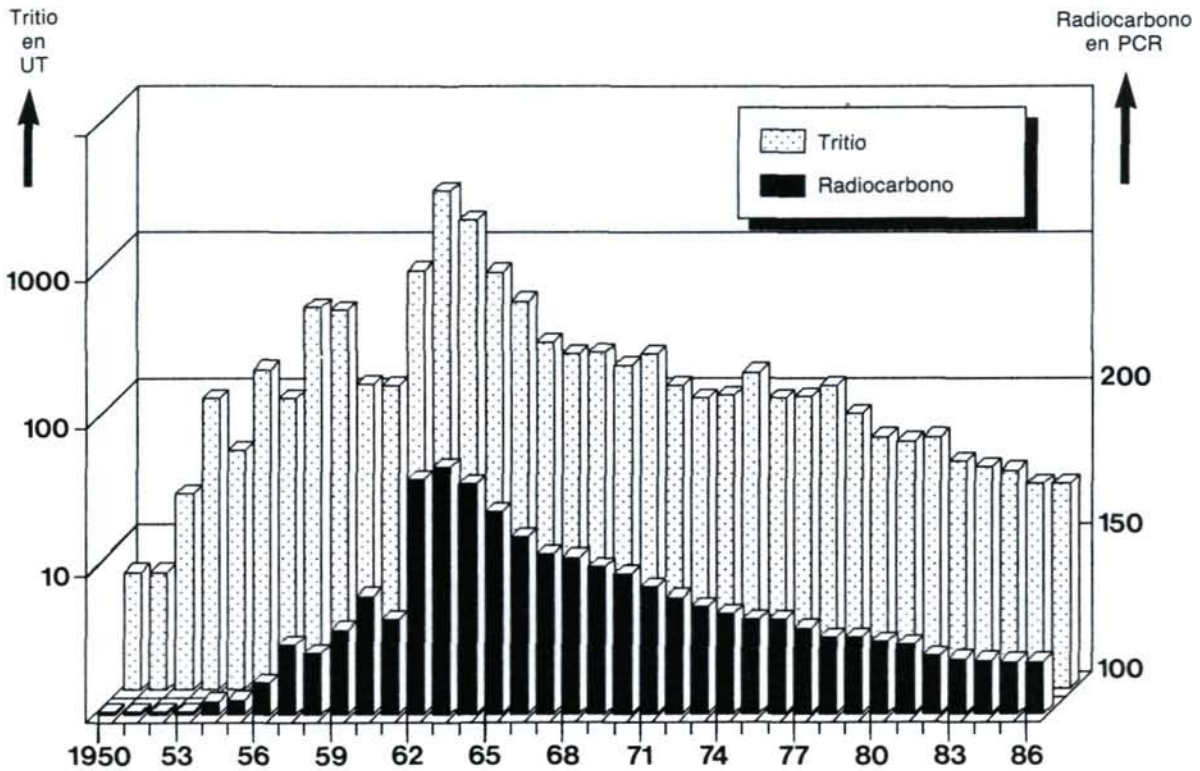
Los isótopos ambientales han demostrado ser un instrumento poderoso para el estudio de la contaminación de las aguas subterráneas. Estos isótopos suelen ser raros, tanto los estables como los radiactivos, y se encuentran en el medio ambiente en concentraciones bajas y variables respecto del isótopo más abundante del mismo elemento. Los isótopos ambientales se encuentran en la naturaleza o pueden ser creados por el hombre. En cualquier caso, su distribución en el medio ambiente se rige por procesos naturales. Pese a su pequeño tamaño, las variaciones en la concentración de isótopos ambientales se miden con suma exactitud y suministran información valiosa sobre los sistemas hidrológicos.



Notas: T es la edad del agua subterránea.  $\tau_p$  es el período transcurrido entre la presencia de tritio procedente de ensayos de armas en la atmósfera y la realización del estudio sobre el terreno.

Estas figuras muestran la correlación entre la concentración de nitrato y de tritio que se observó en un acuífero permiano ilimitado de la República Democrática Alemana. La correlación indica que el transporte de nitrato a las aguas subterráneas se produjo mediante infiltración del agua de lluvia.

Presencia de tritio en las precipitaciones y de radiocarbono en el dióxido de carbono en la atmósfera en Europa Central



Nota: El contenido de tritio en unidades de tritio (UT); 1 UT = 0,12 Bq por litro.  
PCR = Por ciento de carbono reciente: 1 PCR = 0,23 Bq por gramo de carbono.

Las variaciones isotópicas que se observan en las aguas naturales son el resultado de procesos del ciclo hidrológico y de la interacción entre la hidrosfera y la atmósfera. (Véase la figura adjunta.) Por regla general, los isótopos estables, que no varían en el tiempo, se utilizan para determinar el origen de las aguas subterráneas y los procesos de mezcla. Los radisótopos, cuya desintegración en el tiempo puede detectarse, se utilizan para evaluar la dinámica de las aguas subterráneas. Los análisis químicos suelen proporcionar información complementaria y se efectúan conjuntamente con la investigación isotópica.

Los isótopos que se emplean con mayor frecuencia en las investigaciones hidrológicas son el tritio y el carbono 14, producidos de forma natural por radiación cósmica secundaria. Estos isótopos se han ido incorporando en grandes cantidades a la atmósfera como consecuencia de los ensayos termonucleares realizados en ese medio por los Estados Unidos, el Reino Unido y la Unión Soviética hasta 1963. Los ensayos posteriores realizados por China y Francia sólo han producido cantidades poco significativas. (Véase la figura adjunta.) La disminución de las concentraciones de tritio y carbono 14 en las precipitaciones y en el dióxido de carbono de la atmósfera tras la concertación del Tratado de

prohibición parcial de los ensayos en 1963 ha proporcionado nuevos y valiosos conocimientos sobre los procesos atmosféricos.

El tritio, cuyo período de semidesintegración es de 12,43 años, sirve para detectar las recargas más recientes de las aguas subterráneas, es decir, para detectar las recargas que han tenido lugar en los últimos tres decenios. Además de su gran importancia hidrológica, esta información constituye un instrumento para evaluar el posible riesgo de contaminación de una masa de agua subterránea dada. La presencia del tritio indica que el tiempo de tránsito del agua desde la zona de recarga hasta el acuífero es breve, al igual que el tiempo de permanencia del agua subterránea en el acuífero. Esto reduce la posibilidad de que cualquier sustancia contaminante disuelta en el agua de la recarga llegue a ser absorbida por la matriz acuífera. De ahí que el riesgo de contaminación se eleve potencialmente.

El movimiento de los radionucleidos en las aguas subterráneas es uno de los principales temas de investigación. Los radionucleidos naturales de las series de desintegración del uranio y el torio se incorporan a las aguas subterráneas del acuífero matrix mediante disolución. En condiciones favorables pueden utilizarse para evaluar la dinámica de las aguas subterráneas.

**Isótopos estables de los principales elementos utilizados en los estudios del medio ambiente**

Isótopos	Abundancia en compuestos naturales (%)
Hidrógeno 1	99,984
Hidrógeno 2	0,015
Carbono 12	98,89
Carbono 13	1,11
Nitrógeno 14	99,634
Nitrógeno 15	0,366
Oxígeno 16	99,76
Oxígeno 18	0,2
Azufre 32	95,02
Azufre 34	4,21

A propósito, los estudios sobre el comportamiento geoquímico de estos radionucleidos tienen también cada vez más interés para evaluar los emplazamientos nucleares, en especial los emplazamientos para la evacuación de desechos radiactivos. El problema consiste en evaluar el ritmo de adsorción-desorción de estos isótopos en diversas matrices rocosas y determinar su velocidad de migración sobre la base del conocimiento de la velocidad de migración de las propias aguas subterráneas.

La técnica de diagráfia nuclear puede ayudar a determinar el ritmo de filtración del agua en la zona no saturada (la zona del acuífero poco profundo por encima del nivel freático). Esta técnica se utilizó conjuntamente con datos de los isótopos ambientales y artificiales en la región de Chernobil, en la URSS, para evaluar el tiempo que necesitarán las sustancias contaminantes para llegar a las aguas subterráneas desde la superficie de la tierra.

Desde 1987 el OIEA cuenta con un programa coordinado de investigación sobre la aplicación de técnicas nucleares para determinar el transporte de sustancias contaminantes en las aguas subterráneas. En el marco del programa de cooperación regional del OIEA en América Latina, conocido como ARCAL, se está acometiendo un proyecto de hidrología isotópica cuyos principales objetivos son la aplicación de isótopos ambientales a los problemas de evaluación y contaminación de las aguas subterráneas en América Latina. En 1989 se prevé la realización de otro programa coordinado de investigación con arreglo al cual se utilizarán trazadores isotópicos y de otro tipo para confirmar la validez de los modelos matemáticos en los estudios sobre el transporte de las aguas subterráneas.

**Radionucleidos utilizados en los estudios sobre aguas subterráneas**

Nucleido	Período de semi-desintegración (años)	Fuente de producción	Concentración inicial aproximada de la actividad en las aguas subterráneas (mBq por litro)
Tritio (Hidrógeno 3)	12,4	Radiación cósmica secundaria; ensayos de dispositivos term nucleares en la atmósfera; instalaciones nucleares (principalmente instalaciones para el tratamiento del combustible irradiado)	600 (antes de 1954)
Carbono 14	5730	Radiación cósmica secundaria; ensayos de dispositivos term nucleares en la atmósfera; instalaciones nucleares (principalmente instalaciones para el tratamiento del combustible irradiado)	3
Silicio 32	105	Radiación cósmica secundaria	$5 \times 10^{-3}$
Cloro 36	301 000	Radiación cósmica secundaria; ensayos de dispositivos term nucleares en la atmósfera; reacciones nucleares naturales (subterráneas)	$3 \times 10^{-3}$
Argón 39	269	Radiación cósmica secundaria; reacciones nucleares naturales (subterráneas)	$7 \times 10^{-4}$
Criptón 81	210 000	Radiación cósmica secundaria	$1 \times 10^{-7}$
Criptón 85	10,7	Instalaciones nucleares (principalmente instalaciones para el tratamiento del combustible irradiado)	menos de $2 \times 10^{-7}$ (antes de 1950)

