

La radiactividad y las ciencias geológicas: Comprensión del medio natural

La radiactividad natural de la Tierra está ayudando a los científicos a conocer más sobre los procesos geológicos y el cambio climático mundial

Prácticamente todas las sustancias naturales contienen radionucleidos en mayor o menor grado. Esa radiactividad natural —descubierta hace cien años por el físico francés Henri Becquerel— se utiliza en la actualidad con fines prácticos en muchas ramas de la ciencia y la industria.

En las ciencias geológicas se está estudiando la transferencia de radionucleidos naturales según sus propiedades físicas y químicas, a fin de seguir la evolución de la corteza y el manto terrestres, estudiar los procesos asociados al ciclo hidrológico, y explicar algunos aspectos de la composición de la atmósfera. La radiactividad de las rocas, los minerales, el agua y la materia orgánica se usa mucho en la datación del material geológico y el arqueológico, y de las aguas subterráneas.

La energía liberada durante la desintegración radiactiva se considera hoy día una de las principales fuentes de calor en el interior de la Tierra. Es posible que los movimientos de las capas de la litosfera, la orogenia de las montañas y el vulcanismo tengan su origen en la presencia de radionucleidos. Incluso a escala local, esta presencia puede dar lugar a zonas de flujo de altas temperaturas en rocas de la corteza terrestre. Ello, a su vez, produce la circulación convectiva de aguas subterráneas, que puede propiciar la formación de sistemas energéticos con componentes hidroeléctricos y la consiguiente mineralización.

El descubrimiento y la posterior utilización de las reacciones de fisión y fusión han añadido nuevos elementos a la gama de materiales radiactivos presentes en el medio ambiente. Numerosos radionucleidos han pasado a integrar el ecosistema terrestre, principalmente por medio de los ensayos de bombas nucleares en la atmósfera, y de las emisiones provenientes de la industria nuclear, entre otras fuentes. El seguimiento de su desplazamiento a través de distintos compartimientos del ecosistema mundial arroja nueva luz sobre la dinámica de la atmósfera y del ciclo hidrológico. (Véase el recuadro.)

El reloj natural de la Tierra

Quizá la más típica y lograda aplicación de la radiactividad en las ciencias geológicas sea su uso como "reloj" natural capaz de medir sucesivamente diversos procesos que ocurren en la Tierra. La versatilidad de este reloj es notable, pues puede funcionar eficazmente en más de 15 órdenes de magnitud cuantificando procesos cuya duración oscila entre minutos y miles de millones de años. Para datar con precisión cualquier material de origen geológico o biológico, deben cumplirse dos requisitos esenciales: 1) evaluar con cuidado las fuentes y los sumideros posibles del (de los) radionucleido(s) en uso; y 2) conocer o evaluar el antiguo estado físico del sistema que se datará (sistema abierto o cerrado).

En la datación geológica y arqueológica se utiliza una diversidad de radionucleidos: los producidos durante la nucleosíntesis estelar (radionucleidos primordiales), los pertenecientes a las series de desintegración natural, los resultantes de reacciones nucleares naturales que se producen en la atmósfera (radionucleidos cosmogénicos) y en la litosfera (radionucleidos producidos *in situ*), y los originados en reacciones nucleares artificiales (radionucleidos antropogénicos).

¿Cómo funciona el reloj radiactivo? Su funcionamiento se basa en que la desintegración radiactiva no depende de las condiciones físicas y químicas ni de los cambios en el medio ambiente. La velocidad de desintegración de un radionucleido está determinada por el período de semidesintegración, que puede definirse como el tiempo necesario para que un número determinado de átomos de ese radionucleido se reduzca a la mitad. Para que la datación se pueda efectuar con exactitud, se requieren períodos de semidesintegración del mismo orden que la edad del material que se datará. Afortunadamente, los radionucleidos naturales tienen períodos de semidesintegración que oscilan entre menos de un segundo y más de 10^{10} años. (Véase el cuadro de la página siguiente.) Por tanto, es posible realizar una amplísima gama de dataciones, incluidas estimaciones de la edad de la Tierra y del sistema solar. Algunos de los métodos de datación se basan en la relación que se establece entre el radionucleido y su producto de

por Kazimierz
Rozanski y
Klaus Froehlich

El Sr. Rozanski es funcionario de la Sección de Hidrología Isotópica de la División de Ciencias Físicas y Químicas del OIEA, y el Sr. Froehlich es Jefe de la Sección.

Principales aplicaciones de los radionucleidos naturales y artificiales en las ciencias geológicas

Estudios de la atmósfera

- procesos de dispersión, transporte y mezcla a nivel local, regional y mundial (tritio, criptón 85, radón 222, carbono 14)
- transporte de vapor de agua (tritio)
- intercambio entre la estratosfera y la troposfera (tritio, carbono 14, criptón 85, berilio 7, berilio 10)
- fuentes y sumideros de CO₂ y CH₄ (tritio, carbono 14)
- deposición atmosférica (cloro 36, berilio 7, berilio 10, estroncio 90, cesio 137)

Estudios de la hidrosfera

Hidrosfera continental

- recarga de los recursos de aguas subterráneas (tritio, cloro 36)
- estudios de dispersión en aguas superficiales (tritio)
- estudios de aireación (criptón 85)
- interacción entre la superficie y las aguas subterráneas (tritio, radón 222, carbono 14)
- datación de las aguas subterráneas (tritio, carbono 14, criptón 85, argón 39, cloro 36, criptón 81)
- interacciones roca-agua (uranio 238, uranio 234, radio 226, radio 228)
- tasas de sedimentación en lagos naturales y artificiales (cesio 137, plomo 210)
- evacuación de desechos radiactivos (cloro 36, yodo 129)

Océanos

- procesos de circulación y mezcla (tritio, carbono 14, criptón 85)
- edad de las masas de agua (tritio, carbono 14, argón 39, criptón 85)
- transferencia de CO₂ artificial al océano (carbono 14)
- datación de sedimentos oceánicos (carbono 14, potasio 40)
- variaciones del nivel del mar en otros períodos (carbono 14, uranio 234, torio 230)

Estudios de la litosfera

- datación de rocas y minerales (potasio 40, argón 39, rubidio 87, lutecio 176, hafnio 174, samario 147, neodimio 143, renio 187, radionucleidos de las series de desintegración del uranio y el torio)
- datación de depósitos de carbonato (carbono 14, uranio 234, torio 230)
- datación de sedimentos lacustres (cesio 137, plomo 210, carbono 14, uranio 234, torio 230)
- datación de la exposición superficial (berilio 10, carbono 14, aluminio 26, cloro 36)
- erosión del suelo (cesio 137, plomo 210, berilio 10)
- exploración mineral (radionucleidos de las series de desintegración del uranio y el torio)
- vigilancia sísmica (radón 222)
- paleosismicidad y erupciones volcánicas (cloro 36, aluminio 26, berilio 10)

desintegración, el cual en esos casos suele ser un descendiente estable.

Hasta principios del siglo XX las opiniones sobre la edad de la Tierra diferían considerablemente: las estimaciones oscilaban entre algunas decenas de millones de años y varias decenas de miles de millones de años. El debate concluyó en 1929, año en que Rutherford utilizó la recién descubierta radiactividad

Radionucleidos naturales y artificiales comúnmente utilizados en las ciencias geológicas

Nucleido	Período de semi-desintegración (años)	Origen*
Tritio	12.43	N+A
Berilio 7	9.7×10^{-2}	N
Berilio 10	1.6×10^6	N
Carbono 14	5730	N+A
Silicio 32	140	N
Cloro 36	3.01×10^5	N+A
Argón 39	269	N
Criptón 85	10.76	A
Criptón 81	2.1×10^5	N
Yodo 129	1.57×10^7	N+A
Potasio 40	1.3×10^9	N
Rubidio 87	4.88×10^{10}	N
Cesio 137	30.17	A

Radionucleidos de las series de desintegración del uranio y el torio		
Uranio 238	4.47×10^9	N
Uranio 235	7.13×10^8	N
Uranio 234	2.48×10^5	N
Protactinio 231	3.43×10^4	N
Torio 230	7.52×10^4	N
Radio 226	1602	N
Radio 228	5.75	N
Radon 222	1.05×10^{-2}	N
Radon 220	1.76×10^{-6}	N
Plomo 210	22.3	N

*N - Natural (desintegración de radionucleidos primordiales producidos en la nucleosíntesis estelar, las interacciones de los rayos cósmicos con la atmósfera y/o con la corteza terrestre); A - Artificial (explosiones nucleares subterráneas y en la atmósfera, industria nuclear, industria relojera, hospitales, entre otros); N+A - aportaciones significativas de ambas fuentes, la natural y la artificial.

para medir las edades de las rocas y en poco tiempo obtuvo una edad de miles de millones de años mediante el método U-He. La primera determinación precisa de la edad de la Tierra y los meteoritos se efectuó a principios del decenio de 1950 y se basó en los isótopos del plomo, productos finales estables de las respectivas series de desintegración radiactiva. Según esa determinación, la edad de la Tierra era de 4 550 mil millones de años, valor que en la actualidad se sigue aceptando en general como la edad de la Tierra y del sistema solar.

Detección de la radiactividad natural

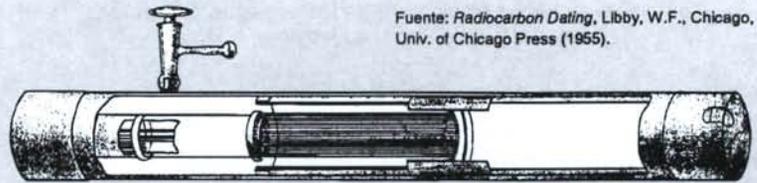
Los radionucleidos naturales se detectaron por primera vez por la radiación ionizante que emiten durante su desintegración. Esta técnica de "conteo de

El reloj de radiocarbono

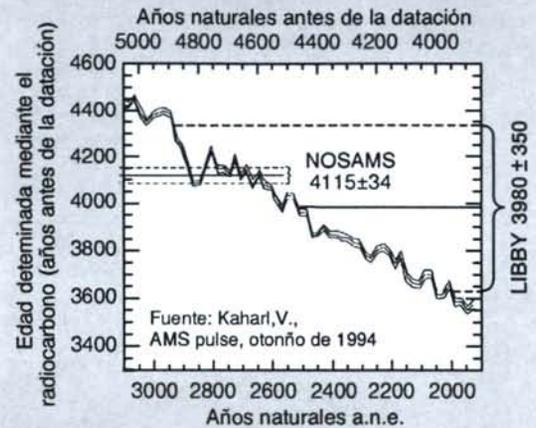
Contador de pared multifilar utilizado por Willard Libby para medir el contenido de carbono 14 en objetos arqueológicos (*derecha*). Libby ganó el premio Nobel de la Paz en 1960 por su labor en la creación del método de datación por radiocarbono. *Abajo*: Ejemplo de un moderno equipo para la determinación de carbono 14 mediante la AMS: acelerador tandemtrón a la venta en la red comercial destinado al análisis radiocarbónico. La primera muestra datada por Libby en 1948 fue una pieza de madera de *acacia* procedente de un mueble encontrado en la tumba del faraón Sozer en Saqqara, Egipto. Libby necesitó unos 20 gramos de este preciado objeto arqueológico para realizar el análisis. Varios egiptólogos, basándose en sucesos astronómicos, jeroglíficos y otros registros históricos, han indicado invariablemente que el reinado del faraón Sozer existió alrededor del 2600 a. n.e.. Como se muestra en el gráfico, Libby fijó el origen de la madera en el año 2030 a.n.e., con un margen de error de más o menos 350 años o en el 3980 antes de la datación, con un margen de error de más o menos 350 años. En 1992 se dató el mismo fragmento de madera de *acacia* hallado en la tumba del faraón Sozer en calidad de primera muestra analizada en el recién establecido National Ocean Sciences Accelerator Mass Spectrometry Facility del Instituto Oceanográfico Woods Hole, Woods Hole, Massachusetts, EE.UU.. En esta ocasión bastaron solamente unos 10 miligramos de madera para realizar el análisis. La edad de la madera encontrada en la tumba de Sozer, determinada por medio del radiocarbono con la AMS, corresponde al año 4115 antes de la datación, con un margen de error de más o menos 34 años, es decir, con un error sigma respecto del primer análisis de Libby.

Para convertir los años determinados por medio del radiocarbono en años naturales, es necesario hacer correcciones que representen las fluctuaciones anteriores del contenido de radiocarbono en el dióxido de carbono atmosférico. Estas correcciones se basan en mediciones de las concentraciones de radiocarbono en una serie de anillos de crecimiento de los árboles datados mediante técnicas dendrocronológicas. La edad de la madera encontrada en la tumba de Sozer, calibrada con los anillos de crecimiento para el análisis de la AMS, permitió determinar dos fechas posibles con un grado de fiabilidad del 95%: del 2877 al 2800 a.n.e. y del 2780 al 2580 a.n.e.. Este resultado concuerda con las estimaciones arqueológicas. No obstante, un notable aumento en la curva de calibración durante el reinado de Sozer impide estimar con gran precisión la edad de este material específico.

(Cortesía: Prof. P.M. Grootes, Christian Albrechts University, Kiel, Alemania)



Fuente: *Radiocarbon Dating*, Libby, W.F., Chicago, Univ. of Chicago Press (1955).



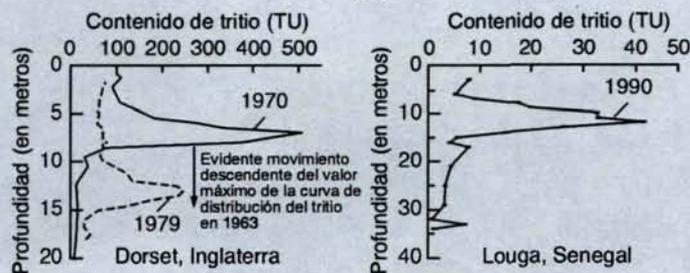
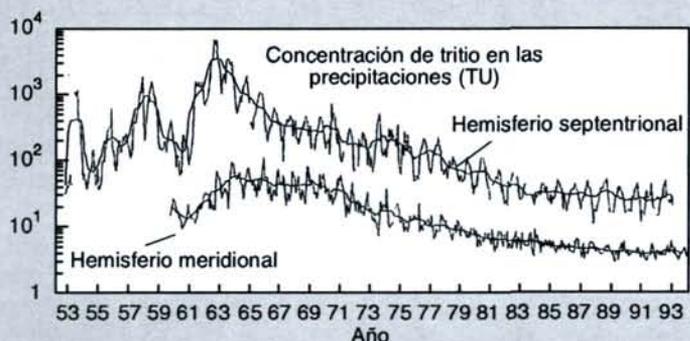
desintegración" se ha venido perfeccionando progresivamente desde que se descubrió la radiactividad natural un siglo atrás. El conteo de desintegración se ha convertido en una disciplina bien establecida y se está utilizando una amplia variedad de materiales (gases, líquidos, semiconductores, entre otros) para detectar distintos tipos de radiaciones ionizantes emitidas por diversos radionucleidos. Como la actividad de los radionucleidos naturales suele ser muy baja, generalmente se emplean complejas técnicas de procesamiento de señales y de reducción de fondo para incrementar la sensibilidad de esos detectores. Para la detección de radisótopos de período corto —con períodos de semidesintegración

de menos de un año aproximadamente— resulta adecuada la sensibilidad de las técnicas avanzadas de conteo de desintegración. Los radisótopos primordiales con períodos de semidesintegración superiores a unos 10^9 años se presentan de forma natural con relativa abundancia (ya que no se han desintegrado completamente durante la vida del sistema solar). El conteo de desintegración se suele sustituir en estos casos por la medición de la acumulación de productos de desintegración estables mediante la espectrometría de masas convencional. Resulta difícil medir radisótopos con períodos de semidesintegración en el intervalo intermedio de 10^3 a 10^8 años aplicando las técnicas de conteo de

Contenido de tritio proveniente de los ensayos de bombas nucleares en la atmósfera

En el gráfico superior que aparece infra se muestra el incremento del contenido de tritio en las precipitaciones como resultado de los ensayos de bombas nucleares en la atmósfera. El contenido de tritio en las precipitaciones está siendo vigilado a escala internacional por la Red mundial sobre isótopos en las precipitaciones (GNIP) del OIEA y la OMM. En el presente recuadro se ofrecen datos de dos puntos de vigilancia a largo plazo que abarcan los hemisferios septentrional y meridional.

Gráficos inferiores: Penetración del valor máximo de la curva de distribución del tritio como resultado de los ensayos de bombas nucleares en la zona no saturada del acuífero ubicado en una zona climática templada (Dorset, Inglaterra) y en una región semiárida (Louga, Senegal). En cuanto al perfil de Louga, obtenido en Senegal en el marco de un proyecto regional de cooperación técnica del OIEA, se estimó que la tasa de recarga media de este acuífero en los tres últimos decenios fue de unos 22 mm/año. Estas tasas de recarga bajas son muy difíciles de medir por los métodos hidrológicos clásicos.



desintegración, puesto que sólo una pequeña fracción de los átomos se desintegra en un tiempo de recuento prudencial. Por ejemplo, si se mide la concentración de carbono 14 en muestras orgánicas empleando un contador proporcional de gas o un contador de centelleo líquido, por término medio, de cada 10^6 átomos de carbono 14 presentes en la muestra, sólo uno se desintegrará y contribuirá a la señal que se mide. Por consiguiente, se necesitan muestras relativamente grandes del material analizado.

Los aceleradores de partículas, como los construidos a los fines de la investigación en el campo de la física nuclear, también pueden utilizarse junto con analizadores de masas magnéticos y electrostáticos para medir radisótopos en concentraciones muy bajas. La labor en esta dirección comenzó a finales del decenio de 1970. Hoy día, varios radisótopos de período largo que eran muy difíciles de medir por el conteo de desintegración (berilio 10, carbono 14, aluminio 26, cloro 36, calcio 41, yodo 129), pueden medirse normalmente en pequeñas muestras naturales con abundancias isotópicas que oscilan entre 10^{-12} y 10^{-15} y tan pocos

átomos como 10^{-5} . Gracias a esta nueva técnica analítica, denominada Espectrometría de masas con acelerador (AMS), se ha podido reducir el tamaño de la muestra en varios órdenes de magnitud. Por ejemplo, la cantidad de carbono requerida para la datación por radiocarbono podría reducirse de unos pocos gramos (conteo de desintegración) a algunas decenas de microgramos (AMS). Además, el tiempo de conteo puede acortarse notablemente. En el último decenio, las aplicaciones de la AMS en las investigaciones se centraron en las ciencias geológicas (climatología, cosmoquímica, geocronología, geomorfología, hidrología, glaciología, exploración de minerales, sedimentología) y en la antropología y la arqueología (datación por radiocarbono). (Véase el recuadro de la página anterior.) En los últimos años, la AMS se ha convertido además en un importante instrumento analítico para las ciencias de los materiales biológicos.

Datación de las aguas subterráneas

Los isótopos radiactivos han encontrado numerosas aplicaciones en la hidrología. El tritio y el carbono 14 son muy utilizados como "instrumentos de datación". Los ensayos en la atmósfera de bombas de fusión nuclear efectuados en los años cincuenta y principios de los sesenta liberaron grandes cantidades de tritio artificial a la atmósfera y con ello a la hidrosfera. La observación de este impulso de tritio transitorio en el ciclo del agua motivó numerosos estudios hidrológicos a escalas mundial, regional y local. Este tritio procedente de los ensayos de bombas nucleares se convirtió en un eficaz indicador de aguas jóvenes en los sistemas de aguas subterráneas y en un útil trazador para determinar la tasa de recarga de los acuíferos, particularmente en regiones áridas y semiáridas. (Véanse los gráficos de esta página.)

Pese a la complejidad de la geoquímica del carbono en los sistemas de aguas subterráneas, tanto el carbono 14 natural como el artificial se convirtieron en un instrumento muy utilizado para evaluar las edades de las aguas subterráneas del orden de unos cuantos miles a unas cuantas decenas de miles de años. Por ejemplo, el radiocarbono permitió evaluar, por primera vez, la edad de grandes reservas de agua subterránea almacenadas bajo el Sáhara. (Véase el gráfico de la página siguiente.)

La técnica de la AMS ha facilitado asimismo las aplicaciones de algunos nuevos radisótopos en la hidrología, como el cloro 36 y el yodo 129. Con el cloro 36 se estimó que las edades del agua subterránea de grandes cuencas sedimentarias, como la Gran Cuenca Artesiana de Australia, eran del orden de hasta un millón de años. Las mediciones de yodo 129 en formaciones de agua profundas asociadas a yacimientos de petróleo ayudan a aclarar el origen y la edad de estas aguas.

Cuantificación de la erosión y la sedimentación

En el proceso de erosión participan diferentes escalas cronológicas: desde procesos relativamente

rápidos, a menudo procesos de erosión de los suelos desencadenados por las actividades del ser humano, hasta procesos relativamente lentos de meteorización de las superficies de las rocas. La erosión de los suelos constituye un problema grave en muchos lugares del mundo por su repercusión en el desarrollo agrícola sostenible.

En principio, puede utilizarse una serie de radisótopos naturales y artificiales para evaluar las tasas de erosión de los suelos, según la escala cronológica correspondiente. Entre ellos, el cesio 137 y el plomo 210 son, con mucho, los que más comúnmente se han utilizado.

El OIEA está abordando este problema por conducto del Programa Coordinado de Investigación (PCI) en curso titulado "Estudios de evaluación sobre erosión de los suelos y sedimentación mediante radionucleidos ambientales y sus aplicaciones en medidas para la conservación de los suelos", en el que participan institutos de investigación de diez Estados Miembros. El programa tiene por objeto la elaboración de nuevas metodologías isotópicas para evaluar la tasa de erosión de los suelos en diferentes medios climáticos, medir la producción de sedimentos en las cuencas fluviales y evaluar las tasas de atarquinamiento en lagos naturales y artificiales.

Debido a la introducción de la técnica de la AMS, en el último decenio se han concebido varios métodos nuevos para la determinación cuantitativa de la edad de superficies geomórficas que se basan en la acumulación de radionucleidos cosmogénicos (berilio 10, carbono 14, aluminio 26, cloro 36 y calcio 41) en rocas expuestas en la superficie terrestre. Estos radionucleidos se producen durante las interacciones de los rayos cósmicos con los átomos de los minerales mediante la espalación de alta energía, las reacciones por captura neutrónica y las desintegraciones nucleares inducidas por muones. Los límites efectivos para la datación de los radionucleidos que se producen *in situ* oscilan entre unos cuantos miles y varios millones de años.

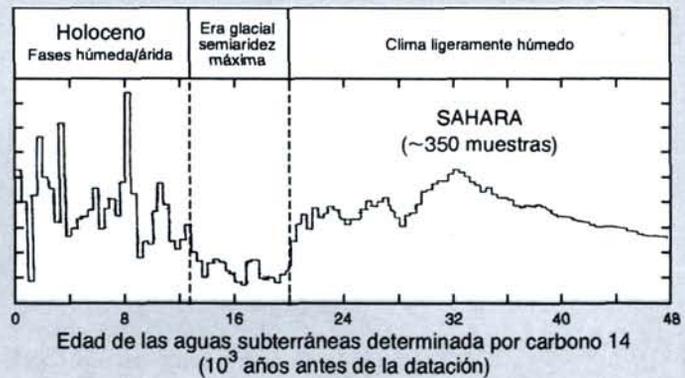
Cronología de variaciones climáticas anteriores

Los radisótopos siguen siendo el instrumento principal que permite disponer de un marco cronológico para las reconstrucciones de cambios climáticos y ambientales ocurridos en el pasado. A tal efecto, se ha empleado una amplia serie de isótopos, según la escala cronológica de los procesos que se estudian y las características de las muestras que se datarán. De ellos, el radiocarbono sigue siendo el que se utiliza con más frecuencia; en los últimos cuatro decenios se han realizado cientos de miles de análisis con radiocarbono en materiales que contienen carbono procedentes de sedimentos lacustres y oceánicos, anillos de crecimiento de los árboles, aguas oceánicas, aguas subterráneas y dióxido de carbono atmosférico.

Además, el método de datación con uranio y torio se está empleando cada vez con mayor frecuencia. Ello sucede, en particular, con su versión moderna, basada en la detección de isótopos de uranio y torio en la muestra con la espectrometría de masas por

Distribución de las frecuencias de edades determinadas por radiocarbono en muestras de aguas subterráneas tomadas en el Sáhara

Desde principios de este siglo se sabe que bajo el mayor desierto del mundo yacen grandes reservas de aguas subterráneas. No obstante, sólo con el inicio de la datación por radiocarbono ha sido posible estimar la edad de estas aguas. En el gráfico se evidencia (a partir de datos procedentes de 350 muestras tomadas en Argelia, Libia, Egipto y el Sáhara meridional) que los acuíferos de África septentrional se recargaron fundamentalmente durante los períodos pluviales del Holoceno y durante los interstadales del último período glacial. El valor mínimo tan manifiesto de la curva de distribución que oscila entre unos 12 y 20 miles de años antes de la datación, corresponde al período de máxima aridez en África septentrional. La estimación de la edad de las aguas subterráneas tiene repercusiones directas en la explotación de los recursos de aguas subterráneas: la ausencia de tritio y las bajas concentraciones de radiocarbono indican que el referido acuífero no se está recargando en la actualidad.



Fuente: Sonntag y col., Radiocarbon, 22 (1987), 871-879

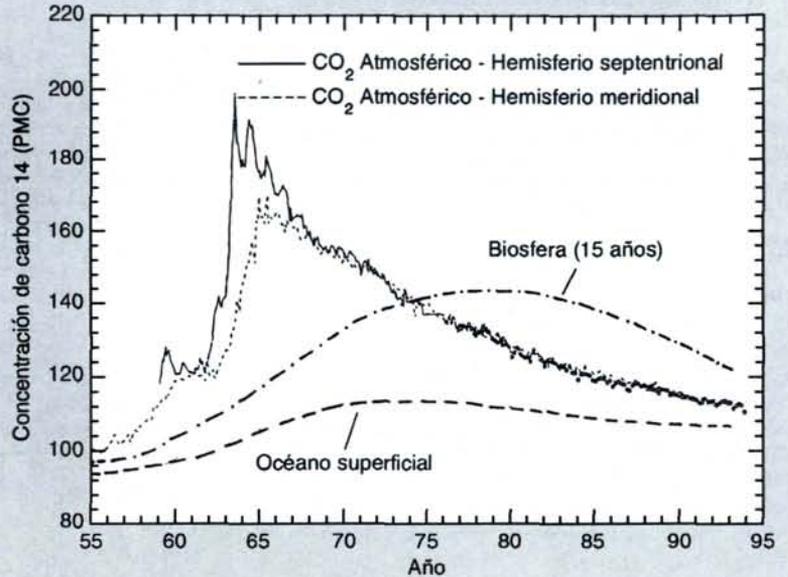
ionización térmica (TIMS) en lugar del conteo de desintegración. Con este método es posible datar materiales geológicos (carbonatos, sedimentos) de unos 350 000 años. Los esfuerzos por reconstruir los cambios ocurridos en anteriores períodos en el contenido del carbono 14 atmosférico, vinculados a variaciones en la tasa de producción de este radisótopo y a cambios en la circulación oceánica, son particularmente importantes para las reconstrucciones de alta resolución de los cambios climáticos ocurridos durante la última desglaciación.

Búsqueda del "sumidero desconocido"

Los ensayos de bombas nucleares en la atmósfera originaron un "impulso" bien definido de concentración de carbono 14 en el dióxido de carbono atmosférico. (Véase el gráfico de la página siguiente.) Este impulso puede utilizarse como trazador del ciclo mundial del carbono, de manera similar a como se está usando el tritio producido en ensayos de bombas nucleares en los estudios del ciclo mundial del agua. La bolsa atmosférica de carbono 14 producido en los mencionados ensayos se está vaciando gradualmente y el exceso de actividad del carbono 14 está penetrando la biosfera y el sistema de carbonatos oceánicos. Mediante la observación de la evolución cronológica del carbono 14 en las correspondientes bolsas (atmósfera, biosfera,

Cambios en la concentración de carbono 14 en el CO₂ atmosférico debidos a los ensayos de bombas nucleares

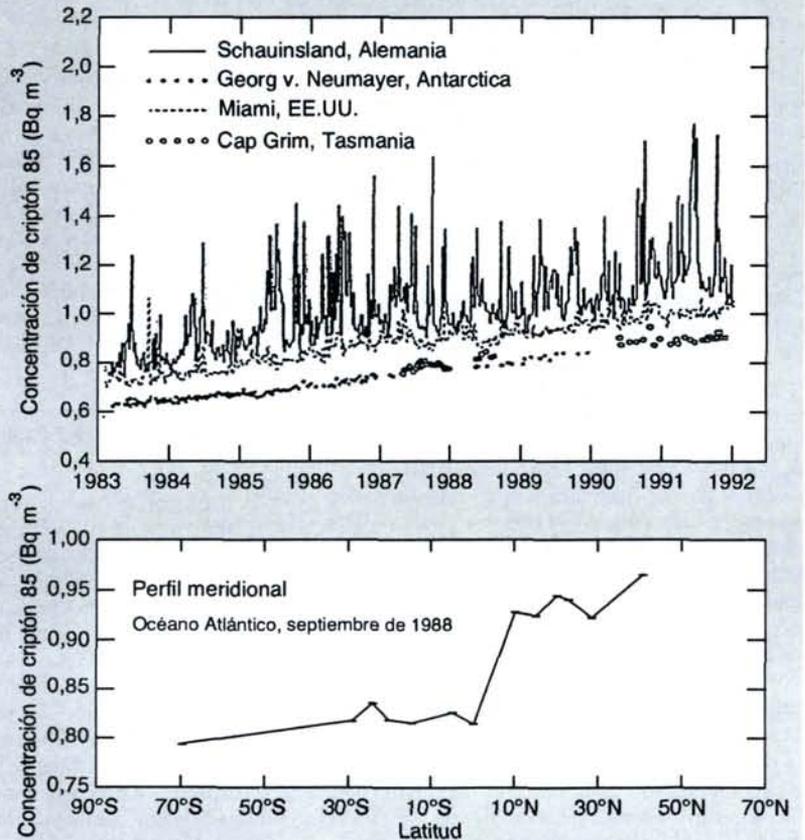
Se realizan observaciones a largo plazo del carbono 14 en varios puntos de ambos hemisferios (Schauinsland, Alemania; Izaña, Tenerife, España; Cape Grim, Tasmania; Mérida, Venezuela; Neumayer Station, Antártida). Poco después del tratado de 1962 sobre prohibición de ensayos nucleares en la atmósfera, el nivel de carbono 14 en el hemisferio septentrional era dos veces mayor que el nivel natural definido en el presente recuadro como 100%. La reducción del carbono 14 después de 1963 obedece a la gran incorporación en los océanos y la biosfera del carbono 14 producido por ensayos de bombas nucleares. La línea discontinua indica la respuesta prevista de la biosfera ante el incremento del carbono 14 en el dióxido de carbono atmosférico, suponiendo que la biosfera es una bolsa bien mezclada con un tiempo de renovación del carbono igual a 15 años. La biosfera terrestre es probablemente la bolsa más compleja del ciclo mundial del carbono. Las observaciones del carbono 14 atmosférico ayudan a evaluar las características y la dinámica de esta bolsa.



Fuente: Hessheimer y col. *Nature*, 370 (1994), 201-203; Levin, I., Thesis B, University of Heidelberg (1994).

Concentración de criptón 85 en la troposfera

El criptón 85 (período de semidesintegración de 10,76 años) es un producto de fisión y se libera a la atmósfera durante la reelaboración del combustible nuclear gastado. Las concentraciones de criptón 85 en el hemisferio meridional son sistemáticamente menores debido a que las principales plantas de reelaboración se encuentran en el hemisferio septentrional y parte del criptón 85 liberado en las latitudes septentrionales medias se desintegra antes de que pueda ser transportada al hemisferio meridional. **Gráfico inferior:** Los perfiles meridionales de las concentraciones de criptón 85 en la troposfera se usan para calibrar los parámetros físicos de los modelos mundiales de circulación atmosférica. Como gas inerte, el criptón 85 es además un magnífico trazador para aguas subterráneas jóvenes.



Fuente: Weiss y col. STI/PUB/859, OIEA (1992); W. Weiss, Fort. Strahl. Umwelt. Radioec. (1993).

océano), se puede conocer más sobre las tasas de la transferencia de carbono entre estas bolsas, en particular entre la atmósfera y el océano.

La interpretación cuantitativa del ciclo mundial del carbono tiene suma importancia dado que el dióxido de carbono es el principal gas de efecto invernadero, que aporta el 50% aproximadamente al supuesto calentamiento de la Tierra.

El principal problema para equilibrar el ciclo mundial del carbono es el "sumidero desconocido" del CO₂ que cada año se libera a la atmósfera debido a la combustión de combustibles fósiles, que asciende a unas seis gigatoneladas. Gracias a observaciones atmosféricas del CO₂ se sabe que alrededor del 50% de esta cantidad, es decir, cerca de tres gigatoneladas, permanece en la atmósfera. Por otra parte, los modelos acoplados de circulación general en la atmósfera y el océano disponibles, pronostican que el océano mundial será capaz de incorporar sólo unas dos gigatoneladas anuales. Por tanto, el actual desequilibrio equivale a una gigatonelada aproximadamente. En realidad, este "sumidero desconocido" es dos veces mayor debido a las fuentes de la biosfera asociadas a los cambios en la explotación de las tierras, que se estima sean del orden de una gigatonelada anual.

Los resultados de las observaciones de ¹⁴CO₂ atmosférico proporcionan un excelente instrumento para limitar el ciclo mundial del carbono. De hecho, en un estudio publicado recientemente, basado en los análisis de concentraciones de carbono 14 en la troposfera, se ha indicado que los océanos absorben alrededor de 25% menos de CO₂ antropógeno que lo que anteriormente se había supuesto. Por consiguiente, es necesario proseguir la búsqueda de otro sumidero de carbono, no considerado en el actual balance global de carbono.

Mejoramiento de los modelos de transporte atmosférico

El criptón 85 se libera a la atmósfera durante la reelaboración del combustible nuclear gastado. Las principales plantas de reelaboración funcionan en la Federación de Rusia, América del Norte y Europa, y se encuentran en la zona comprendida entre los 30° y los 50° de latitud norte. Los actuales niveles de criptón 85 de la atmósfera (alrededor de un Bq/m³) pueden medirse con facilidad utilizando la técnica de conteo de desintegración. Como el criptón 85 es químicamente inerte y el único proceso de eliminación importante es la desintegración radiactiva, se considera un trazador atmosférico muy eficaz.

La interpretación cuantitativa de la circulación atmosférica global es indispensable para las estimaciones significativas de los balances globales de los contaminantes atmosféricos y sus repercusiones climáticas. En particular, es preciso describir correctamente dos aspectos de esta circulación: 1) el intercambio de aire en gran escala entre los hemisferios septentrional y meridional, y 2) la intensidad de la mezcla vertical. Debido a la complejidad de los procesos que comprenden, es esencial aplicar modelos numéricos en esta esfera. Los más avanzados de entre ellos, los denominados

modelos de circulación general (GCM), también se usan para predecir las consecuencias climáticas de las emisiones de gases de efecto invernadero. La distribución mundial del criptón 85 puede utilizarse para ajustar los parámetros de modelos del transporte a larga distancia y la mezcla entre los hemisferios septentrional y meridional. (Véase el gráfico de la página anterior.) Otros procesos de importancia, como la mezcla convectiva dentro de la troposfera, particularmente en regiones tropicales y sobre zonas continentales del hemisferio septentrional, no se pueden ajustar a los parámetros de la distribución del criptón 85 en la atmósfera porque las escalas cronológicas que intervienen son mucho más cortas. Otros trazadores, como el radón 222, pueden utilizarse con estos fines.

Perspectivas

No se puede recalcar demasiado la repercusión del descubrimiento de la radiactividad para las ciencias geológicas. Los radisótopos naturales se han venido utilizando durante mucho tiempo como una importante (y a menudo la única) fuente de información sobre la cronología de los procesos geológicos, la historia de los meteoritos y los rayos cósmicos, la evolución del ser humano y la dinámica de los sistemas biológicos. Los radisótopos artificiales, aunque considerados por el público como una amenaza para el medio ambiente humano, han resultado ser excelentes trazadores globales. Nos permiten comprender mejor el ciclo del agua y aprender más sobre los ciclos biogeoquímicos de importantes elementos sustentadores de la vida como el carbono, el nitrógeno o el azufre.

A medida que nos acercamos al próximo siglo, los problemas relativos a los cambios mundiales del medio ambiente tienen más prioridad en los programas de muchas organizaciones internacionales, incluido el sistema de las Naciones Unidas. La evolución hidroclimática a corto plazo de la Tierra y la influencia del ser humano sobre el clima, ya se vislumbran como grandes desafíos y con toda seguridad se convertirán en una de las tareas más importantes que tendrán que asumir los científicos del próximo siglo.

La cuantificación de la posible respuesta del clima terrestre a las tensiones generadas por el hombre es de vital importancia, en particular para la zona intertropical. Esta región, ocupada en su mayor parte por países en desarrollo, está sujeta a variaciones hidroclimáticas extremas, como sequías e inundaciones. Por consiguiente, las predicciones de esos sucesos a corto plazo son uno de los principales requisitos para el desarrollo sostenible de la región. Las técnicas científicas basadas en el empleo de isótopos radiactivos y estables tienen una función importante que desempeñar en la explicación de los mecanismos y procesos que determinan la ininterrumpida evolución hidroclimática del planeta.