

CONTRIBUCION DE LOS ISOTOPOS ESTABLES A LA GESTION DE RESIDUOS RADIACTIVOS DE ALTA ACTIVIDAD

E. Reyes *

RESUMEN

La Geoquímica de isótopos estables, mediante el estudio de las variaciones de los valores $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{34}\text{S}$ de las distintas fases que se encuentran en la formación geológica seleccionada como huésped de un almacenamiento definitivo de residuos radiactivos, puede contribuir no sólo a la obtención de datos geotermométricos sino, también, al conocimiento del tipo de aguas que han intervenido en cada caso concreto. Además, a partir del estudio de rellenos fisurales y alteraciones se obtiene información sobre etapas de hidrotermalismo que han podido afectar al macizo rocoso, datos paleoclimáticos y, sobre todo, paleohidrológicos que son de vital utilidad en la evaluación de un emplazamiento.

Los estudios isotópicos sobre los materiales circundantes pueden dar informaciones valiosísimas sobre parámetros ambientales y paleoclimáticos. En concreto, la composición isotópica de arcillas y carbonatos lacustres y edáficos, expresan datos sobre antiguos ambientes. Los espeleotemas suministran informaciones paleotermométricas precisas, y el estudio de otros materiales, tales como vegetación, restos fósiles fosfatados, etc., pueden complementar el cuadro de la información medioambiental del emplazamiento.

Palabras clave: *Isótopos estables, residuos radiactivos.*

ABSTRACT

Stable Isotope Geochemistry can contribute by means of the study of variations of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{34}\text{S}$ values in the different phases present in the geologic formation selected as definitive radioactive waste repository, not only to the obtention of geothermometric data, but also to the knowledge of the groundwaters present in the formation. Moreover, the study of fissure fillings yield information on possible past hydrothermal events altering the host rock, paleoclimatic data, and, above all, paleohydrologic data, which are quite necessary for a repository evaluation.

Isotopic studies of surrounding materials can give information on paleoclimatic and environmental parameters. Specifically, isotopic composition of clays, and lacustrine and edaphic carbonates yield data on ancient environment. The speleothems would give accurate paleothermometric information, and the study of other materials such as vegetation, phosphate fossils, etc., would complement the repository environmental information.

Key words: *Stable isotopes, radioactive waste.*

Introducción

Para el establecimiento de un almacenamiento definitivo de residuos radiactivos se han estudiado muchas posibilidades, desde el almacenamiento bajo los casquetes polares o el enterramiento a elevadas profundidades bajo el lecho marino a su envío al espacio exterior. No obstante, el sistema que hasta la fecha ha parecido más adecuado a la comunidad científica internacional es el almacenamiento en forma-

ciones geológicas estables. Entre las rocas que se han considerado más favorables se encuentran los granitos, sales, arcillas, esquistos y tobas, siendo, por el momento, los tres primeros los más estudiados.

De todas formas, cualquiera que sea la formación geológica elegida es necesario asegurarse que dicha formación y su entorno garanticen el confinamiento de los residuos durante, al menos, el tiempo necesario para que su eventual retorno a la biosfera no suponga un riesgo para el hombre o el medio ambien-

* Estación Experimental de Zaidin (CSIC), Prof. Albareda, 1, 18008 Granada.

te. Para cumplir este objetivo con un cierto grado de fiabilidad, será necesario conocer en profundidad: a) las características litológicas y fisicoquímicas de la roca huésped; b) las características hidrogeológicas, tectónicas y sísmicas del entorno geológico tanto en profundidad como en superficie, y c) las tendencias y evolución de las condiciones climáticas, hidrológicas y morfológicas del área.

Es precisamente en estos tres apartados donde la aplicación de la Geoquímica de isótopos estables adquiere una especial relevancia. La importancia del conocimiento exhaustivo de la roca huésped ha llevado a la comunidad internacional a realizar minuciosos estudios (tectónicos, geofísicos, geoquímicos, hidrológicos, etc.) de las litologías más favorables dentro de cada país. Para ello se han construido una serie de laboratorios de experimentación sobre éstas: arcillas (MOL, Bélgica), granitos (CLIMAX, EE.UU.; STRIPA, ÄSPÖ, Suecia; GRIMSEL, Suiza; WINNIPEG, Canadá; FANAY-AUGERES, Francia), sales (ASSE, Alemania) y basaltos (HANDFORD, EE.UU.); en los que se estudia el comportamiento de las rocas sometidas a una serie de fenómenos similares a los que soportarían las rocas huésped en el almacenamiento de este tipo de residuos. Todas estas investigaciones requieren el apoyo de diversas disciplinas y tecnologías que aporten la máxima información sobre el estado actual de la roca que albergará los residuos radiactivos, así como de su historia y posibles tendencias futuras.

Una vez elegidos los lugares más idóneos para el almacenamiento definitivo, en los que se deben intensificar los estudios de detalle, un objetivo básico será la caracterización geoquímica precisa del emplazamiento. La geoquímica de isótopos estables, basándose principalmente en los valores $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{34}\text{S}$ de las distintas fases que se encuentran en la formación geológica objeto de estudio, contribuye no sólo a determinar las características fisicoquímicas de las soluciones implicadas: T, $f\text{O}_2$ y pH, sino a conocer el tipo de aguas que han intervenido en cada caso. Además, a partir del estudio de rellenos fisurales y alteraciones se obtiene información sobre etapas de hidrotermalismo que han podido afectar al macizo rocoso, datos paleoclimáticos y sobre todo datos paleohidrogeológicos, que son de vital utilidad en la evaluación de un emplazamiento.

Quizá se podrían destacar los estudios hidrogeológicos y paleohidrogeológicos. De hecho el papel de los isótopos estables en el esclarecimiento del origen de las aguas subterráneas ha sido, y sigue siendo, el foco de los principales estudios sobre la caracterización de los ambientes geológicos. Por otra parte la evaluación de las características hidrológicas de un almacenamiento potencial de residuos radiactivos re-

quiere, además, estimaciones sobre la hidrología que pueda afectarlo en los próximos centenares o miles de años. Así, la reconstrucción del clima e hidrología del pasado ofrece un buen camino de predicción de la hidrología futura ya que a este respecto los cambios climáticos juegan un importante papel puesto que van a determinar, entre otras cosas, la cantidad y tipo de precipitaciones que recibe un sistema, y cómo se almacenan estas aguas. Por todo ello podemos asegurar, como decían Chapman y McEwen (1992), que una reconstrucción paleohidrogeológica completa de la evolución en el pasado de un lugar concreto, puede ser la mejor y posiblemente la única base convincente para evaluar la idoneidad de un futuro almacenamiento de residuos radiactivos.

Por tanto, podemos decir que, en general, los estudios de isótopos estables inciden en dos aspectos fundamentales. Por una parte, sobre aspectos relacionados directamente con el macizo rocoso donde se sitúa el emplazamiento y, por supuesto, sobre las aguas relacionadas con él, y por otra, sobre los materiales circundantes.

Estudios sobre la roca huésped

En el primero de los casos (fig. 1) las aguas que, de alguna manera, puedan incidir sobre la formación rocosa, aguas meteóricas, marinas, magmáticas o metamórficas, llevan impresas, en sus respectivas señales isotópicas, informaciones sobre la temperatura, latitud, altitud, y distancia a la costa a las que se produjeron, así como huellas de épocas glaciales o composiciones isotópicas de las rocas de procedencia. Cualquiera de estas aguas al incidir sobre la formación rocosa la alteran y provocan la formación de rellenos fisurales (carbonatos, arcillas, cuarzo, etc.), que a su vez llevan marcadas las señales isotópicas de sus aguas de formación o alteración.

La aplicación de la Geoquímica de isótopos estables, tanto sobre los rellenos fisurales como sobre la roca alterada, pueden darnos valiosísimas informaciones sobre propiedades físicas y fisicoquímicas de las soluciones, razones agua/roca, paleohidrogeología, clima, temperaturas de formación, tipología de las fracturas, vegetación imperante, etc.

A este respecto se han hecho interesantes estudios en análogos naturales de diversas partes del mundo, tanto hidrogeológicos como de rellenos fisurales (principalmente carbonatos), y de caracterización de rocas encajantes. A continuación se citan, aunque sólo sea muy brevemente, un ejemplo de cada uno de estos tres aspectos:

En Stripa (Suecia) se ha hecho un amplio uso de la Geoquímica isotópica tanto para estudios hidro-

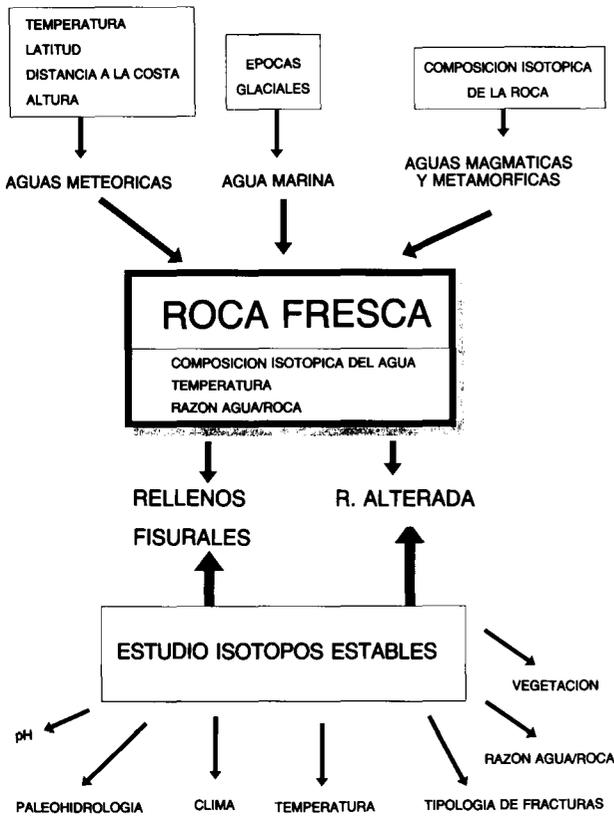


Fig. 1.—Aplicaciones de la Geoquímica de isótopos estables en estudios sobre la roca huésped de un repositorio.

geológicos como para la caracterización geoquímica de los materiales. Diversos autores han estudiado la composición isotópica de los acuíferos del plutón granítico de Stripa (Fritz *et al.*, 1979, 1989; Moser *et al.*, 1989). Las determinaciones de ^2H , ^{18}O y ^3H demuestran que los acuíferos de Stripa son de origen meteórico, y no han estado afectados por fraccionamientos isotópicos secundarios (evaporación o intercambio isotópico). Los valores $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ oscilan entre -8 y -15‰ y entre -60 y -110‰ , respectivamente. En aguas superficiales se encuentran valores muy heterogéneos, en donde se aprecia una clara influencia de las variaciones estacionales. A profundidades de 300-400 m los valores ya corresponden a la media anual, $\delta^{18}\text{O} = -11/-12\text{‰}$ (fig. 2). Las aguas subterráneas más profundas tienen valores más bajos en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ que los más superficiales y recientes. Estos valores indican que los acuíferos profundos están constituidos por aguas que se han recargado hace miles de años, en condiciones climáticas más frías, probablemente en una época inmediatamente después de la última glaciación, hace más de 10.000 años.

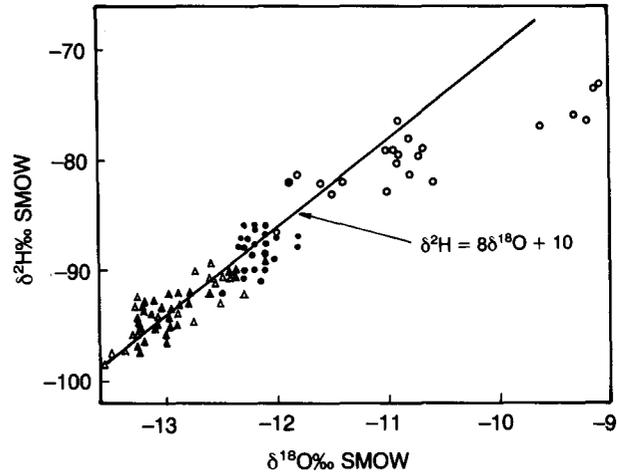


Fig. 2.—Composición isotópica de aguas de Stripa (Suecia). (○) Aguas superficiales, (●) Aguas de sondeos a 330 m de profundidad, (△) y (▲) Aguas tomadas a distintos intervalos en sondeos con una profundidad máxima de 822 m (Moser *et al.*, 1989).

Fritz *et al.* (1989) estudiaron la composición isotópica del carbono inorgánico disuelto en estas aguas subterráneas. La diversidad de valores de $\delta^{13}\text{C}$ indica que existen fuentes inorgánicas y orgánicas de carbono. Las aguas más superficiales están muy influenciadas por el CO_2 del suelo, con valores $\delta^{13}\text{C} = -23\text{‰}$, y como, además, las aguas más superficiales tienen un pH = 5 domina la disolución de calcita. A profundidades cercanas a los 100 m se alcanza el punto de saturación de la calcita, y a mayores profundidades hay un ambiente geoquímico más salino en el que la mayor concentración de Ca unida a pH cercanos a 10 provocan la precipitación de calcita. Sobre los 900 m se observa una caída en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ que llegan hasta -35‰ , esto indica que al menos estas aguas reciben carbono orgánico (no necesariamente biogénico superficial), su fuente no se conoce muy bien, pero es importante señalar que se han encontrado aguas con altas cantidades de bacterias anaerobias.

Entre los muchos estudios de rellenos fisurales que pueden encontrarse en la literatura se ha seleccionado el realizado por Quade y Cerling (1990) en Yucca Mountain (Nevada). Una de las razones usadas para justificar la localización de un emplazamiento de residuos radiactivos de alta actividad en Yucca, es que la zona de ubicación de estos residuos permanecerá en la zona no saturada (lejos del nivel freático de las aguas) durante cientos de miles de años, incluso si se produjeran cambios climáticos. Sin embargo, la presencia de rellenos carbonatados y silíceos en diversas fracturas que rodean a Yucca Mountain, puso en duda la idoneidad del emplazamiento. La más conocida y controvertida de estas fracturas es la llamada

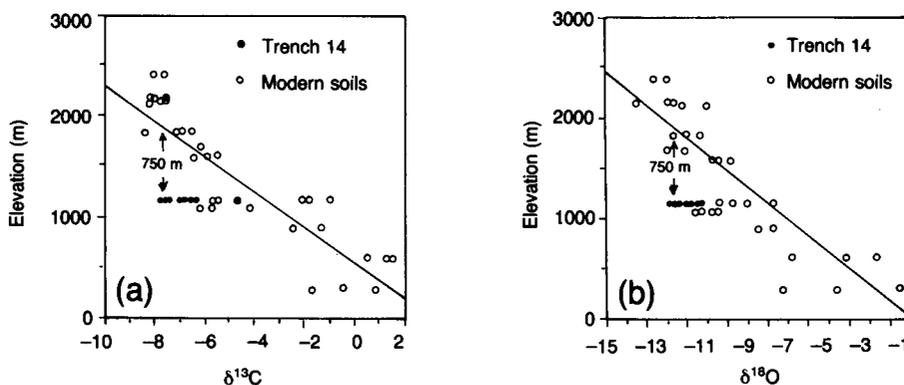


Fig. 3.—a) Regresión lineal entre $\delta^{13}\text{C}$ y la altitud de carbonatos edáficos desarrollados en suelos modernos sobre un substrato volcánico. b) id. para $\delta^{18}\text{O}$ (Quade y Cerling, 1990).

Trench 14, debido a su espesor y a la naturaleza del relleno, similar a travertinos asociados a surgencias, a esto se le suma la edad cuaternaria de algunos de sus carbonatos. Si se confirmara un origen de surgencia implicaría que el nivel freático en una época glacial había llegado a la altitud de la fractura Trench 14, que está a unos 150 m por encima del nivel propuesto como almacenamiento, y que se encuentra a 400 m sobre el freático actual. Por tanto, durante un futuro período glacial el freático podría alcanzar la zona de ubicación de los residuos radiactivos, provocando la dispersión de éstos. Otra hipótesis alternativa, sería que el relleno de la fractura tuviera un origen edáfico formándose durante cientos de miles de años, en cuyo caso no afectaría a las condiciones del emplazamiento.

Todas estas circunstancias han conducido a realizar minuciosos estudios para establecer el origen de los rellenos de la fractura. Para resolver este problema, se ha estudiado la composición isotópica ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) de suelos modernos situados a distintas altitudes, así como depósitos carbonatados procedentes de surgencias. Se observó que tanto los valores de $\delta^{13}\text{C}$ como de $\delta^{18}\text{O}$ de los carbonatos edáficos cambia con la altitud como se puede observar en la figura 3 (a y b), y que la composición isotópica, tanto para oxígeno como para carbono, de la fractura Trench 14 estaría de acuerdo con un origen edáfico, aunque no es concordante con la vegetación que se encuentra en sus alrededores, sino con la correspondiente a unos 750 m más de altitud (evidencias fósiles indican que las zonas de vegetación se desplazaron unos 1.000 m de altitud durante la última glaciación hace 16.000-19.000 años). Así mismo, se observa que los valores isotópicos de la fractura Trench 14 son distintos de los carbonatos precipitados en surgencias (fig. 4), estos últimos valores se alejarían más en una época glacial en la que las aguas de los freáticos se empobrecerían entre un 1,5 y un 2 ‰ en ^{18}O .

En el caso de la utilización de domos salinos como roca huésped de futuros emplazamientos definitivos de residuos radiactivos de alta actividad es importantísimo conocer, entre otros parámetros, la velocidad de disolución en el techo de estas formaciones así como predecir su comportamiento en el futuro. Para ello es básico el conocimiento de las condiciones que prevalecieron durante su formación, así como el tipo, la edad, y los modelos de circulación de aguas superficiales y profundas que puedan afectarlos.

A este respecto pueden suministrar amplia infor-

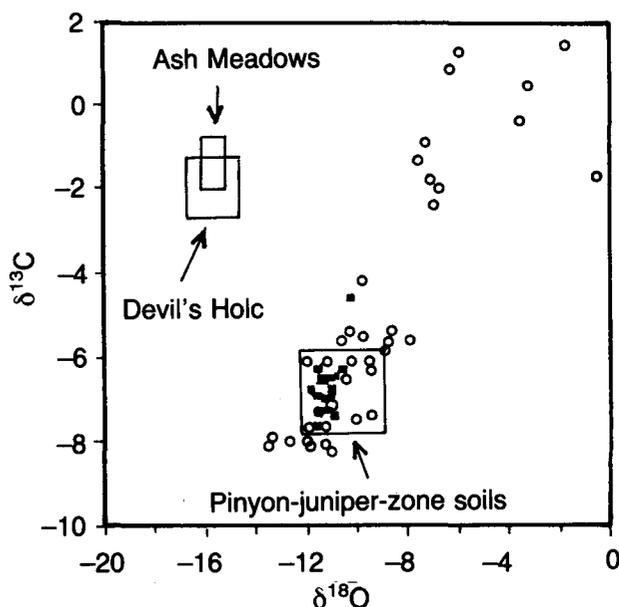


Fig. 4.—Composición isotópica de carbonatos procedentes de suelos del Holoceno (■), Trench 14 (○), y surgencias de Ash Meadows y Devil's Hole (Quade y Cerling, 1990).

mación los estudios de las señales isotópicas de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, en aguas de infiltración y cristalización de sulfatos; $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{34}\text{S}$ en sulfatos, así como las determinaciones de ^3H en aguas y $\delta^{13}\text{C}$ y ^{14}C en carbonatos disueltos.

Un caso que puede servir como ejemplo de este tipo de investigaciones, son los estudios realizados sobre el domo salino de Gorleben en Alemania. Herbert y Heuss (1992) a partir de las aguas de cristalización de sulfatos (fig. 5), calcularon la composición isotópica de las aguas originales, y a partir de ellas las temperaturas ambientales en la época de formación (fig. 6), poniéndose de manifiesto que, entre todos los tipos de yesos que cubren el domo, sólo los yesos brechiformes corresponden a un período de glaciación.

Estudios sobre materiales circundantes

Los estudios isotópicos sobre los materiales circundantes de la formación rocosa huésped de un almacenamiento, también pueden darnos informaciones valiosísimas sobre parámetros ambientales y paleoclimáticos. En la figura 7 se muestran algunos de los materiales sobre los que pueden incidir los estudios isotópicos. Así los sedimentos lacustres, carbonatos, arcillas, fósiles de moluscos, etc., pueden darnos informaciones detalladas de la evolución climática en estas cuencas, a este respecto también serían de gran interés los fósiles fluviales (ostrácodos) que ampliarían los conocimientos sobre la evolución de las redes de drenaje. En concreto, la composición isotópi-

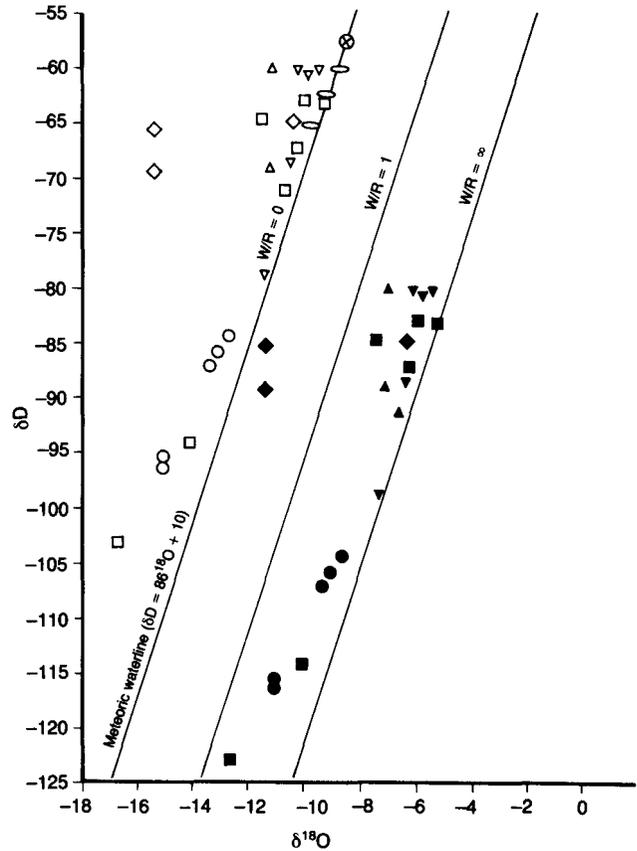


Fig. 5.—Composición isotópica de aguas de cristalización de sulfatos (símbolos negros) y de las aguas en equilibrio con ellos (símbolos blancos) (Herbert y Heuss, 1992).

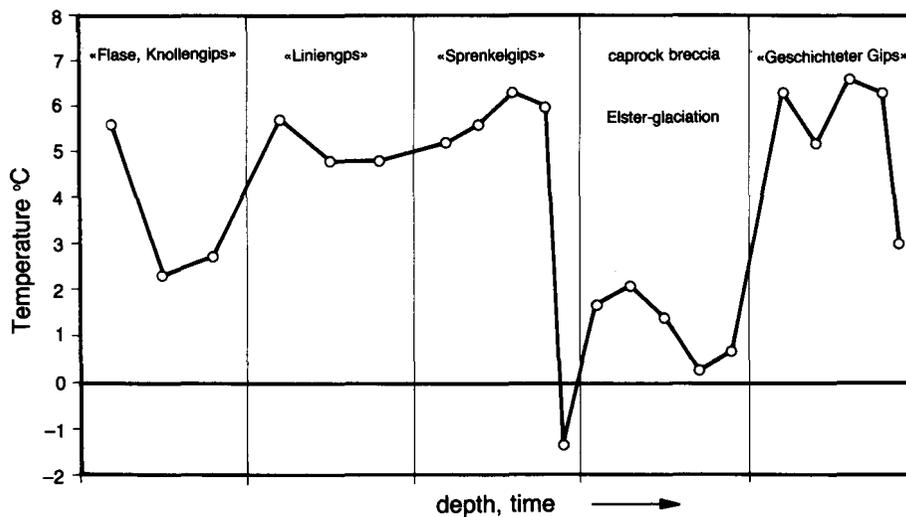


Fig. 6.—Temperaturas de formación de los yesos de Salt Dome Gorleben (Herbert y Heuss, 1992).

ca de conchas fósiles y calizas de agua dulce expresan datos sobre antiguos ambientes. Para lo cual podría usarse la ecuación:

$$T^{\circ} C = 16,9 - 4,2 (\delta_c - \delta_w) + 0,13 (\delta_c - \delta_w)^2$$

(Craig, 1965)

que relaciona la composición isotópica del carbonato precipitado en condiciones de equilibrio con la temperatura y la composición isotópica del agua original. Dicha ecuación sólo es utilizable cuando se conoce el último parámetro (δ_w) o bien puede estimarse con una probabilidad razonable. Antiguamente era una práctica común el asumir que el $\delta^{18}O$ del agua del mar era constante a lo largo de los tiempos geológicos, y que era próximo a cero en la escala V-SMOW (excepto en época de glaciaciones). Pero la composición isotópica de los sistemas de agua dulce presentan una gran variabilidad como resultado del elevado fraccionamiento de los isótopos del oxígeno en el ciclo de las aguas meteóricas. Por lo tanto, la composición isotópica del oxígeno en los sistemas de agua dulce no es aplicable, en general, a determinaciones de paleotemperaturas, aunque pueden ser muy útiles para obtener datos de gran importancia paleoclimatológica.

Los minerales de arcilla neoformados también aportan información para un correcto registro paleoclimático. En concreto, las ecuaciones que relacionan la composición isotópica del oxígeno y del hidró-

geno de una esmectita con su temperatura de formación son respectivamente:

$$1.000 \ln \alpha_{ox} = 2,67 (10^6 T^{-2}) - 4,33$$

(Yeh y Savin, 1977)

$$1.000 \ln \alpha_{hy} = -19,6 (10^3 T^{-1}) + 25 \text{ (Yeh, 1980)}$$

Las arcillas formadas durante procesos de meteorización alcanzan el equilibrio isotópico con el ambiente en el que se han formado, por lo tanto, al igual que en las aguas meteóricas, existe una relación entre la composición isotópica del hidrógeno y del oxígeno de las arcillas y la temperatura de formación. Savin y Epstein (1970) encuentran la siguiente ecuación, para el equilibrio arcilla-agua:

$$\delta^2H = 8 (\alpha_{hy}/\alpha_{ox}) \delta^{18}O + 1.000 (8(\alpha_{hy}/\alpha_{ox}) - (6,99\alpha_{hy} - 1))$$

En la figura 8 se han representado dos de estas rectas teóricas para caolinita y gibsita así como las composiciones isotópicas de caolinitas, gibsitas e hidróxidos amorfos formados a bajas temperaturas. Como se puede observar los datos caen todos bastante próximos a dichas rectas lo cual sugiere que, en efecto, las muestras o se han formado en equilibrio con aguas meteóricas o bien, tras su formación, han sufrido intercambios isotópicos hasta alcanzar el equilibrio con dichas aguas. Además han debido equili-

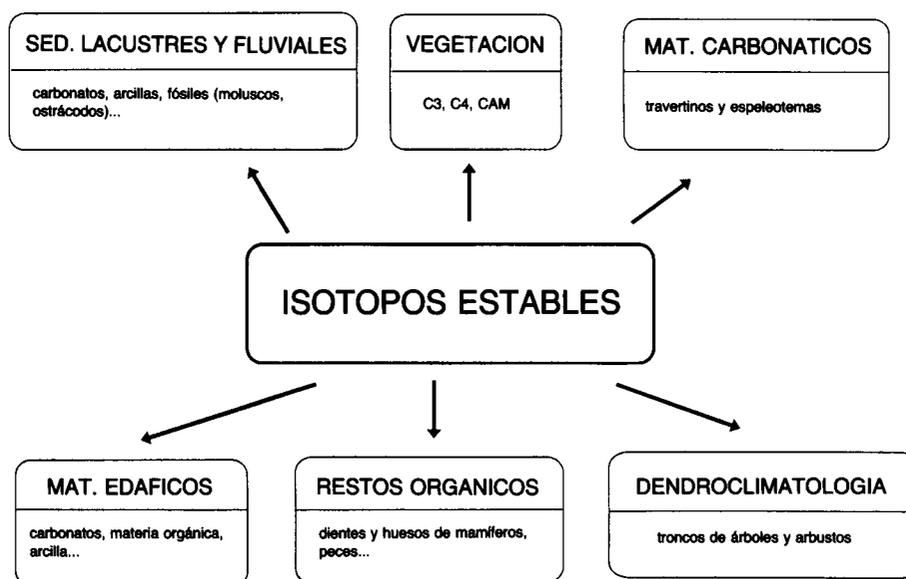


Fig. 7.—Aplicaciones de la geoquímica de isótopos estables a estudios sobre materiales circundantes de un repositorio.

brarse con agua dentro de un margen de temperaturas muy estrecho.

En la figura 9, se han representado las composiciones isotópicas de los minerales de la arcilla e hidróxidos de suelos cuaternarios analizados por Lawrence y Taylor (1971). A pesar de la compleja mineralogía de los productos de meteorización y de que las razones entre material meteorizado y productos inalterados de la roca original eran muy variables, se

pueden sacar conclusiones muy interesantes a partir de los datos isotópicos.

La estrecha relación que existe entre la composición isotópica del suelo y la de las aguas meteóricas de la región correspondiente, demuestra que es la composición isotópica de las aguas meteóricas la que determina la composición isotópica de los productos de meteorización y no la composición de la roca original. Durante la formación de los productos de me-

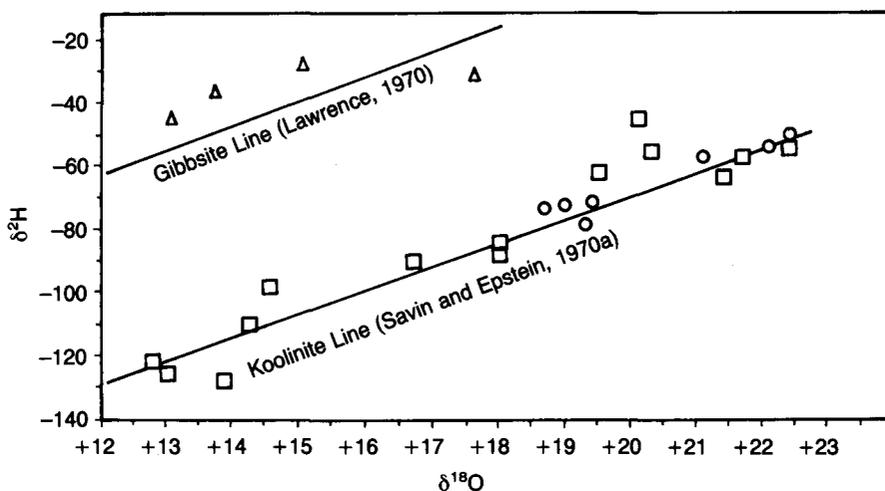


Fig. 8.—Composición isotópica de caolinitas y gibsitas formadas en condiciones superficiales (Savin, 1980).

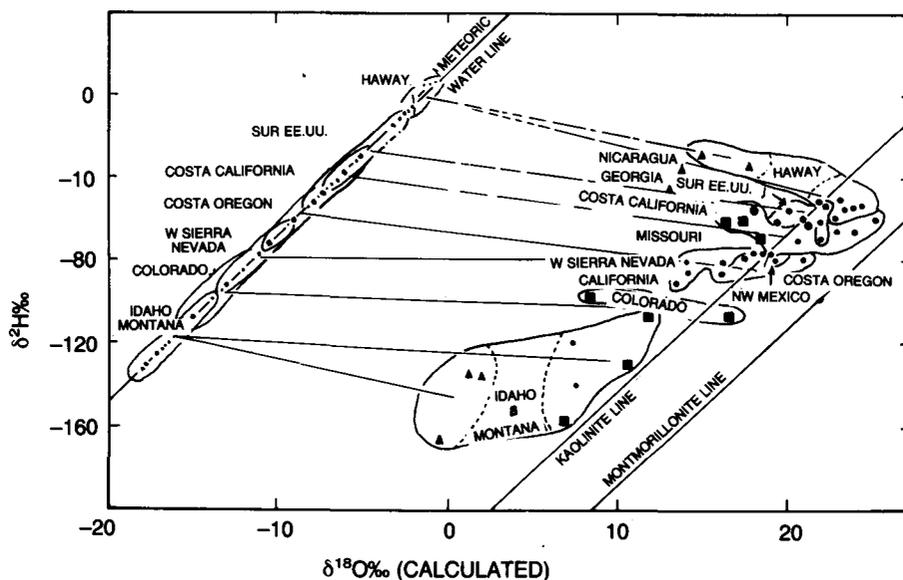


Fig. 9.—Composición isotópica de minerales de la arcilla e hidróxidos procedentes de suelos cuaternarios de EE.UU., así como de las aguas meteóricas de las localidades correspondientes (Lawrence y Taylor, 1971).

teorización se ha alcanzado el equilibrio isotópico con el agua ambiental, permaneciendo los materiales residuales inalterados, por ejemplo: el cuarzo mantiene la composición isotópica que tenía en la roca original.

Los sedimentos continentales travertínicos permiten registros paleoclimáticos bastante precisos, sobre todo los espeleotemas formados en cuevas kársticas. La gran ventaja que tienen dichas cuevas como depositarias de información paleoambiental, es la gran estabilidad de las condiciones climáticas dentro de ellas, con variaciones de temperatura del orden de la décima de grado de una estación a otra y con un valor que es muy próximo a la media anual del exterior. Por otra parte el grado de humedad es también constante, generalmente del 100 %.

En estas condiciones los espeleotemas pueden formarse en equilibrio isotópico con las aguas de percolación, como la composición isotópica de estas aguas refleja los valores medios de las aguas de lluvia de la zona, deben guardar la relación de Dansgaard (1964): $d(\delta^{18}\text{O})/dT = 0,69 \text{‰} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, y en consecuencia, el $\delta^{18}\text{O}$ de los espeleotemas variaría con la temperatura de acuerdo con el valor anteriormente indicado. No obstante, también habría que tener en cuenta la dependencia del factor de fraccionamiento carbonato-agua (α_{c-w}) con la temperatura, que sería de $-0,24 \text{‰} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, la suma de estos dos efectos daría como resultado que, en los espeleotemas, $d(\delta^{18}\text{O})/dT = +0,45 \text{‰} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Duplessy *et al.*, 1970).

Estudios sobre materiales biológicos

Estudios sobre la vegetación, plantas C_4 y C_3 , suministran una información necesaria para la correcta interpretación de las señales isotópicas tanto de los carbonatos fisurales como de los carbonatos edáficos, ya que la composición isotópica de los carbonatos formados en un suelo, o por aguas que percolan a través de un suelo variará dependiendo del tipo de vegetación predominante, puesto que el CO_2 procedente de plantas C_4 es más pesado que el procedente de plantas C_3 , con valores $\delta^{13}\text{C}$ comprendidos entre -12‰ a -14‰ y -25‰ a -28‰ respectivamente (Deines, 1980).

La dendroclimatología es también de gran utilidad. Muchos autores han dedicado sus esfuerzos a investigar el posible uso de la composición isotópica del oxígeno de la celulosa como termómetro para el establecimiento de registros paleotermométricos del pasado reciente, obteniéndose, en general, buenos resultados. Cabe citar, por ejemplo, los estudios rea-

lizados por Gray y Thompson (1976) sobre coníferas (*Picea Glauca*). Estos autores al correlacionar el $\delta^{18}\text{O}$ de la celulosa con las temperaturas medias anuales encuentran un coeficiente de correlación de 0,97, que presenta un razonable acuerdo con los obtenidos por otros autores en distintas especies (Libby y Pandolfi, 1973).

También se ha podido observar, en numerosos estudios, una buena correlación entre el $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{13}\text{C}$ de las plantas y las temperaturas ambientales. En la figura 10, extraída de Libby (1983), se comparan las razones isotópicas $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{13}\text{C}$ obtenidas a partir de la lignina de un roble alemán con un registro de temperaturas medias invernales de Inglaterra desde el siglo XVII hasta nuestros días. A pesar de no haberse hecho correcciones de humedad para el oxígeno y el hidrógeno, puede observarse una magnífica correlación entre todos estos parámetros, lo cual es una buena confirmación de la validez de las razones isotópicas para el establecimiento de registros paleoclimáticos del pasado reciente.

Los restos orgánicos, fosfatos de huesos y dientes de peces, mamíferos, etc., complementarían este cuadro paleoclimático de la zona en estudio. Longinelli y Nuti en 1973 elaboraron una escala de paleotemperaturas basándose en el fraccionamiento isotópico del oxígeno entre fosfato y agua, utilizando fósiles tanto marinos como de agua dulce, obteniendo la siguiente relación:

$$T^\circ\text{C} = 111,4 - 4,3 (\delta_p - \delta_w)$$

donde δ_p y δ_w son los valores $\delta^{18}\text{O}$ del fosfato de la concha de los organismos y del agua en que vivieron respectivamente.

Esta misma ecuación ha sido empleada por Longinelli y Nuti (1973), entre otros, en estudios sobre composición isotópica de fosfatos procedentes de dientes y espinas de peces. En ambientes estrictamente continentales son muy frecuentes los restos fósiles de dientes y huesos de mamíferos, sobre todo de mурidos y mustélidos. Longinelli (1984) ha demostrado convincentemente la utilidad del uso del $\delta^{18}\text{O}$ de estos restos fósiles para estudios paleohidrológicos, debido, esencialmente, a que el fosfato de estos huesos se ha formado a la temperatura constante del cuerpo (37°C aproximadamente) y adquieren una composición isotópica que es independiente de las temperaturas ambientales. Este tipo de datos suponen una ayuda inestimable para la obtención de valores sobre la composición isotópica de las aguas contemporáneas de estos organismos, y valiéndose de otros materiales, carbonatos, arcillas, etc., de valores de paleotemperaturas en ambientes continentales.

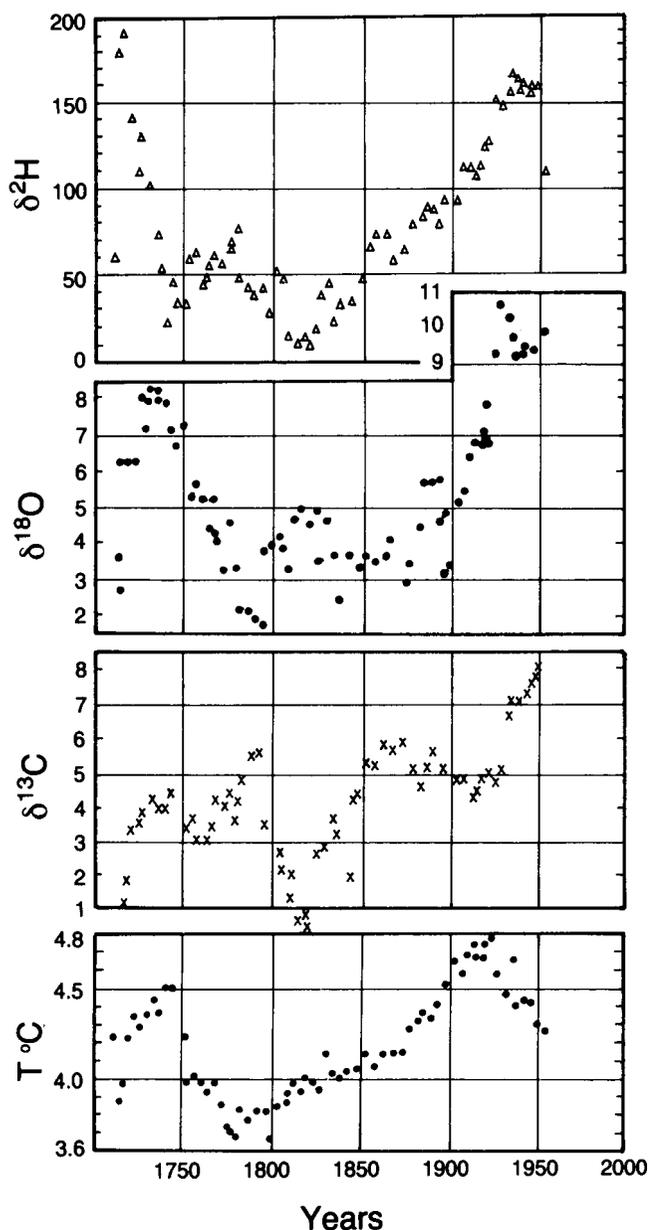


Fig. 10.—Variaciones de los $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ de la celulosa de un roble alemán, y de las temperaturas invernales comprendidas entre los años 1700 y 1955 (Libbi, 1983).

Conclusiones

Queda así patente el gran interés que tiene la Geoquímica de isótopos estables en la selección y caracterización de un emplazamiento potencial de residuos radiactivos, ya que puede suministrar importantísimas informaciones no sólo sobre la roca huésped sino también datos sobre los tipos de aguas que la pue-

dan afectar, etapas hidrotermales, datos paleoclimáticos y paleohidrogeológicos, que son de vital importancia para obtener estimaciones sobre la evolución hidrogeológica futura, imprescindibles para conocer la capacidad de confinamiento de estas formaciones seleccionadas durante los próximos miles de años.

AGRADECIMIENTOS

Deseo mostrar mi agradecimiento al Prof. Linares y a mis compañeros del Laboratorio de Geoquímica de Isótopos Estables por sus útiles sugerencias y comentarios.

Referencias

- Craig, H. (1965). The measurement of oxygen isotope paleotemperatures. *Proc. Spoleto Conference on stable isotopes in oceanographic studies and paleotemperatures*, 3 (E. Tongiorgi, edit.), Spoleto, 161-182.
- Chapman, D. y McEwen, D. (1992). The application of paleohydrogeological information to repository performance assessment. *Workshop Paleohydrogeological methods and their applications for radioactive waste disposal*, París (en prensa).
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-468.
- Deines, P. (1980). The isotopic composition of reduced organic carbon. *Handbook of environmental isotope geochemistry I, The terrestrial environment*, A. (Fritz, P. y Fontes, J. Ch. edit.), Elsevier, New York, 329-406.
- Duplessy, J. C., Labeyrie, J., Lalou, C. y Ngyuen, H. V. (1970). Continental climate variations between 130.000 and 90.000 years B.P. *Nature*, 226, 631-633.
- Fritz, P., Barker, J. F. y Gale, J. E. (1979). Geochemistry and isotope hydrology of groundwaters in the Stripa granite. Results and preliminary interpretation. *Lawrence Berkeley Lab. Tech. Rept. SAC.12, LBL-8285*, 105 págs.
- Fritz, P.; Fontes, J. Ch.; Frapce, S. K.; Louvat, D.; Michelot, J. L. y Balderer, W. (1989). The isotope geochemistry of carbon in groundwater at Stripa. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 53, 1765-1775.
- Gray, J. y Thompson, P. (1976). Climatic information from $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios in cellulose in tree rings. *Nature*, 262, 481-482.
- Herbert, H. J. y Heuss, T. (1992). Stable isotopes of gypsum crystallization water - a new method for the investigation of the paleoclimatic regime during the cap rock formation of salt domes. *Workshop Paleohydrogeological methods and their applications for radioactive waste disposal*, París (en prensa).
- Lawrence, J. R. y Taylor, H. P. (1971). Deuterium and oxygen-18 correlation: clay minerals and hydroxides in Quaternary soils compared to meteoric waters. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 35, 993-1003.
- Libby, L. M. (1983). *Past climates: Tree thermometers, commodities, and peoples*, University of Texas Press, Austin, 142 págs.
- Libby, L. M. y Pandolfi, L. J. (1973). (Citado por Libby, 1983), *Colloques internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique*, Gig-sur-Yvette, France.
- Longinelli, A. (1984). Oxygen isotopes in mammal bone

- phosphate a new tool for paleohydrological and paleoclimatological research. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 385-390.
- Longinelli, A. y Nuti, S. (1973). Revised phosphate-water isotopic temperature scale. *Earth Planet. Sci. Letters*, 19, 373-376.
- Moser, H., Wolf, M., Fritz, P., Fontes, J. Ch., Florkowski, T. y Paine, B. R. (1989). Deuterium, oxygen-18 and tritium in Stripa groundwater. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 1757-1763.
- Quade, J. y Cerling, T. E. (1990). Stable isotopic evidence for a pedogenesis origin of carbonates in Trench 14 near Yucca Mountain, Nevada. *Science*, 250, 1549-1552.
- Savin, S. M. (1980). Oxygen and hydrogen isotope effects in low-temperature mineral-water interactions. *Handbook of environmental isotope geochemistry. 1 The terrestrial environment, A* (P. Fritz y J. Ch. Fontes, edit.) Elsevier, New York, 283-327.
- Savin, S. M. y Epstein, S. (1970). The oxygen and hydrogen isotope geochemistry of clay minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 34, 25-42.
- Yeh, H. V. (1980). D/H ratios and late-stage dehydration of shales during burial. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44, 341-352.
- Yeh, H. W. y Savin, S. M. (1977). The mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediments, 3. Oxygen isotopic evidence. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 88, 1321-1330.