



ES9900181



Ciemat

Centro de
Investigaciones Energéticas,
Medioambientales
y Tecnológicas

Miner

Determinación de ^{226}Ra por Espectrometría Alfa con el Empleo de ^{225}Ra como Trazador

M.T. Crespo
O. Oller

30 - 18

L

Informes Técnicos Ciemat

879

marzo, 1999

Determinación de ^{226}Ra por
Espectrometría Alfa con el Empleo
de ^{225}Ra como Trazador

M.T. Crespo
O. Oller

Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesaurus del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Depósito Legal: M -14226-1995
ISSN: 1135 - 9430
NIPO: 238-99-003-5

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

400105;400700

RADIOCHEMISTRY; RADIUM226; RADIUM225; ALPHA SPECTROSCOPY; THORIUM229;
GEOLOGY; ENVIRONMENT;

“Determinación de ^{226}Ra por Espectrometría Alfa con el Empleo de ^{225}Ra como Trazador”

Crespo, M.T. y Oller, O.
15 pp. 6 figs. 12 refs.

Resumen:

Se describe un método para la determinación de bajos niveles de ^{226}Ra en muestras ambientales y geológicas por espectrometría alfa. El método se basa en la utilización de ^{225}Ra , procedente del ^{229}Th , como trazador y puede aplicarse a la determinación de U, Th y Ra en la misma muestra.

“Determination of ^{226}Ra by Alpha Spectrometry by Using ^{225}Ra as Yield Tracer”

Crespo, M.T. y Oller, O.
15 pp. 6 figs. 12 refs.

Abstract:

A method for the determination of low-level ^{226}Ra in environmental and geological samples by alpha spectrometry is described. The method is based on the use of ^{225}Ra from ^{229}Th as yield tracer and has been developed to analyze U, Th and Ra in the same sample.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
FUNDAMENTO DEL MÉTODO.....	3
PROCEDIMIENTO RADIOQUÍMICO.....	6
COMPROBACIÓN DEL MÉTODO CON MUESTRAS PATRÓN.....	8
APLICACIÓN A MUESTRAS GEOLÓGICAS.....	10
CONCLUSIONES.....	13
REFERENCIAS.....	14

DETERMINACIÓN DE ^{226}Ra POR ESPECTROMETRÍA ALFA CON EL EMPLEO DE ^{225}Ra COMO TRAZADOR

M.T. Crespo y O. Oller

Metrología de Radiaciones Ionizantes. DFFP. CIEMAT.

INTRODUCCIÓN

El ^{226}Ra , perteneciente a la serie radiactiva del uranio, es el isótopo natural más abundante de este elemento y el de mayor importancia desde el punto de vista de la contaminación radiactiva medioambiental, debido a su nocividad biológica y a su período de semidesintegración relativamente largo (1600 años). En estudios geológicos, la determinación del estado de equilibrio o desequilibrio secular entre el ^{226}Ra y sus padres de períodos más largos, permite establecer la escala de tiempos de los procesos geoquímicos más recientes ($\leq 10^4$ años) causantes de esta situación.

Para la determinación de ^{226}Ra existen diversos métodos indirectos y directos. Los primeros se basan en la medida de sus descendientes por espectrometría gamma, centelleo líquido o por la técnica de emanación del radón (Wardaszko et al., 1986; Tinker et al., 1995). Estos métodos indirectos requieren una espera de unas cuatro semanas para que se alcance el equilibrio secular entre el radio y sus descendientes. En los métodos directos, el ^{226}Ra se determina directamente a través de sus emisiones alfa o gamma. Dada la interferencia en la medida gamma directa que supone el ^{235}U , la espectrometría alfa es el procedimiento de determinación directa de ^{226}Ra más utilizado. El método más común consiste en la coprecipitación de este elemento con sulfato de bario o plomo (Sill et al., 1974; Aceña y Crespo, 1988), y en el depósito de este precipitado sobre un filtro que directamente constituye la fuente radiactiva para espectrometría alfa. Este método permite el empleo de un trazador radioquímico, pero presenta la desventaja de la mala calidad de las fuentes radiactivas, lo que produce importantes interferencias espectrales.

En general, cualquier determinación por espectrometría alfa debe cumplir tres requisitos: 1) Disponer de un procedimiento adecuado de separación radioquímica para aislar

el radioelemento de interés de otras interferencias estables o radiactivas. 2) Tener a punto un método de preparación de fuentes finas y homogéneas que permita obtener espectros alfa con buena resolución en energías. 3) Disponer de un trazador calibrado adecuado que permita obtener el rendimiento de las numerosas manipulaciones químicas a las que se somete la muestra.

Particularizando para el radio, Crespo y Jiménez (1997) han puesto a punto un método de separación radioquímica de este elemento basado en el empleo de columnas cromatográficas de cambio catiónico. En el trabajo que aquí se presenta se ha considerado necesario incluir pasos previos de separación del uranio y torio de las muestras por cambio aniónico para impedir que la presencia de pequeñas actividades de ^{234}U y ^{230}Th , nucleidos muy abundantes en las muestras ambientales y geológicas, pueda alterar la determinación del ^{226}Ra debido al solapamiento de sus emisiones alfa. En el mismo trabajo de Crespo y Jiménez y en otro más detallado de los mismos autores (Crespo y Jiménez, 1996), se presenta un método de preparación de fuentes de radio por electrolisis sobre soportes de acero inoxidable que permite obtener resoluciones en energías muy adecuadas para una buena determinación espectrométrica.

En lo referente a los trazadores radioquímicos, no existen en el mercado isótopos artificiales emisores alfa de radio que puedan ser empleados como trazadores. Un procedimiento muy utilizado consiste en emplear ^{224}Ra como trazador en las determinaciones de ^{226}Ra (Aceña y Crespo, 1988). La principal desventaja de este procedimiento es que el ^{224}Ra es también un isótopo natural del radio, frecuente de encontrar en muchas muestras. Esto hace que sea necesario hacer el análisis de dos alícuotas de una misma muestra, una sin trazador y otra a la que se añade ^{224}Ra como trazador. Este es el método conocido como del patrón interno (Aceña et al., 1986). Una solución alternativa consiste en emplear como trazador un isótopo artificial de radio emisor beta como es el ^{225}Ra (Yamamoto et al., 1989; Hancock y Martin, 1991). La utilización del ^{225}Ra como trazador para las determinaciones de ^{226}Ra es el objetivo de este trabajo por lo que, a continuación, se detalla el fundamento del método, el procedimiento radioquímico y su aplicación tanto a muestras patrón como a muestras sólidas de origen geológico.

FUNDAMENTO DEL MÉTODO

El ^{225}Ra es el primer descendiente del emisor alfa ^{229}Th que se emplea como trazador en las determinaciones de los isótopos naturales de torio. Al tener un período corto de 14,8 días, se encuentra normalmente en equilibrio radiactivo con su padre en las disoluciones trazadoras de torio. Sus descendientes inmediatos son los emisores alfa ^{225}Ac ($T_{1/2} = 10,0$ días), ^{221}Fr ($T_{1/2} = 4,8$ minutos) y ^{217}At ($T_{1/2} = 0,0323$ segundos). De todos ellos, únicamente el ^{217}At emite partículas alfa de 7067 keV de energía que no interfieren con las emisiones de otros nucleidos descendientes de los isótopos naturales del radio en un espectro alfa.

Al añadir ^{225}Ra en equilibrio con su padre ($^{229}\text{Th}/^{225}\text{Ra}$) como trazador a una muestra, lo primero que debe evitarse es que haya pérdidas preferenciales de Th o Ra durante la etapa de disolución o pretratamiento de la muestra. A continuación, se inicia la etapa de separación radioquímica por cualquiera de las técnicas conocidas (cambio iónico, extracción con disolventes, cromatografía de extracción, etc), debiendo utilizarse un procedimiento que conduzca a una separación cuantitativa del par Th/Ra. El tiempo en el que se produce esta separación debe anotarse ya que a partir de entonces el ^{225}Ra se separa del ^{229}Th y comenzará a decaer conforme a su propio período. Si en el proceso de separación Th/Ra también ocurriera la separación $^{225}\text{Ra}/^{225}\text{Ac}$, este último nucleido iniciará su crecimiento en la fracción que contiene únicamente radio. Si no es así, hay que introducir un paso adicional que garantice la separación Ac/Ra de forma que todo el ^{225}Ac presente en la fracción aislada del radio sea el que crece del ^{225}Ra .

Si A_0 es la actividad del ^{225}Ra en el tiempo t_0 de separación del ^{229}Th , su actividad A_1 al tiempo en que se inicia el crecimiento del ^{225}Ac vendrá dada por:

$$A_1 = A_0 \exp[-\lambda_1 (t_1 - t_0)] \quad [1]$$

siendo λ_1 la constante de desintegración del ^{225}Ra . Si λ_2 es la constante de desintegración del ^{225}Ac , la actividad correspondiente al ^{225}Ac a cualquier tiempo, $A(t)$, será entonces:

$$A(t) = \lambda_2 A_1 [\exp \{-\lambda_1 (t - t_1)\} - \exp \{-\lambda_2 (t - t_1)\}] / (\lambda_2 - \lambda_1) \quad [2]$$

Integrando esta ecuación en el tiempo que dura el conteo, de t_2 a t_3 , se tiene:

$$\hat{A}(t_2-t_3) = A_1 \lambda_2 / [(\lambda_2 - \lambda_1)(t_3 - t_2)] \{ 1/\lambda_1 [\exp(-\lambda_1(t_2 - t_1)) - \exp(-\lambda_1(t_3 - t_1))] - 1/\lambda_2 [\exp(-\lambda_2(t_2 - t_1)) - \exp(-\lambda_2(t_3 - t_1))] \} \quad [3]$$

Teniendo en cuenta las correcciones necesarias debidas al rendimiento químico y eficiencia de detección, $\hat{A}(t_2-t_3)$ será proporcional al número de cuentas acumuladas bajo el pico del ^{225}Ac durante el tiempo que dura la medida del espectro. Estas cuentas serán las mismas que se acumulan bajo el pico del ^{217}At ya que este nucleido rápidamente se pone en equilibrio con sus precursores ^{225}Ac y ^{221}Fr . Además, como ya se dijo anteriormente, en un espectro alfa obtenido de una muestra que contenga ^{226}Ra y ^{225}Ra con sus respectivos descendientes, el pico correspondiente al ^{217}At es el único que aparece suficientemente aislado de forma que sea fácilmente identificable y sencillo de medir sin tener que hacer correcciones por solapamiento con otros picos. De esta forma, si se obtienen las cuentas acumuladas durante la medida del espectro bajo los picos del ^{226}Ra y ^{217}At , C_{226} y C_{217} , la actividad del ^{226}Ra en la muestra vendrá dada por:

$$A(^{226}\text{Ra}) = \hat{A}(t_2, t_3) C_{226}/C_{217} \quad [4]$$

Puede suceder que en la aplicación del procedimiento radioquímico la separación entre el ^{225}Ra y el ^{225}Ac sea incompleta. En este caso, al ser imposible distinguir en un espectro cuantas cuentas del ^{217}At proceden del ^{225}Ac remanente y cuantas del ^{225}Ac que crece del ^{225}Ra , el valor que se obtenga de C_{217} será más alto y, por tanto, la actividad del ^{226}Ra obtenida con la ecuación [4] será inferior a la correcta. Cuando esto suceda, en las ecuaciones [2] y [3] tendría que introducirse un término adicional que tuviera en cuenta la contribución del ^{225}Ac no separado del ^{225}Ra . Sin embargo, como no se puede conocer cuanto actinio permanece, esta contribución no puede, por tanto, calcularse. En la Figura 1 se aprecia que si la actividad inicial o remanente de ^{225}Ac es pequeña (curvas C y D para una actividad inicial de ^{225}Ac del 10 o del 25% en relación al ^{225}Ra), las curvas que muestran la actividad del actinio en función del tiempo se aproximan a tiempos largos (> 25 días) a la curva de crecimiento del actinio cuando inicialmente la actividad de este nucleido es cero (curva B).

Esto significa que si se mide una muestra transcurridos varios días desde el proceso de separación radioquímica, las cuentas acumuladas en un espectro bajo el pico del ^{217}At , proporcionales a la integral o área bajo estas curvas entre los tiempos de inicio y fin del conteo, serán prácticamente las mismas independientemente de que la separación del radio y el actinio fuera o no completa, es decir, independientemente de que en la ecuaciones [2] y [3] se introdujera o no un término que tuviera esto en cuenta.

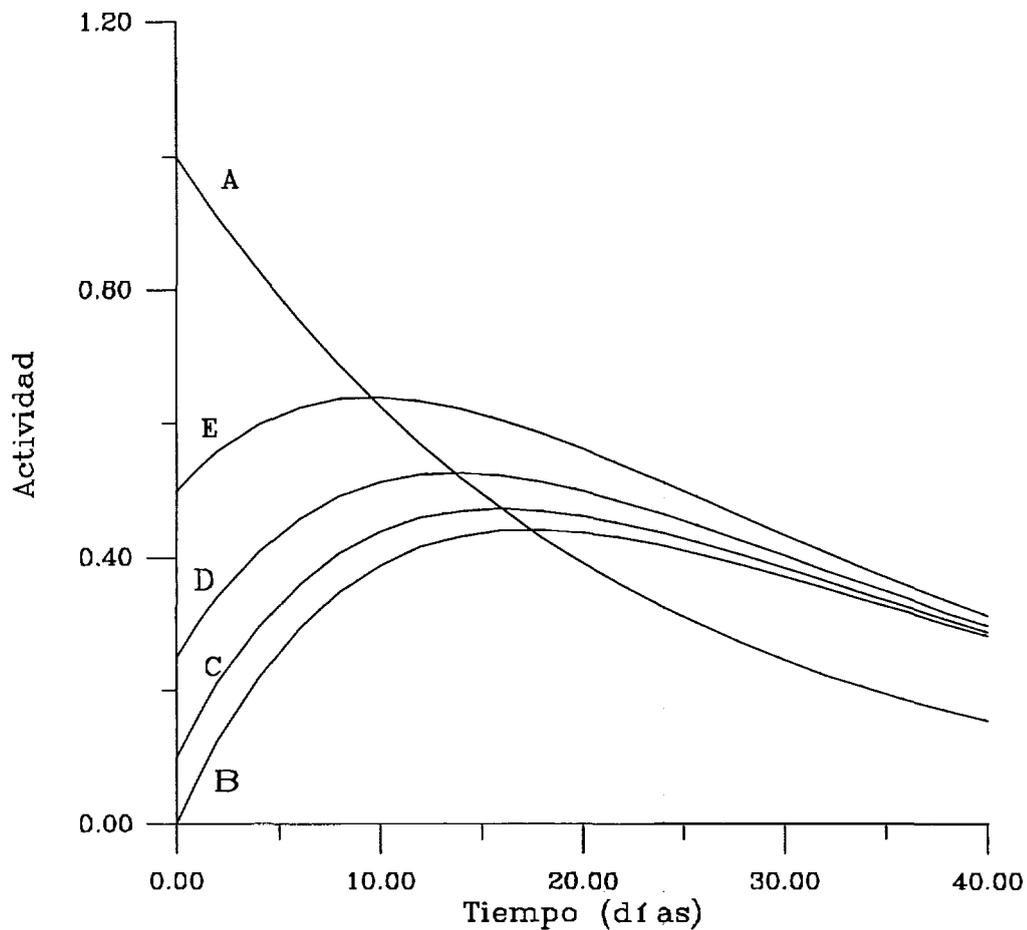


Figura 1. (A) Curva de decaimiento del Ra-225. (B) Curva de crecimiento del Ac-225 a partir del Ra-225. (C), (D) y (E) Como (B) pero con una actividad inicial de Ac-225 del 10, 25 o 50% en relación al Ra-225.

PROCEDIMIENTO RADIOQUÍMICO

El procedimiento que se describe a continuación puede aplicarse tanto a muestras líquidas como a muestras sólidas tras su etapa de disolución. El procedimiento está diseñado para el análisis de isótopos de uranio, torio y radio en la misma muestra por lo que se añadirán los trazadores adecuados para estas determinaciones, ^{236}U y ^{229}Th (^{225}Ra). Debe tenerse en cuenta que la adición de los trazadores ha de hacerse al inicio del proceso, es decir, una vez tomada la alícuota de muestra que se va a analizar en el caso de muestras líquidas, y en el caso de los sólidos antes de iniciar el proceso de disolución de la muestra. Presenta la ventaja, sobre otros procedimientos en los que se emplea ^{225}Ra como trazador, de su simplicidad, dado que la purificación del radio se realiza en pocos minutos empleando únicamente una columna de cambio catiónico.

Procedimiento: La muestra se lleva a sequedad y el residuo se disuelve en medio HCl 9 N (15-20 ml) para su paso por una columna de cambio aniónico (10 cm de longitud y 1 cm de diámetro interno) conteniendo resina Dowex 1 X8 de 100-200 mallas en donde se fija el uranio. Tras los correspondientes lavados, el efluente y el líquido de lavado se evaporan a sequedad para llevarlos a medio HNO_3 8 M en el que se pasarán por una columna aniónica igual a la anterior pero acondicionada a este nuevo medio. En estas condiciones se fija el torio en la columna, produciéndose la separación Th/Ra. Es fundamental anotar el tiempo (hora y fecha) en que se efectúa esta separación pues a partir de ese momento el ^{225}Ra inicia su decaimiento. La fracción que contiene el radio se lleva a sequedad, se disuelve el residuo en agua y se purifica haciéndola pasar a pH ~ 1, ajustado con gotas de ácido nítrico concentrado, por una columna de cambio catiónico (10 cm de longitud y 0.78 cm de diámetro interno) conteniendo resina Dowex 50W X8 de 50-100 mallas. A continuación, se lava la columna con 100 ml de HCl 2,5 M y con 25 ml de HCl 6 M. De esta forma se elimina la principal interferencia en la posterior electrolisis del radio que es el bario. Por último, se eluye el radio con otros 125 ml de HCl 6 M. Esta fracción de elución se lleva a sequedad para hacer la electrodeposición del radio. Para ello se añaden 400 μg de platino y como electrolito 10 ml de una disolución de oxalato amónico 0,17 M con un pH de 2,6 ajustado con unas gotas de ácido nítrico concentrado. En la electrodeposición se emplean planchetas de acero inoxidable de 25 mm de diámetro como cátodo y como ánodo un hilo de platino de 1 mm de diámetro

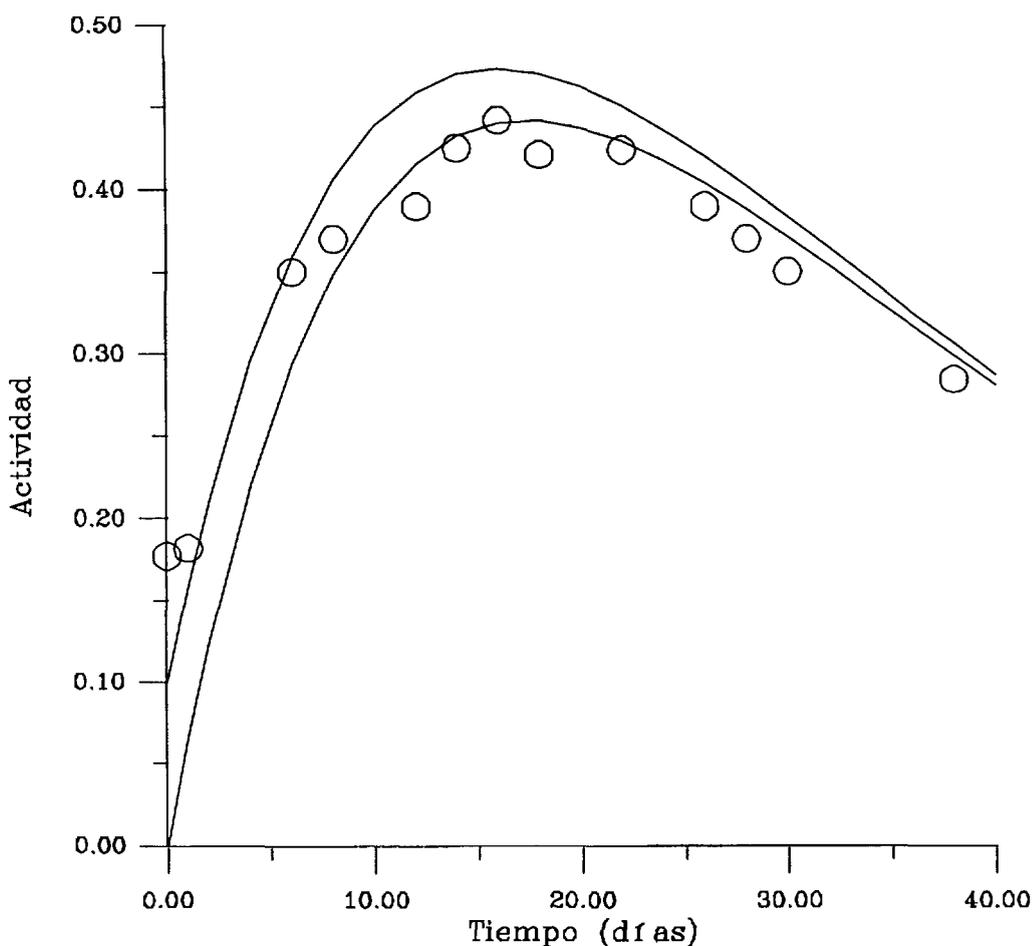


Figura 2. Las líneas continuas describen la evolución de la actividad del Ac-225 a partir del Ra-225 cuando su actividad inicial es 0 o del 10% en relación al radio. Los puntos representan las medidas experimentales de crecimiento del Ac-225 tras la electrodeposición del Ra-225.

enrollado en espiral hasta obtener una superficie de aproximadamente 1 cm de diámetro que se sitúa a una distancia del cátodo de 1 cm. La intensidad de corriente es de 600 mA y el tiempo de electrolisis es de 90 minutos.

El comportamiento del actinio en este proceso de separación se ha deducido de la información que se encuentra en la bibliografía (Nelson, 1964; Korkisch, 1969). En el primer paso de la separación, el paso por resina aniónica en medio HCl 9 N, el actinio no se retiene, acompañando a la fracción que contiene el radio y el torio. Tampoco se retiene en el segundo paso a través de resina aniónica en medio HNO₃ 8 M, permaneciendo en la fracción del radio. En cuanto al proceso de purificación del radio por cromatografía de cambio catiónico, no

existe información relativa al proceso inicial de fijación de una disolución a pH 1. Sin embargo, en el paso siguiente de eliminación del bario con HCl 2,5 N el actinio debería eluirse de la columna dado su bajo coeficiente de distribución en estas condiciones (~ 10). Este coeficiente disminuye aún más conforme aumenta la concentración del HCl, por lo que en los 25 ml de lavado con HCl 6 N debería terminar de eluirse el actinio que hubiera permanecido en la columna. Si esta separación Ra/Ac no hubiese sido completa, o si el tiempo que se deja transcurrir entre el proceso de purificación radioquímica y la preparación de la fuente de radio ha permitido el crecimiento del ^{225}Ac , el paso que permitirá un nuevo fraccionamiento Ra/Ac es el de la electrolisis. Para comprobar cual es el efecto de la electrolisis, cuantitativa para el radio, en el actinio, se ha electrolizado una muestra del trazador ^{229}Th (^{225}Ra) encontrándose que, inmediatamente después de la electrolisis, aproximadamente un 17% del ^{225}Ac aparece en el espectro. Diferentes medidas de la muestra tras su preparación indican que, teniendo en cuenta las incertidumbres experimentales, el comportamiento del actinio se ajusta a la curva teórica que muestra su actividad en función del tiempo (Figura 2). Por tanto, se va a considerar el paso de la electrolisis como el causante de la separación Ra/Ac, teniendo en cuenta que si algo de actinio se electrodeposita con el radio, la medida de las fuentes deberá hacerse varios días después de su preparación para evitar esta contribución.

COMPROBACIÓN DEL MÉTODO CON MUESTRAS PATRÓN

Para comprobar la efectividad del procedimiento radioquímico completo así como la validez del método propuesto basado en el empleo del ^{225}Ra como trazador para la determinación de ^{226}Ra , se prepararon tres muestras líquidas sintéticas conteniendo 0,148 Bq de ^{226}Ra cada una. Dos de las muestras se trazaron con 0,105 Bq de ^{229}Th (^{225}Ra) (\diamond y O en la Figura 3) y la tercera con 0,052 Bq (* en la Figura 3). Durante la aplicación del procedimiento se anotaron los tiempos de separación Th/Ra y los de preparación de las fuentes para la separación Ra/Ac. Entre el proceso de purificación del radio en columna de cambio catiónico y la preparación de las fuentes por electrolisis se han dejado transcurrir 4 días para una muestra y 5 días para las otras dos. De esta forma se permite el crecimiento del actinio en la fracción purificada del radio (~ 20%) y se comprueba su efecto en la electrolisis y posterior cálculo de la actividad del ^{226}Ra . Para ello, una vez preparadas las fuentes, se han

realizado medidas de las mismas a distintos tiempos, aplicándose luego las ecuaciones necesarias para determinar la actividad del ^{226}Ra .

Los resultados se presentan en la Figura 3 en donde se aprecia que la medida de las fuentes en las primeras horas tras su preparación conduce a resultados muy bajos de la actividad del ^{226}Ra . Sin embargo, a medida que aumenta el tiempo el valor que se obtiene de esta actividad coincide con el añadido en las muestras sintéticas, siendo en las últimas medidas la máxima diferencia entre el valor obtenido y el de referencia de un 6,5%. Se observa también que en una de las muestras se alcanza rápidamente el valor de referencia. Esta muestra es precisamente a la que se añadió menos trazador (la mitad de la actividad) y en la que, por tanto, el efecto de la separación incompleta Ra/Ac es menor, notándose su

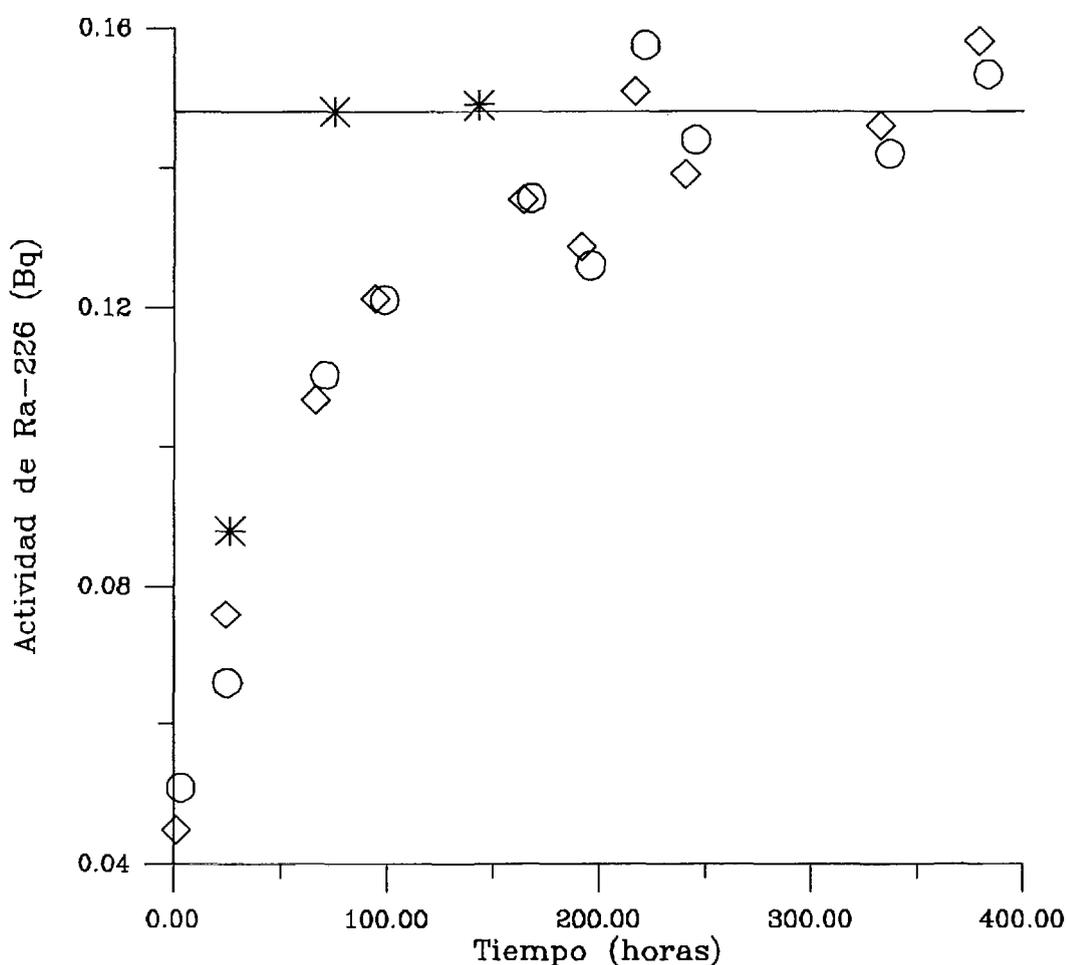


Figura 3. Valores de la actividad de Ra-226 obtenidos para tres muestras sintéticas en función del tiempo transcurrido entre la preparación de las fuentes y la medida de las mismas. La línea continua representa la actividad de Ra-226 que se añadió a las muestras.

influencia únicamente en las primeras horas tras la preparación de la fuente.

Una vez que se ha comprobado con estas experiencias la validez del método, se ha procedido a su aplicación a muestras geológicas en las que se han determinado ^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th y ^{226}Ra para conocer el estado de equilibrio de la serie radiactiva del uranio.

APLICACIÓN A MUESTRAS GEOLÓGICAS

El método descrito en este trabajo se ha aplicado a la determinación de ^{226}Ra en un conjunto de 20 muestras de arenisca procedentes de dos sondeos realizados en las proximidades del reactor nuclear natural de Bagombé (Gabón).

0,1 gramos de cada muestra se llevaron a disolución total mediante digestión ácida en horno de microondas, añadiendo los trazadores ^{236}U y ^{229}Th (^{225}Ra) para hacer la determinación del estado de equilibrio/desequilibrio de la parte superior de la serie radiactiva del uranio, incluido el ^{226}Ra . El procedimiento radioquímico se aplicó tal y como está descrito en este trabajo, anotándose para cada muestra el tiempo en que se efectúa la separación Th/Ra a partir de la cual el ^{225}Ra comienza a decaer conforme a su período, el tiempo en que se realiza la preparación de la fuente de radio por electrolisis considerado como el de la separación Ra/Ac, el tiempo que transcurre desde esta preparación hasta el inicio de cada medida y la duración de las mismas. Dado que la actividad del ^{225}Ac alcanzará como máximo un 44% de la actividad inicial del ^{225}Ra (Figura 1B), se estimó conveniente ser generoso en la adición del trazador $^{229}\text{Th}/^{225}\text{Ra}$. Esto presenta, sin embargo, el inconveniente de que aumenta la influencia del ^{225}Ac no separado del radio, debiendo efectuarse la medida de las muestras varios días después de su preparación para minimizar este efecto.

Con pequeñas excepciones, las muestras se encuentran en estado de equilibrio radiactivo para la parte superior de la serie radiactiva, es decir, las relaciones de actividad $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ y $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ son de la unidad o próximas a ella. En cuanto a la relación $^{230}\text{Th}/^{226}\text{Ra}$, se han presentado tres situaciones, muestras en equilibrio y muestras con exceso o defecto de ^{226}Ra en relación a su padre ^{230}Th . En las Figuras 4, 5 y 6 se presenta un ejemplo de cada situación. En todas ellas se observa el mismo efecto que se observaba en las muestras patrón,

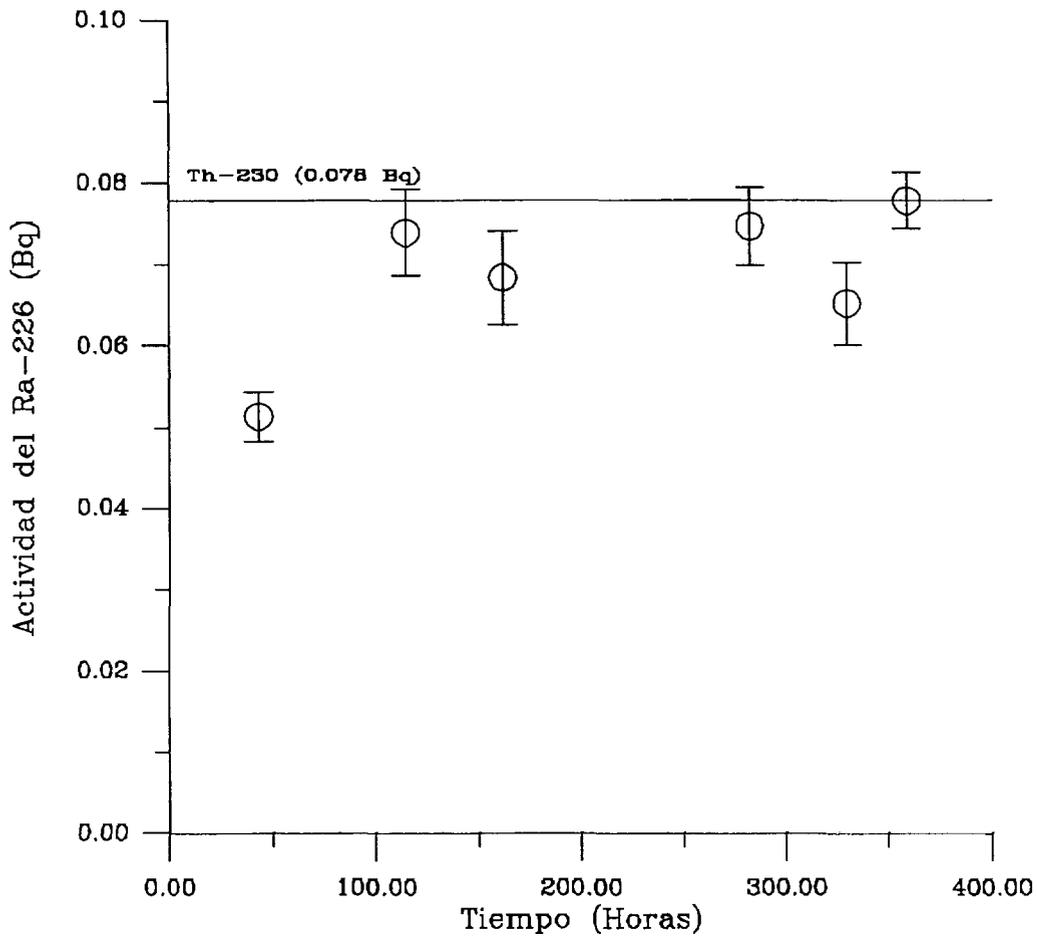


Figura 4. Actividad obtenida con este método del Ra-226 en función del tiempo que transcurre desde la preparación de la fuente hasta la medida de la misma. La línea continua indica la actividad del Th-230 de la muestra.

es decir, las medidas realizadas en las primeras horas tras la preparación de las fuentes conducen a resultados muy bajos de la actividad del ^{226}Ra . Conforme el efecto de la contribución inicial del actinio disminuye, los valores que se obtienen para el ^{226}Ra se estabilizan en torno a un valor medio que es el que se ha tomado como la actividad del ^{226}Ra de la muestra.

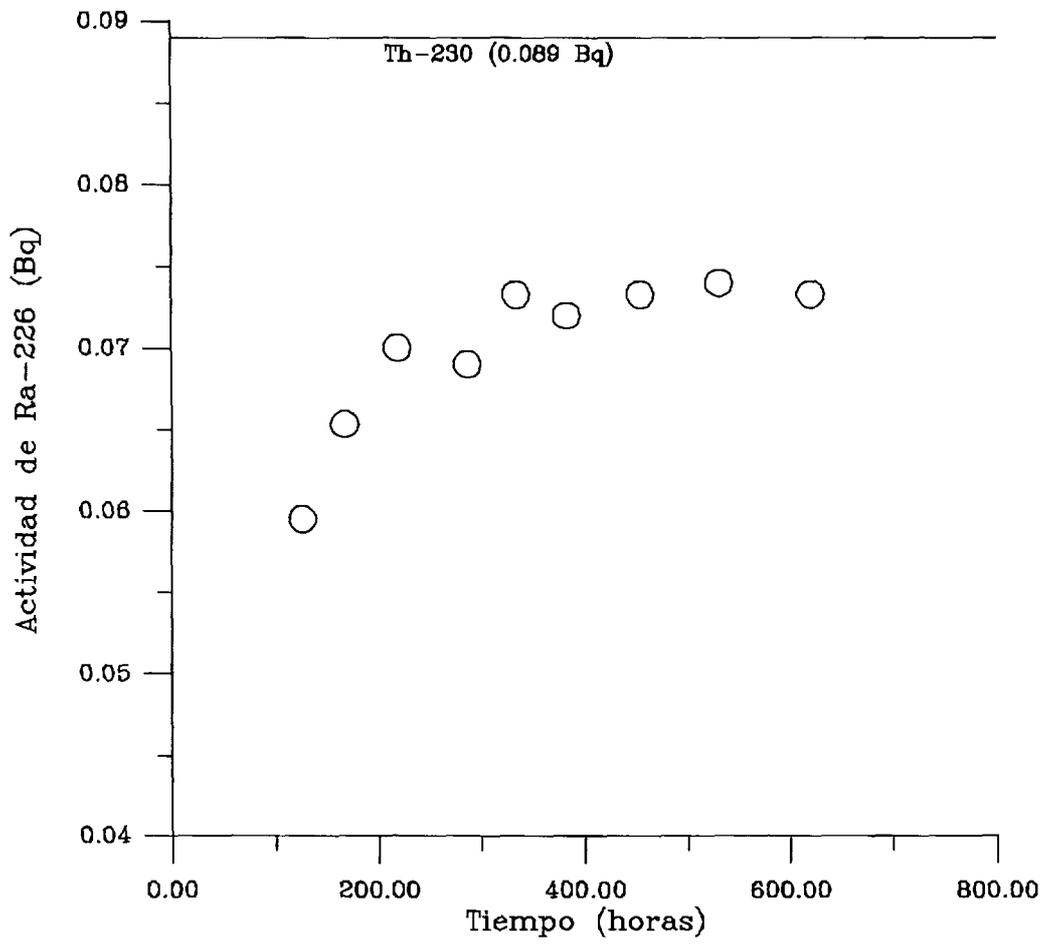


Figura 5. Actividad obtenida con este método del Ra-226 de una muestra en función del tiempo entre la preparación de la fuente y la medida de la misma. La línea continua corresponde a la actividad del Th-230 de la muestra.

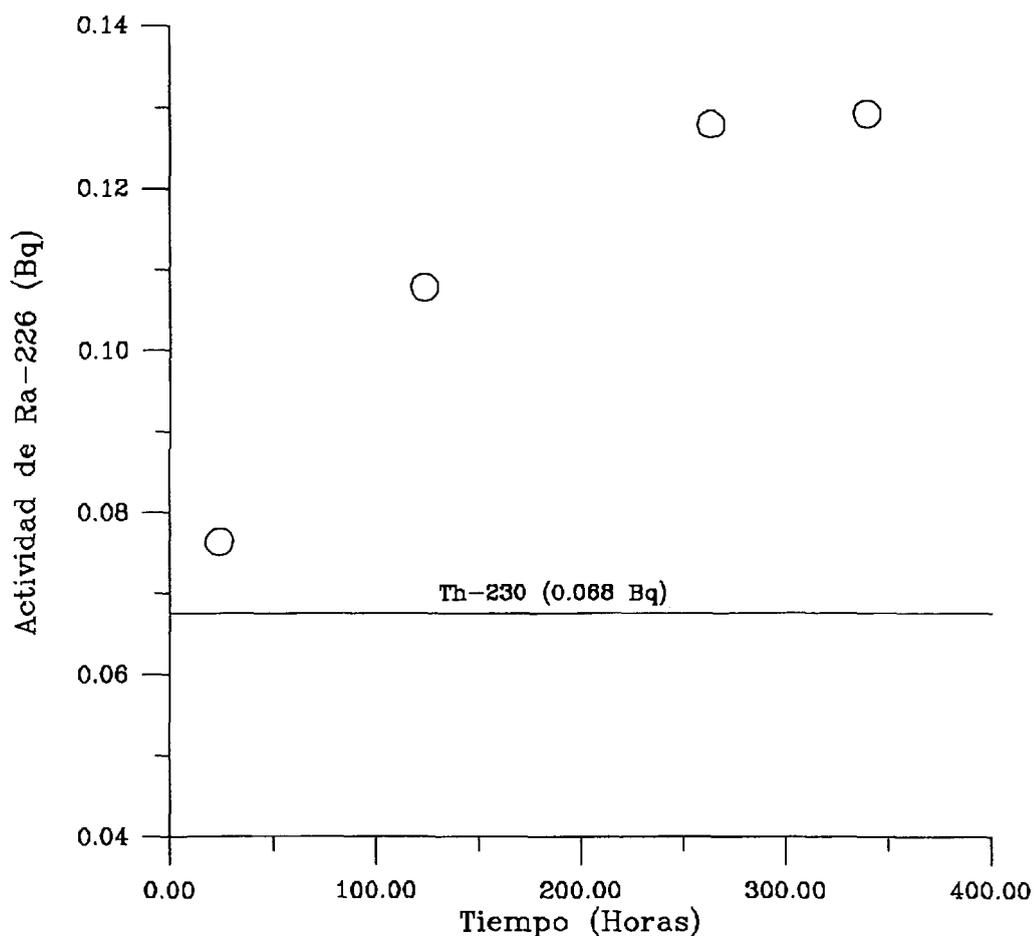


Figura 6. Actividad obtenida con este método del Ra-226 de la muestra en función del tiempo desde la preparación de la fuente a la medida de la misma. La línea continua corresponde a la actividad del Th-230 de la muestra.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un método que permite la determinación del ^{226}Ra por espectrometría alfa en muestras de distinto origen. Además de la simplicidad del procedimiento radioquímico, presenta la ventaja de poder emplear el ^{225}Ra como trazador, de forma indirecta a través de la medida de sus descendientes. El hecho de tener que esperar unos diez días desde la preparación de las fuentes alfa de radio hasta poder efectuar la medida de las mismas supone, sin embargo, una ventaja en relación a otros métodos indirectos de determinación de ^{226}Ra que requieren una espera mínima de tres semanas para que se alcance el equilibrio radiactivo con sus descendientes.

REFERENCIAS

- Aceña, M.L., García-Toraño, E. y Crespo, M.T. (1986). Espectrometría de Radiación Alfa (Instituto de Estudios Nucleares, JEN, Madrid).
- Aceña, M.L. y Crespo, M.T. (1988). *J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett.* 126, 77.
- Crespo, M.T. y Jiménez, A. (1996). Electrodeposición del radio. Informe Técnico CIEMAT 800.
- Crespo, M.T. y Jiménez, A. (1997). *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 221, 149.
- Hancock, G.J. y Martin, P. (1991). *Appl. Radiat. Isot.* 42, 63.
- Korkisch, J. (1969). *Modern methods for the separation of rarer metal ions.* Pergamon Press.
- Nelson, F. (1964). *J. Chromatog.* 16, 538.
- Sill, C.W., Puphal, K.W. y Hindman, F.D. (1974). *Anal. Chem.* 46, 1725.
- Tinker, R.A., Smith, J.D. y Cooper, M.B. (1995). *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 193, 329.
- Wardaszko, T., Grzybowska, D. y Nidecka, J. (1986). *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B17*, 530.
- Yamamoto, M., Komura, K. y Ueno, K. (1989). *Radiochim. Acta* 46, 137.