

DETECCION DE FUGA DE RADON EN CERAMICAS SOLIDAS UTILIZANDO CONTEO ALFA

Susana Petrick C., Ernesto López Carranza
Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería

RESUMEN

Para calcular la edad de una cerámica por termoluminiscencia, se requiere medir la dosis radioactiva natural que la cerámica absorbe cada año. Dicha dosis radioactiva natural proviene de los núcleos radioactivos, que se encuentran como impurezas en el suelo en el que estuvo enterrada la cerámica y en la cerámica misma, siendo el U-238, el Th-232 y el K-40 los isótopos radioactivos responsables por casi la totalidad de la dosis natural.

Las series radioactivas de decaimiento de dichos isótopos estarán en equilibrio secular siempre que no se produzca una separación física o química de los isótopos formados, y no se incremente ni remueva ninguno de los núcleos radioactivos que forman la serie de decaimiento, que termina cuando se produce un núcleo estable de Pb. En algunos casos sin embargo, los miembros de las series pueden estar sujetos a procesos físicos y químicos de separación que interrumpen las cadenas de decaimiento, debido a las condiciones ambientales donde se produce el proceso de decaimiento. Una causa natural común de interrupción de la cadena de decaimiento es la emanación o fuga de radón gaseoso formado en las cadenas de decaimiento del U-238, U-235 y Th-232.

En éste trabajo discutimos el mecanismo responsable por la emanación de radón observada en cerámicas y suelos, y probamos un método simple para detectar y cuantificar el fenómeno y determinar la corrección en el cálculo de la dosis anual calculada por conteo alfa. El método utiliza una celda de bronce y una rutina de conteo adecuada que podrían ser utilizadas también para determinar emanaciones de radón en materiales de construcción como ladrillos y cemento.

ABSTRACT

When the thermoluminescent dating techniques are used to date ancient pottery we need to measure the natural radioactive dose absorbed by the sample each year, during its burial time. This natural radioactive dose is due to the radioactive nuclei that we find in the burial soil and in the pottery itself; being U-238, Th-232 and K-40 the isotopes responsible for almost the entire natural radioactive dose.

The decay series of these naturally radioactive isotopes will be in secular equilibria if there is no chemical or physical mechanisms able to separate, increase or remove any of the isotopes constituting the decay series until stable Pb is formed. But in some cases the environmental conditions, where the decay processes are taking place, allow the removal of some members of the radioactive series interrupting the decay chain. One common natural cause for the interruption of the decay chains is the emanation or loss of the gaseous radon formed in the decay series of U-238, U-235 and Th-232.

In this work we discuss the mechanisms responsible for the radon emanation observed in pottery and soil and test a simple way to detect and quantify it, in order to correct the natural annual dose calculated by alpha counting. The method uses a brass cell and an adequate alpha counting routine that could be used also to determine radon emanation in building materials such as bricks and cement.

INTRODUCCION

A final del siglo XIX Owens y Rutherford observaron que cuando se medían con un electrómetro sales de torio las lecturas realizadas eran erráticas. En 1899 se determinó que la causa de tal comportamiento era la difusión de alguna sustancia radioactiva desde las sales de torio. Comportamientos similares fueron observados en el U-235 separado de la pechblenda y de las sales de radio. En 1902 Rutherford y Soddy consiguieron condensar radón y

cinco años después Soddy mostró que el radón es un miembro de la familia de los gases inertes.

Las propiedades radioactivas de los tres isótopos naturales del radón se encuentran en la Tabla 1, donde vemos que de los tres isótopos radioactivos naturales del radón, el de vida media más larga es el Rn-222, que es producido en la serie del U-238. Como veremos más adelante, la vida media larga de éste isótopo favorece su distribución en el medio ambiente [1].

Emanación de Radón gaseoso de las series de Th y U

Todos los isótopos de Radón, miembros de las tres series primordiales encabezadas por U-235 U-238 y Th-232, son emisores de partículas alfa. Debido a su carácter de elemento químico inerte y a su solubilidad en medios acuosos el transporte en agua ha sido un mecanismo significativo en la difusión del radón hacia minas e instalaciones subterráneas, sótanos y pozos de agua [2].

Los isótopos de vidas medias cortas, producidos con posterioridad al radón en las series radioactivas, como Po-218, Pb-214, Bi-214 y Po-214, tienen una gran importancia en el computo de la exposición de los seres humanos a elementos radioactivos, pues estos productos son inhalados y depositados en el árbol tráqueo-bronquial y representan un peligro para la salud.

Para que el radón proveniente de suelos o materiales sólidos de origen mineral se libere al aire, es necesario que el átomo se forme en una capa de entre 20 y 70 nm de la superficie. La presencia de agua en los canales capilares del material o entre las partículas incrementa la fracción de radón que logra salir del material sólido al aire, ya que el agua actúa como agente amortiguador para el núcleo que se forma y es expelido de la superficie por difusión.

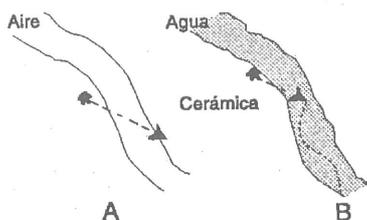


Fig. 1 Esquema mostrando la formación de un núcleo de Rn en la superficie del poro. El núcleo formado por el decaimiento del isótopo anterior al Rn en la serie respectiva decae en o próximo de la superficie de las porosidades del material; el núcleo de Rn formado retrocede y dependiendo de la geometría y humedad (A) se incrustará en el material o (B) quedará inmerso en el agua que llena la cavidad y podrá migrar escapando al exterior.

En la Figura 1 vemos de manera esquemática el proceso por el que el átomo de radón se forma, por el decaimiento del ion inmediatamente anterior en la serie respectiva. La conservación de momento requiere que el átomo formado retroceda, pudiendo ser expelido de la superficie. Si el átomo entra en un ambiente que se encuentra vacío, i.e. un conducto capilar o espacio seco, dependiendo de las dimensiones de éste y de la velocidad de retroceso del núcleo formado, éste último se incrustará en la superficie al otro lado del conducto. Sin embargo, si el espacio se encuentra lleno de agua el átomo expelido perderá velocidad en su trayectoria y eventualmente quedará sumergido en el líquido, difundiéndose y migrando [1].

Cálculo de las dosis radioactivas naturales a partir del conteo alfa.

El arreglo experimental que se utiliza en la práctica para el cálculo de dosis por conteo alfa de contacto directo de la muestra con el centellador de sulfuro de zinc, se muestra en la Figura 2. Se trata de un pequeño recipiente de acrílico, con una cavidad de 42 mm de diámetro y 12 mm de profundidad. En el fondo del recipiente se coloca el centellador, que es una lámina transparente con una de sus superficies cubierta de polvo de sulfuro de zinc. Un anillo de aluminio sirve de sujetador para evitar que la muestra se introduzca por debajo del centellador. La muestra pulverizada se esparce homogéneamente en el fondo del recipiente y el portamuestra se sella con un aro sello de neopreno y una tapa de acrílico que se ajusta con tres tornillos de nylon. Todo el conjunto se coloca sobre el tubo fotomultiplicador EMI 6097B, del contador alfa, que amplifica, discrimina y acumula los destellos producidos por la interacción entre las partículas alfa de la muestra y el centellador de sulfuro de zinc (SZn) [1].

La muestra emisora pulverizada, se coloca sobre el centellador, en una geometría tal que ambos, centellador y muestra, tengan un espesor mayor que el rango R de penetración de las partículas alfa, que en una primera aproximación consideraremos igual para todas las partículas alfa emitidas.

Tabla 1. Datos correspondientes a los isótopos de radón producidos en las series de decaimiento del U-235, U-238 y Th-232

Isótopo	Serie	Vida media	Energía α MeV	Ocurrencia %	Energía γ MeV
Rn-219	U-235	3.96 s	6.819 6.553	81 12	0.271
Rn-220	Th-232	55.60 s	6.288	100	
Rn-222	U-238	3.82 d	5.490	100	

Debido a que las partículas son emitidas isotrópicamente, del total de partículas alfa emitidas por un núcleo emisor, solamente 1/4 alcanzan la superficie de sulfuro de zinc [3]. En estas condiciones realizamos el cálculo considerando que si C_α es el número de partículas alfa emitidas por unidad de masa de muestra y por unidad de tiempo, la razón de conteo α , en cuentas/segundo, será:

$$\alpha = 1/4 AR\rho c_\alpha$$

donde ρ es la densidad de la muestra y A es el área del centellador [1]. Observamos que la velocidad de conteo, es proporcional a R y a c_α

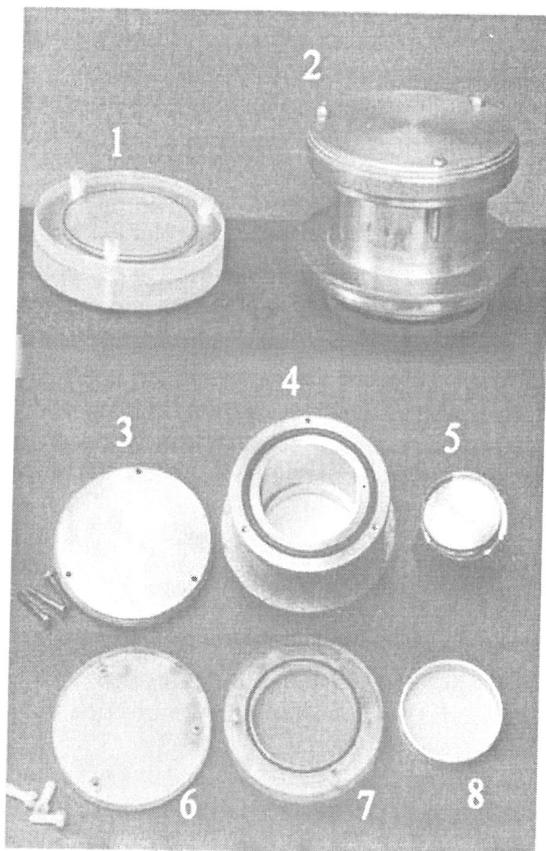


Fig. 2 Fotografía de las celdas utilizadas: 1 vista lateral de la celda convencional, 2 vista lateral de la celda para detección de fuga de radón, 3 4 y 5 tapa de la celda, celda y bandeja portamuestra para detección de radón. 6 y 7 tapa y celda convencional, 8 centellador de ZnS con anillo de aluminio.

Si la muestra contiene una serie radioactiva de n emisores alfa en equilibrio, y c es la actividad por unidad de masa del padre de la serie, podemos extender la razón de conteo como la suma de las razones de conteo individuales de los miembros de la serie y obtendremos:

$$\alpha = 1/4 A (R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n) \rho c$$

$$\alpha = 1/4 AR\rho c n$$

En la ecuación anterior, R es el rango de penetración medio de las partículas de la serie radioactiva, que a su vez depende de la energía de las partículas. En el caso de cerámicas arqueológicas los materiales que la componen tienen una densidad media de 2.5 g/cm^3 , de donde podemos calcular los valores medios del producto $R\rho$, que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 Producto de R promedio por la densidad ρ para las emisiones alfa de las series del Th y U, calculadas en cerámica con densidad de 2.5 g/cm^3 .

Serie	$R\rho (\mu\text{g/mm}^2)$
Th-232	69.5
U-238	58.2
U-235	68.6

y separando las contribuciones individuales de las series del uranio y torio:

$$\alpha = 1/4 A \{ (70 \times 6 \times c_h) + (58 \times 8 \times c_u) \} \times 10^{-6}$$

aquí c_h y c_u son las actividades específicas¹ de las series del torio y uranio, respectivamente.

En el caso de utilizarse un centellador estándar de 42 mm de diámetro, la ecuación anterior puede reducirse a

$$\alpha = 0.145 c_h \times f_h + 0.161 c_u \times f_u$$

donde, los factores f_h y f_u son las fracciones de umbral electrónico para las energías de las series de torio y uranio [2], respectivamente².

Si aplicamos los factores de conversión correspondientes, para convertir la velocidad de conteo en dosis anual alfa, considerando que los seis emisores alfa de la cadena de desintegración del torio, aportan una energía total de 36 MeV tendremos que una muestra que contiene solo la serie de torio producirá una dosis anual alfa equivalente a

$$D_\alpha = 1486 \alpha$$

donde α está en cuentas por kg por segundo y D_α en μGy por año. Similarmente una muestra conteniendo solamente los ocho emisores alfa de la cadena del uranio, que aportan una energía total de 43 MeV, producirá una dosis anual equivalente a :

$$D_\alpha = 1640 \alpha$$

¹ La actividad específica es el número de decaimientos por unidad de masa y unidad de tiempo (Bq/kg).

² Las fracciones de umbral electrónico utilizadas para partículas alfa de U y Th son 0.82 y 0.85 respectivamente.

μGy por año, de donde obtenemos que una muestra que contenga ambas series, con igual actividad de ambas, producirá una dosis anual igual a:

$$D_{\alpha} = 1560 \alpha$$

μGy por año.

Vemos que si utilizamos la ecuación anterior en una muestra que tiene solo una de las series, el error cometido en el cálculo será de aproximadamente 5%, por lo que aceptaremos la expresión como válida para ser aplicada en muestras en las que ambas series contribuyen a la dosis total en proporciones diferentes. Cálculos similares, pueden ser realizados para determinar las dosis beta y gama a partir del conteo alfa registrado obteniéndose para la geometría indicada [1]:

$$D_{\beta} = 72\alpha \quad \text{y} \quad D_{\gamma} = 85\alpha$$

μGy por año.

El error que se comete al considerar las diferentes proporciones con las que puedan contribuir las series de torio y uranio es de aproximadamente 20%, en el caso extremo de ausencia total de una de las series.

Los cálculos realizados para cada una de las componentes de la dosis anual emitida por el ambiente en el que se encuentra enterrada la cerámica arqueológica, se han hecho sobre la base del equilibrio secular en las cadenas de desintegración del U-235 U-238 y Th-232. Sin embargo cuando alguno de los miembros de la serie aumenta o disminuye por causas ajenas al decaimiento radioactivo natural ya no es posible hablar de equilibrio y los cálculos tienen que ser realizados de otra manera. En el proceso de difusión o migración del radón formado un factor determinante es el tiempo de vida del isótopo. En el caso del Rn-219, el tiempo de vida de 3.96 segundos permite que la distancia recorrida por el ion sea relativamente corta, mientras que en el caso del Rn-222 (de la serie del Th) la vida media de 3.83 días permite que el átomo se desplace una distancia considerable, dependiendo lógicamente de las condiciones de presión y humedad [2]. Estas diferencias en las vidas medias de los isótopos, sumadas a otras consideraciones de tipo dosimétrico, hacen que el cálculo de la fracción de dosis anual que corresponde a cada uno de los isótopos sea diferente para cada serie.

Cálculo considerando fuga de Rn gaseoso

De la Fig. 3, vemos que la fuga del 100% del radón formado en el suelo y cerámica, conduce a una disminución

de 20% en el cálculo de la dosis anual. A continuación veremos como calcular la corrección en la dosis aplicando conteo alfa [1, 4].

El método experimental que aplicamos es muy similar al aplicado para el cálculo de la dosis anual, discutido en la sección anterior. El portamuestra que utilizamos es el que se muestra en la Fig.2, y consiste de una celda de bronce de 44.6 mm de diámetro interior y 37 mm de altura. La base de la celda es de vidrio de borosilicato y sobre él se coloca un centellador de sulfuro de zinc como el utilizado en el portamuestra convencional de acrílico.

Sobre el centellador se coloca un aro de aluminio de 42 mm de diámetro interior y 44.5 mm de diámetro exterior, y sobre éste un soporte en forma de trípode que sostiene la muestra lejos del centellador.

El portamuestra se cierra herméticamente con una tapa de bronce, un aro sello de neopreno y tres tornillos de bronce, y el conjunto se coloca sobre el tubo fotomultiplicador para realizar el conteo.

Realizamos el cálculo considerando que en una sustancia que contiene una serie radioactiva en equilibrio secular, en la que la vida media del padre es mucho mayor que la vida media de los isótopos hijos, la actividad de éstos últimos será la misma que la del padre. Si a su vez el número de núcleos del isótopo padre se incrementa con una razón constante de M núcleos por unidad de tiempo, la variación de población por unidad de tiempo será:

$$dn = -\lambda ndt + Mdt$$

donde λ es la constante de decaimiento del elemento [1, 4]. Integrando esta ecuación desde un instante de tiempo t_0 , en el que el número de núcleos presentes era n_0 tendremos que el número de núcleos en el instante t será:

$$n = n_0 \exp(-\lambda(t-t_0)) + (1-\exp(-\lambda(t-t_0))) M/\lambda$$

y en términos de actividad (emisiones alfa/segundo),

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda(t-t_0)) + (1-\exp(-\lambda(t-t_0))) M$$

Observando la serie de desintegración del Th-232, Figura 3a, vemos que los isótopos relevantes, emisores de partículas alfa, que siguen al Rn-220 son el Po-216, el Bi-212 y el Po-212, los dos últimos son modos alternativos de decaimiento del Pb-212. Entonces si la celda con la muestra colocada en el soporte se cierra y dejamos pasar un tiempo suficiente, no menor de 4 días, para que el Rn-220 alcance el equilibrio con los

isótopos siguientes en la serie, la velocidad de conteo C_h en equilibrio será la suma de las cuentas correspondientes al Rn-220 y Po-216, que llamamos C_o , más las de los sucesores alternativos del Pb-212 que indicamos por C_p

$$C_h = C_o + C_p$$

Similarmente para el caso del Rn-222, Figura 3b, y sus sucesores emisores alfa, Po-218, Po-214 y Po-210, vemos que éste último es producido por el Pb-210 cuya vida media es de 22.2 años por lo que su contribución al conteo es prácticamente nula. Luego tendremos que:

$$C = C_r (1 - \exp(-\lambda_r t))$$

donde C_r corresponde a la velocidad de conteo en equilibrio del Rn-222 y sus sucesores excepto el Po-210 y λ_r es la constante de decaimiento del Rn-222. Si cerramos la celda en t_0 , considerando que fuera de la muestra no existen átomos de Rn, en el instante t con $t-t_0$ no menor de cuatro días, el total de cuentas acumuladas cada mil segundos (ks) será la suma de las contribuciones de ambas series más el ruido de fondo B,

$$C_s = C_h + C_r (1 - \exp(-\lambda_r t)) + B$$

Los isótopos hijos del Rn que no corresponden a elementos gaseosos, se fijarán en las paredes de la celda y sobre el centellador, entonces si abrimos la celda retiramos la muestra y reiniciamos el conteo luego de un tiempo suficientemente largo para que los isótopos de vida media corta decaigan, podremos registrar el número de cuentas correspondientes a los emisores alfa sucesores del Pb-212 (con λ_p igual a la constante de decaimiento efectiva del Pb-212 y sus sucesores),

$$C_u = C_p (1 - \exp(-\lambda_p t)) + B$$

Rutina de conteo alfa para determinación de la dosis perdida por fuga de radón

Establecidas las relaciones, procedemos a confeccionar el cronograma de conteo [1,4,5]:

1. Se colocará la muestra en la celda de bronce, se cerrará herméticamente y se registrará el tiempo t_0 (día y hora exacta).
2. Después de por lo menos 4 días se iniciará el conteo

alfa, acumulando un mínimo de 1000 cuentas, entre los tiempos t_a y t_b . A esta medida le llamaremos N_2 .

3. Una vez acumuladas por lo menos 1000 cuentas, abriremos la celda retiraremos la muestra, cerraremos nuevamente, y luego de un tiempo de aprox. 4 horas y media (16.2 ks) iniciaremos un nuevo conteo de "celda vacía" por espacio de 64 ks (17 horas 45 minutos), que llamaremos N_3 y que corresponderá a ruido y decaimiento de los emisores alfa sucesores del Pb-212.
4. Luego de 24 horas haremos un nuevo registro para medir principalmente el ruido, y llamaremos a esta medida N_4 .

Para determinar C_p a partir de la diferencia $N_3 - N_4$, necesitamos conocer λ_p , que no es obvio, y la eficiencia de conteo del Rn-220 relativo a aquel para sus hijos depositados.

Usando un nanocurie de Th-228 se obtuvo experimentalmente [1, 4] que para la geometría de la celda usada

$$C_h = (N_3 - N_4) / 11$$

Similarmente el número de cuentas, por mil segundos, debidas al ruido es:

$$B = (N_4 - 0,8 \times C_h \times 11) / 63,9$$

Finalmente integrando la ecuación para C_r entre los tiempos t_a y t_b tendremos:

$$C_r = \{N_2 - (C_h + B)(t_b - t_a)\} / \{(t_b - t_a) + (\theta_b - \theta_a)\}, \text{ con}$$

$$(\theta_b - \theta_a) = \lambda_r^{-1} \{ \exp(-\lambda_r t_b) - \exp(-\lambda_r t_a) \}$$

donde λ_r^{-1} es la vida media del Rn-222 y es de 476 ks. La conversión a cuentas perdidas se puede hacer utilizando los datos de calibración de una celda similar [1, 4], que se calibró realizando el conteo de una muestra de 1 pCi/g de uranio natural. En dicho trabajo, el número de cuentas registradas por 1 pCi/g de isótopo padre sobre el centellador de 42 mm de diámetro fue 4.88 cuentas por ks, cuando no se permitía la fuga del radón gaseoso, mientras que si se permitía la fuga del 100% del radón formado el número de cuentas registradas caía a 1.95 cuentas por ks. Luego, si la actividad del padre es C_u , y la fracción de radón que fuga es f_r , el número de cuentas registradas para la serie del uranio será:

$$\alpha_u = \{4,88 (1 - f_r) + 1,95 f_r\} C_u$$

lo cual significa que el número de cuentas no registradas, cuando fuga una fracción f_r del radón producido es:

$$g_r = 2,93 C_u f_r$$

cálculos similares para el Rn-220 arrojan:

$$g_h = 2,92 C_h f_h$$

donde para la serie del torio C_h y f_h son la actividad del padre y la fracción de radón que fuga, respectivamente.

Teniendo en cuenta que la velocidad a la que los átomos de Rn escapan de una muestra de m gramos de uranio natural es de $37 \times 0,9 C_u f_r m$ (ks^{-1}) en la celda se tendrá una velocidad de conteo en equilibrio de:

$$C_r = 0,39 \times 35,3 C_u f_r m$$

por ks y en consecuencia las cuentas perdidas debido al escape de Rn-222 y Rn-220 serán:

$$g_r = C_r / (4,7 m) \quad \text{y}$$

$$g_h = C_h / (3,2 m)$$

El escape de gas de una muestra en bloque (de ser posible con un grado de humedad similar al de las condiciones de enterramiento, en el caso de cerámicas arqueológicas) es diferente al observado en una muestra seca y pulverizada, como generalmente se utiliza en el conteo alfa, y por este motivo la velocidad de conteo α_0 registrada con el portamuestra sin sellar no puede ser usada para calcular la dosis anual, sin antes hacer la corrección respectiva. Si g_b es el número de cuentas perdidas por la misma muestra seca y pulverizada, la velocidad efectiva de conteo en las condiciones de enterramiento, para el caso de cerámicas arqueológicas será:

$$\alpha_b = \alpha_0 + g_c - g_b$$

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Presentamos como ejemplo los resultados obtenidos de los conteos realizados con una muestra de cerámica antigua [5]. La muestra estudiada fue un trozo de cerámica encontrada en la excavación del sitio arqueológico conocido como Balcón de Judas, localizado en el departamento de Ancash.

El conteo alfa para cálculo de dosis anual, realizado

con 18 g de muestra seca pulverizada medida en el portamuestra convencional, arrojó $\alpha_0 = 6.95$ cuentas por ks con el portamuestra abierto y $\alpha_1 = 8.15$ cuentas por ks con el portamuestra cerrado. Siendo la última velocidad de conteo 10% mayor que la primera, se hizo necesario usar la corrección propuesta.

El conteo en la celda de bronce, debía realizarse con un bloque de cerámica en las mismas condiciones de humedad en las que se encontraba la cerámica al momento de su extracción de la excavación, sin embargo por la falta de éste dato se procedió a saturar de agua un trozo sólido de cerámica de 1,2 g, que luego de dos días de remojo en agua registró un peso de 1,32 g. El peso del agua absorbida, 0,12 g, corresponde aproximadamente a 10% del peso seco de la muestra.

La muestra sólida se colocó dentro del portamuestra, sobre el soporte, y la celda se cerró herméticamente, se anotaron la fecha y hora exacta de sellado que corresponden a $t_0 = 0$.

Luego de cinco días iniciamos el conteo de N_2 , anotando la fecha y hora exacta del inicio del conteo, correspondientes a t_a medido con referencia a t_0 , registrando el número de cuentas cada 1000 s durante los cinco días siguientes. La fecha y hora exacta en la que se detuvo el conteo se registró correspondiendo a t_b medido con referencia a t_0 . En total para N_2 se registraron 1409 cuentas en 400 ks.

Se retiró la muestra y se cerró la celda, luego de esperar cuatro horas se reinició el conteo para obtener N_3 , que acumuló un total de 148 cuentas en 64 ks. Veinticuatro horas más tarde, se reinició el conteo obteniéndose 84 cuentas en 64 ks, valor de N_4 .

De éstos valores N_2 , N_3 y N_4 , obtuvimos los siguientes valores para C_h , B, C_r y g_r :

$$C_h = (N_3 - N_4) / 11 = 5,82 \text{ cuentas por } 64 \text{ ks}$$

$$B = (N_4 - 0,88 \times 11 \times C_h) / 64 = 0,51 \text{ cuentas por ks}$$

$$C_r = 4,03 \text{ cuentas por ks}$$

$$g_r = 0,72 \text{ cuentas por ks}$$

$$g_h = 0,02 \text{ cuentas por ks}$$

el número de cuentas g_b , perdidas por el escape del Rn gaseoso de la muestra entera y húmeda es:

$$g_b = g_r + g_h = 0,74 \text{ cuentas por ks}$$

La rutina se reinició esta vez con la muestra pulverizada y seca, usando 1,19 g de polvo, y obtuvimos en éste caso:

$N_2 = 1107$ cuentas en 503 ks
 $N_3 = 64$ cuentas en 64 ks
 $N_4 = 32$ cuentas en 64 ks
 $C_h = (N_3 - N_4) / 11 = 2.91$ cuentas en 64 ks
 $B = (N_4 - 0,88 \times 11 \times C_h) / 64 = 0,10$ cuentas por ks
 $C_r = 2,90$ cuentas por ks
 $g_r = 0,52$ cuentas por ks
 $g_h = 0,01$ cuentas por ks

de donde:

$$g_c = g_r + g_h = 0.53 \text{ cuentas por ks}$$

En consecuencia, siendo $g_b \neq g_c$, para datar la cerámica no se debe usar para el cálculo de la dosis anual el conteo $\alpha_0 = 6.95$ cuentas/ks, sino el conteo alfa efectivo obtenido tomando en consideración las condiciones de enterramiento (humedad):

$$\alpha_b = \alpha_0 + g_c - g_b$$

$$\alpha_b = 6,95 + 0,53 - 0,74 = 6,74 \text{ cuentas/ks}$$

En términos de dosis anual al considerar las series de uranio y torio en equilibrio, se produce una sobrevaluación 360 μGy por año.

CONCLUSIONES

Este método sugerido para la corrección de los cálculos de dosis anuales en datación de cerámicas, basado en la detección de partículas alfa, mostró en este trabajo ser eficaz en la detección de cantidades relativamente bajas de radón gaseoso emanado de muestras sólidas de cerámica. En los casos en los que la fuga de radón puede ser detectada es necesario realizar la corrección en el cálculo de la dosis anual, a fin de evitar los errores que producirían edades menores que las verdaderas.

Pese a su fácil aplicación, a la sencilla y poco costosa instrumentación necesaria, así como a la relativamente simple adquisición y manipulación de los datos, vemos como es posible hacer un estimado de las dosis radioactivas correspondientes al radón gaseoso emanado por el material cerámico, por lo que se desea implementar rutinas de conteo semejantes para la de-

tección del radón emanado de materiales de construcción como ladrillo, concreto o cemento, así como de muestras de los ambientes subterráneos de minas y pozos de agua, que de acuerdo con los últimos estudios pueden emanar radón gaseoso en cantidades suficientes para llegar a ser perjudiciales para la salud, justificando el diseño e implementación de estrategias de ventilación adecuadas para prevenir los efectos dañinos del radón aspirado en dichos ambientes por seres humanos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los técnicos del taller de mecánica de la Facultad de Ciencias de la UNI, por el torneado de las piezas y la construcción de la celda utilizada en este trabajo.

Agradecemos también al arqueólogo Dr. Richard Burger por proporcionarnos las muestras de cerámicas antiguas trabajadas en el Laboratorio de Datación de la Fac. de Ciencias de la UNI.

REFERENCIAS

1. Aitken M.J., "Thermoluminescent Dating", Academic Press (1985).
2. National Council on radiation protection and measurements, "Measurement of radon and radon daughters in air", NCRP report 97, (1988).
3. Turner R.C., Radley J.M, Mayneord W.V, "The alpha-ray activity of human tissues" The british Journal of Radiology Vol XXXI, 397-406 (1958).
4. Aitken M.J., "Radon Loss evaluation by alpha counting" PACT 2, 104-117 (1978).
5. Petrick S., "La efectividad del dosaje alfa, la fuga de radón y la extinción anómala en la datación de cerámicas por termoluminiscencia, técnica de los granos finos" Tesis de Licenciatura en Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, 1992.

