

ANÁLISIS POR ESPECTROMETRÍA GAMMA DE FERTILIZANTES DE USO EN COSTA RICA¹

Luis Guillermo Loría²/*, Ricardo Jiménez*, Mauricio Badilla*

Palabras clave: fertilizantes, uranio, torio, potasio, radio, isótopo.

RESUMEN

Utilizando la técnica de espectrometría gamma de bajo nivel, se cuantificó la actividad específica de isótopos naturales y artificiales presentes en fertilizantes de consumo nacional, suministrados por depósitos de insumos agrícolas. El isótopo de más relevancia encontrado en algunos de los abonos es el U^{235} , con una actividad específica muy superior a la esperada para este tipo de muestra, lo que hace suponer que este isótopo proviene de materia prima importada.

ABSTRACT

Gamma spectrometry analysis of fertilizers used in Costa Rica. Using the low level gamma spectrometry technique, the specific activity of natural and artificial isotopes present in national consumption fertilizers, supplied by local dealers, was quantified. The most outstanding isotope found in some of the fertilizers is ^{235}U , with an specific activity higher than the expected in this kind of product, which might mean that this isotope comes from imported raw material.

INTRODUCCION

Costa Rica se ha caracterizado por ser un país predominantemente cafetalero, de esta manera un aproximado de 1100 km² del territorio nacional se encuentra cultivado con café. Al igual que el cafeto, la caña de azúcar, los pastizales, los grandes sembradíos de árboles y plantas frutales, agotan paulatinamente el suelo, es por esta razón que se aplica al suelo fertilizantes con las más variadas fórmulas de acuerdo a las necesidades de cada uno de los cultivos.

Los fertilizantes fosfatados son usados en grandes cantidades alrededor del mundo, dado que son esenciales para la producción de alimen-

tos. La fuente natural del P para uso agrícola es la roca fosforada, asociada a roca caliza unida a pizarra marina (Einsensbud y Gessell 1997).

Es conocido desde principios del siglo XX que las rocas fosfóricas contienen altas concentraciones de U^{238} , tal como las rocas de los depósitos de la Florida, las cuales presentan hasta 41 ppm de U^{238} , en equilibrio secular con Ra^{226} .

En Estados Unidos, en 1974, se aplicó $2,6 \times 10^9$ kg de este mineral y la actividad del Ra^{226} alcanzó un valor de 37 TBq en equilibrio secular con U^{238} (Stowasser 1977). Estos isótopos presentan períodos de semidesintegración de 1600 y $4,5 \times 10^9$ años, respectivamente (Lederer *et al.* 1967).

1/ Recibido para publicación el 13 de marzo del 2002.
2/ Autor para correspondencia.
Correo electrónico: lloria@cariari.ucr.ac.cr

* Sección de Física Nuclear Aplicada, Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

El K es otro elemento que se añade al suelo como fertilizante. Este elemento posee como isótopo inestable al K^{40} , el cual es un emisor de partículas β^- ; β^+ y de radiación gamma de 1460,7 KeV, siendo su período de semidesintegración de $1,26 \times 10^9$ años. El esquema de decaimiento

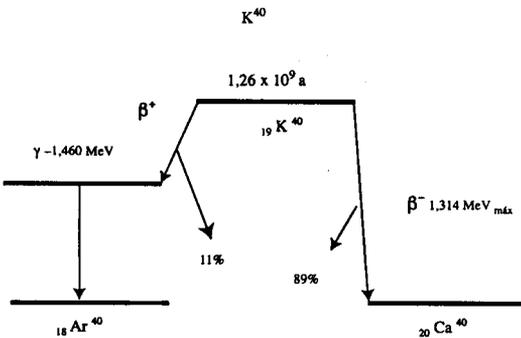


Fig. 1. Esquema de decaimiento del K^{40}

miento de este isótopo se muestra en la figura 1. Solo Estados Unidos a causa de la aplicación masiva de este isótopo como fertilizante, anualmente adiciona 110 TBq (3000 Ci) a los suelos.

Estudios en Alemania han demostrado que los fertilizantes fosfatados contribuyen en un incremento pequeño de la exposición a radiaciones externas con respecto a la radiación de fondo, que por término medio presenta un valor de $0,05 \mu\text{Gyh}^{-1}$. En cambio, la irradiación de ciertos individuos relacionados con la producción y comercio de fertilizantes, puede ser mucho mayor, ya que se han medido tasas de dosis absorbidas medias adicionales en el aire que van de 0,02 a $0,23 \mu\text{Gyh}^{-1}$. La inhalación del polvo procedente de los fertilizantes en sitios de expendio o por la manipulación de los mismos se traduce en dosis más altas (Pfister *et al.* 1976).

El hombre puede recibir una mayor contaminación por Ra^{226} cuando ingiere alimentos de origen animal, donde los animales son criados con plantas comestibles naturales, cultivadas en suelos con aplicaciones de fertilizantes fosfatados líquidos, que cuando el animal recibe productos fosfatados como suplemento.

En Estados Unidos se ha medido actividades específicas de Ra^{226} en alimentos, en un ran-

go que oscila entre $7-1600 \text{ Bqkg}^{-1}$, valores congruentes con la literatura (NNUU 1982).

En leches procedentes de vacas que recibieron el P como suplemento, la actividad específica del Ra^{226} medida en ese producto alcanzó 25 Bqm^{-3} , mientras que en las vacas que no recibieron este suplemento la actividad en sus leches alcanza de 3 a 10 Bqm^{-3} (Reid *et al.* 1977).

El objetivo de este trabajo fue determinar, utilizando la técnica de espectrometría gamma de bajo nivel, la actividad específica de los descendientes de U^{238} , Th^{232} , K^{40} y otros isótopos que por contaminación antropogénica aparecen en fertilizantes utilizados en Costa Rica.

MATERIALES Y METODOS

Materiales

Los fertilizantes analizados provienen de recolecciones realizadas en depósitos de insumos agrícolas de la Zona Norte de Cartago, así también como de los distribuidores de los mismos en la Ciudad de San José. Las materias primas de estos fertilizantes tienen su origen en el norte de Europa y Africa.

Los fertilizantes se trituran y tamizan a un tamaño de partícula de 0,5 mm para luego depositarlos en un recipiente de polietileno con una capacidad de 500 ml, conocido comercialmente como "marinelli flask", el cual posee una geometría que se adapta al detector de radiación, en este caso el detector es de germanio hiperpuro. La masa de cada muestra de fertilizante es de aproximadamente 0,50 kg.

Muestras de algunos de estos fertilizantes con una masa aproximada a 0,125 kg, se enviaron al Laboratorio Nacional de Argonne, en Estados Unidos, para que simultáneamente con el Laboratorio de Física Nuclear (LAFNA) de la Universidad de Costa Rica, se realizara la medición de la actividad específica en Bqkg^{-1} o en ppm, de los isótopos presentes en las muestras. Lo anterior tiene el propósito de verificar la presencia de U^{235} en las muestras y a su vez comparar los resultados obtenidos por ambos laboratorios.

Espectrometría gamma

El Laboratorio de Física Nuclear al igual que el Laboratorio Nacional de Argonne utilizan la técnica de espectrometría gamma de bajo nivel para determinar la actividad específica de los isótopos inestables presentes en la muestra.

El recipiente que contiene la muestra se coloca en el detector de germanio hiperpuro, el cual está blindado con plomo, plexiglas y cobre para minimizar la radiación ambiental y los rayos X del plomo dispersados, como se muestra en la figura 2. El detector es enfriado a la temperatura del N líquido para evitar el ruido térmico y está acoplado a un amplificador lineal, este a su vez se conecta a un convertidor analógico digital, el cual finalmente envía la señal hasta un analizador multicanal. En la figura 3 se muestra un esquema de la secuencia de análisis para espectrometría gamma de bajo nivel.

Las emisiones de radiación gamma de la muestra se recogen durante un tiempo de 18 h, con el propósito de alcanzar una buena estadística de conteo, que permita un análisis cuantitativo de las concentraciones de isótopos presentes, con un alto grado de precisión y con una baja cantidad mínima detectable (Mora y Salazar 1996, Salazar y Loría 1997).

Previo a la medición de la actividad de los isótopos presentes, se evalúa la radiación de fondo,

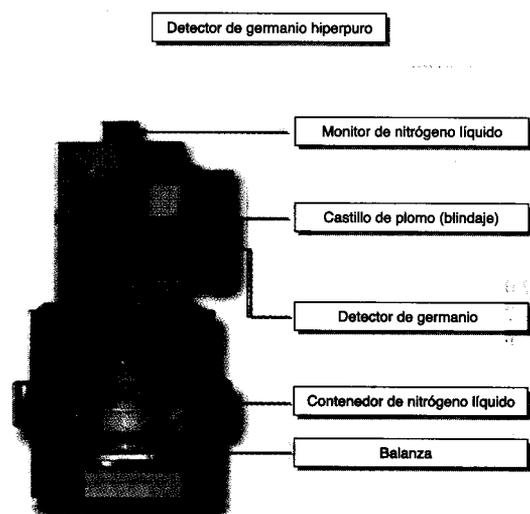


Fig. 2. Detector de germanio hiperpuro en su blindaje.

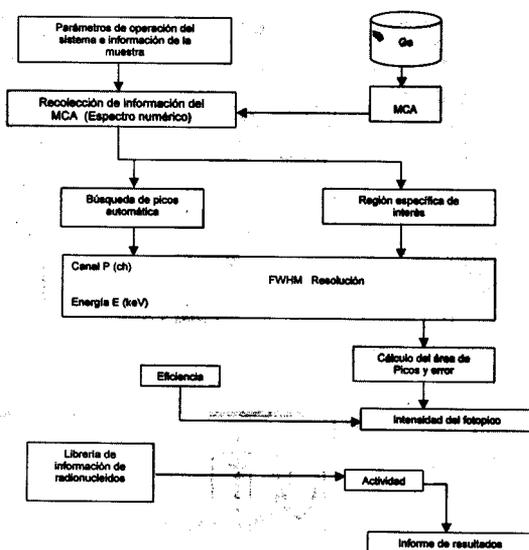


Fig. 3. Esquema de la secuencia del análisis mediante la técnica de espectrometría gamma.

esto es el espectro de radiación natural y la eficiencia de conteo del equipo. En la figura 4, se muestra un espectro de emisión gamma correspondiente a una de las muestras de fertilizante analizadas.

RESULTADOS

En el Cuadro 1 se muestra los resultados de las actividades específicas en Bqkg^{-1} de 12 fertilizantes analizados en el LAFNA, con la técnica de espectrometría gamma. Los resultados muestran la presencia de descendientes de U^{238} y Th^{232} . También se muestra la presencia de U^{235} , isótopo natural, cuya actividad específica está muy por encima del 0,7% de su abundancia natural con relación al U^{238} , a la cual se le estima su concentración a través del $\text{Pa}^{234\text{m}}$. Los fertilizantes no presentaron Ra^{226} , exceptuando 2 de ellos, no fue posible determinar su origen. El Cs^{137} no aparece en el cuadro 1 a causa de que los valores encontrados están por debajo de la cantidad mínima detectable, con un valor de $1,0 \text{ Bqkg}^{-1}$ en promedio. Algunos de los isótopos no se cuantifican debido a que son emisores alfa o beta, tal es el caso del U^{238} o Am^{241} .

En el cuadro 2 se presenta los resultados de la actividad específica en Bqkg^{-1} para 3 suelos

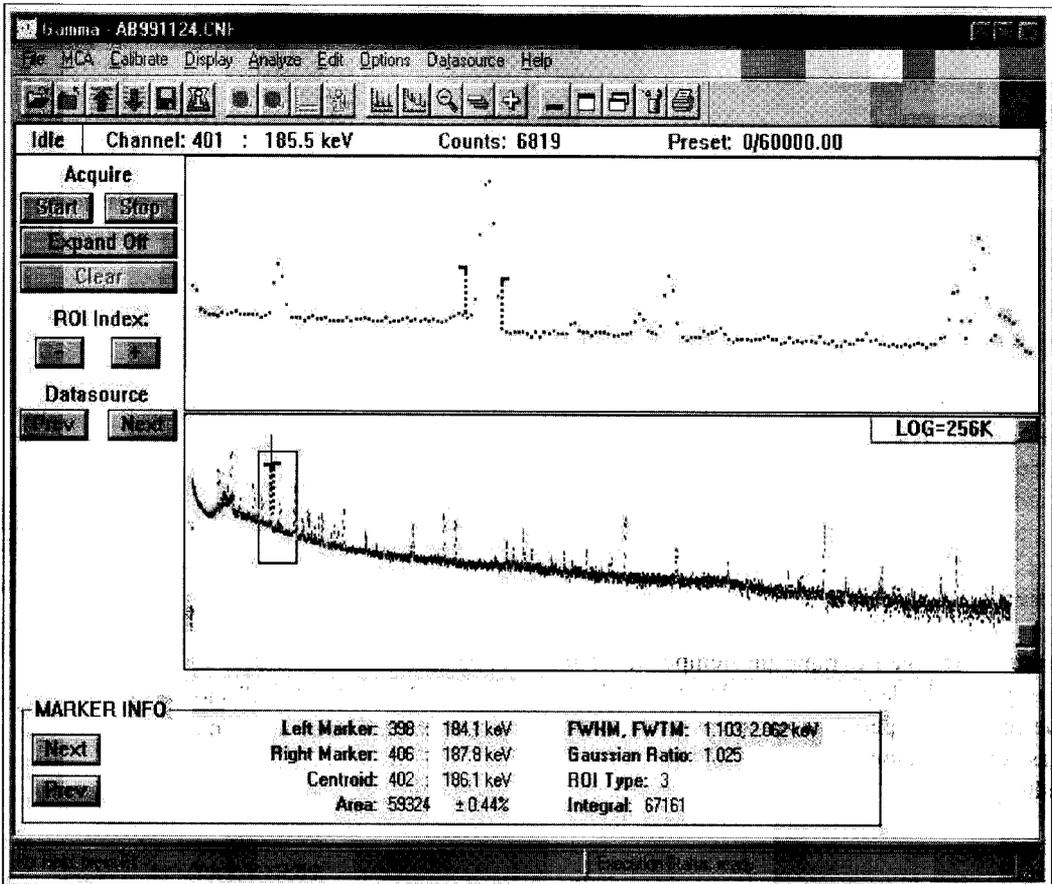


Fig. 4. Espectro de emisión del fertilizante 18-46-0 DAP.

Cuadro 1. Actividad específica en Bqkg^{-1} de los isótopos analizados con la técnica de espectrometría gamma del LAFNA, en 12 fertilizantes.

Fertilizante	K^{40}	Bi^{212}	Pb^{212}	Bi^{214}	Pb^{214}	Ra^{226}	Ac^{228}	$\text{Pa}^{234\text{m}}$	U^{235}
1	3900±306	7±1	6.6±0.7	20±1	20±1	n.d.	3.9±0.4	152±883	46±2
2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
3	38±9	21±1	24±3	14.6±0.6	191	n.d.	4.4±0.4	2643±149	82±4
4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
5	n.d.	n.d.	1.5±0.6	7.1±0.4	6.0±0.5	1.7±0.2	n.d.	n.d.	n.d.
6	146±17	n.d.	2.7±0.3	7.8±0.5	7.0±0.7	n.d.	4.2±0.3	n.d.	3.8±0.4
7*	7863±348	n.d.	2.0±0.3	24±1	211	n.d.	3.6±0.5	258±41	6.6±0.6
8*	5251±237	n.d.	n.d.	1.9±0.7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
9	4241±192	n.d.	1.1±0.2	10.3±0.6	9.4±0.6	n.d.	n.d.	312±37	6.9±0.6
10	3478±146	7±1	5.3±0.6	6.6±0.5	6.3±0.4	n.d.	3.8±0.4	329±37	8.8±0.7
11*	3280±145	7±1	4.2±0.6	6.7±0.5	5.7±0.5	111±15	3.4±0.4	280±32	8.5±0.7
12	3229±142	n.d.	n.d.						

* Fertilizantes analizados simultáneamente por el Laboratorio Nacional de Argonne, Estados Unidos.

n.d.= no detectable.

± = error estándar.

Cuadro 2. Actividad específica en Bqkg⁻¹ de los isótopos analizados con la técnica de espectrometría gamma en suelos y pastos.

Muestra	K ⁴⁰	Bi ²¹²	Pb ²¹²	Bi ²¹⁴	Pb ²¹⁴	Ra ²²⁶	Ac ²²⁸	Pa ^{234m}	U ²³⁵
Suelo 1	395±40	23±1	25±1	36±3	28±2	n.d.	29±2	n.d.	3±1
Suelo 2	377±40	22±3	26±4	34±4	29±5	12±2	29±5	n.d.	3±1
Suelo 3	411±72	19±3	26±4	36±6	30±5	18±4	28±5	n.d.	3±1
Pasto 1	1647±914	n.d.	2±2	16±23	2±2	n.d.	6±1	n.d.	n.d.
Pasto 2	1002±323	n.d.	11	31	41	n.d.	7±2	n.d.	n.d.
Pasto 3	1664±467	n.d.	11	34	11	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

n.d.= no detectable.

±= error estándar.

y 3 pastos analizados, del mismo sitio y procedentes de las Nubes de Coronado, San José, Costa Rica.

En los suelos estudiados aparecen los descendientes de U²³⁸, así como el U²³⁵ que se encuentra en una concentración 20 veces superior, con respecto a los valores establecidos en la literatura para suelos (Fisenne *et al.* 1987). Aunque no se muestra en el cuadro 2, el Cs¹³⁷ aparece en una concentración promedio para los suelos de 1,20±0,3 Bqkg⁻¹, mientras que en los pastos la concentración en las 3 muestras es en promedio de 0,55±0,03 Bqkg⁻¹. Este isótopo aparece en el suelo y plantas por deposición desde la atmósfera (Loría y Mora 1994).

El Pb²¹² y el Bi²¹², descendientes de Th²³² alcanzan entre sí un equilibrio secular, donde la razón entre sus actividades es próxima a la unidad. No hay equilibrio con los otros miembros de la cadena a causa de la liberación del Rn²²⁰ desde la muestra, por ser este un isótopo gaseoso. En cuanto a los isótopos Pb²¹⁴ y Bi²¹⁴ los mismos están en equilibrio, pero al igual que en la cadena

de Th, esta se rompe también a causa de la liberación del Rn²²².

El cuadro 3 presenta los resultados para 3 fertilizantes [07, 08, 11] analizados por el Laboratorio Nacional de Argonne. Este Laboratorio esta en capacidad de analizar otros isótopos presentes en los fertilizantes, ya que dispone de detectores de pozo y detectores de germanio de mayor volumen.

En cuanto al K⁴⁰, Cs¹³⁷ y U²³⁵, los resultados obtenidos en el Laboratorio de Argonne son semejantes a los medidos en el LAFNA, de la Universidad de Costa Rica.

Las actividades específicas de los descendientes de U²³⁸ y Th²³² cuantificadas en ambos laboratorios, no presentan grandes diferencias en cuanto a la determinación, aún cuando la medición de estos isótopos fue realizada en épocas diferentes, lo que provoca variaciones en las concentraciones por pérdida, como ya se mencionó, de los isótopos gaseosos.

El U²³⁸ se detectó solamente en la muestra 11 (Cuadro 3), aunque el Pa^{234m} se ve en las

Cuadro 3. Resultados en Bqkg⁻¹ para los 3 fertilizantes analizados en el Laboratorio Nacional de Argonne, Estados Unidos.

Fertilizante	K ⁴⁰	Bi ²¹⁴	Ra ²²⁶	Th ²³²	Cs ¹³⁷	U ²³⁸	U ²³⁵	Am ²⁴¹	Th ²³⁴
07	8288±370	37±05	39±05	<5	<1	n.d.	9±1	<2	180±6
08	5624±370	<10	<5	<4	<1	n.d.	n.d.	<2	<20
11	3471±170	10±02	100±02	6±1	<1	407±56*	10±1	<4	88±7

* 1 Bqkg⁻¹= 13 ppm

n.d.= no detectable.

±= error estándar.

muestras 07 y 11 (Cuadro 1), lo que indica claramente la presencia del U^{238} , pero la cuantificación de este último se hace difícil a causa de la interferencia del Ra^{226} , esto lleva a la necesidad de realizar una separación radioquímica de estos isótopos.

En la Figura 5 se presenta la concentración de K en los fertilizantes, en función de la actividad específica del K^{40} , la que muestra claramente que existe linealidad entre las 2 variables y ratifica que los porcentajes de K en los fertilizantes corresponden a lo expresado por el fabricante.

IMPLICACIONES

Las actividades específicas de los fertilizantes, medidos en el LAFNA y en el Laboratorio Nacional de Argonne, no presentan diferencias significativas. En ambos análisis se confirma la presencia de U^{235} en los mismos. Este isótopo es trasladado al suelo y como consecuencia a los pastos. La actividad específica medida es de origen antropogénica, dado que su valor supera los valores promedio esperados de la actividad específica en el suelo promedio.

Las concentraciones específicas de Ra^{226} no presentan valores que puedan inducir cambios abruptos en la concentración de este isótopo en el

suelo, ni en la concentración en los pastizales de consumo animal o en los vegetales de consumo humano.

La actividad del K^{40} en los fertilizantes es alta (Cuadro 1) si se compara con la actividad promedio en el suelo (400 Bqkg^{-1}), por lo que la acumulación de grandes cantidades de fertilizantes en los depósitos de insumos agrícolas, podría provocar que personal involucrado en el manejo de estos insumos se exponga a dosis equivalentes mayores de este isótopo.

A nivel ambiental en los sitios de estudio, las tasas de dosis alcanzan valores de $0,95 \text{ mSv}$ anuales, valor muy próximo al límite de dosis al público, establecido en 1 mSv año^{-1} , entendiéndose por público, aquellas personas ocupacionalmente no expuestas.

En las bodegas en las cuales se almacena los fertilizantes, se calculó dosis de $1,5 \text{ mSv año}^{-1}$; esto es una dosis ligeramente mayor que la del público, a causa de los isótopos presentes en los insumos. Este valor coincide con el calculado en Alemania, donde en promedio se obtuvo una dosis de $0,87 \text{ mSv}$ por encima del límite a público, en los sitios de almacenamiento.

Si se considera a los empleados de estos establecimientos como ocupacionalmente expuestos, entonces la dosis que reciben es menor del 10% de la dosis permitida al personal

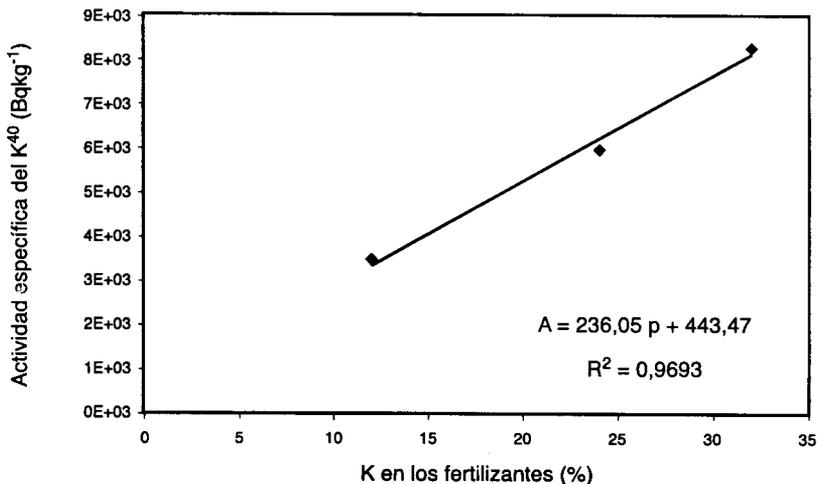


Fig. 5. Actividad específica de K^{40} en función de la concentración de K total en el fertilizante.

ocupacionalmente expuesto, la cual es de 20 mSv año⁻¹.

A efecto de considerar a este tipo de personal ocupacionalmente expuesto, entonces se le debe aplicar las regulaciones en esta materia y como primera medida deberían recibir un curso para el manejo de este tipo de material.

El LAFNA continua realizando estudios para mejorar la estadística de dosis recibidas por empleados de bodegas de fertilizantes, con el fin de establecer si estas personas pertenecen al grupo de personal ocupacionalmente expuestos y si lo fueran para que las autoridades competentes procedan de acuerdo a lo establecido en el manual de seguridad del Organismo Internacional de Energía Atómica (1997).

El U²³⁵ presente en los fertilizantes y cuya concentración es mayor que la esperada, debido a la componente de origen antropogénico, sigue siendo natural y sólo hasta que se realice estudios más profundos de dosis equivalente, el uso de los fertilizantes con contaminación de este isótopo, se considera una práctica exenta de regulaciones y por lo tanto no se establecen límites en su concentración.

El K⁴⁰ aparece en los fertilizantes en concentraciones muy superiores a las medidas en el suelo, pero al igual que el uranio es un isótopo natural por lo que no se le aplica limitaciones a su concentración.

En general, a la presencia de isótopos naturales no se le aplica limitaciones en cuanto a la concentración o dosis, pero si debe continuar el monitoreo de la radiación ambiental en los lugares en que se utilizan fertilizantes, para evitar que la dosis al público supere el valor internacional de 1 mSv anual.

GLOSARIO

Uranio: Símbolo U, número atómico 92. Los isótopos de mayor abundancia que se encuentran en la naturaleza son los de masa atómica 235 y 238, que se representan por U²³⁵ y U²³⁸. La abundancia isotópica de ambos isótopos es de 99,28 y del 0,7%, respectivamente en la naturaleza.

Torio: Símbolo Th, número atómico 90. Abundancia isotópica 100% y se representa por Th²³².

Pb²¹²: isótopo inestable del plomo, con masa 212 y un semiperíodo de 10,64 h, descendiente del Th²³² en su proceso de decaimiento.

Bi²¹²: isótopo inestable del bismuto, con masa atómica 212 y un semiperíodo de 47 min, descendiente del Th²³² en su proceso de decaimiento.

Ac²²⁸: isótopo inestable del actinio, con masa atómica 228 y un semiperíodo de 6,13 h, descendiente del Th²³² en su proceso de decaimiento.

Pb²¹⁴: isótopo inestable del plomo, con masa atómica 214 y un semiperíodo de 26,8 min, descendiente del U²³⁸ en su proceso de decaimiento.

Bi²¹⁴: isótopo inestable del bismuto, con masa atómica 214 y un semiperíodo de 19,8 min, descendiente del U²³⁸ en su proceso de decaimiento.

Ra²²⁶: isótopo inestable con masa atómica 226 y un semiperíodo de 1600 años, descendiente de U²³⁸ en su proceso de decaimiento.

Pa^{234m}: isótopo inestable con masa atómica 234 y un semiperíodo de 6,75 h, descendiente del U²³⁸ en su proceso de desintegración.

K⁴⁰: isótopo inestable del potasio con masa atómica 40 y un semiperíodo de 1,26x10⁹ año⁻¹.

Am²⁴¹: hija del Pu²⁴¹. El Pu²⁴¹ se obtiene en el reactor nuclear por sucesivas capturas neutrónicas del U²³⁸.

Actividad: se refiere a la rapidez con que se transforman los átomos de una especie radiactiva en otra. La actividad se mide en Bequerelios y simbólicamente se expresa por Bq. La actividad específica se mide en Bqkg⁻¹ o en Bql⁻¹. Hasta hace algunos años la actividad se medía en Curies, cuyo símbolo es Ci. 1 Ci=3,7x10¹⁰ Bq.

Dosis: Medida de la radiación recibida o absorbida por un blanco. Esta magnitud se mide en Julios sobre kg.

Dosis absorbida: Es la energía media impartida por la radiación ionizante sobre la materia. Esta magnitud se mide en una unidad denominada Gray y cuyo símbolo es Gy. $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Jkg}^{-1}$.

Dosis equivalente: Es el producto de la dosis absorbida y un factor que toma en cuenta el tipo de radiación ionizante. Esta magnitud se mide en Sievert, cuyo símbolo es Sv.

Público: Se refiere a aquellas personas que en virtud de su ocupación no están expuestas a las radiaciones ionizantes. La dosis máxima permisible para ellas es de 1 mSv anual.

Personal ocupacionalmente expuesto: se refiere a aquellas personas que operan máquinas o fuentes de radiación. La dosis equivalente máxima que pueden recibir no debe superar 20 mSv anuales.

Prefijos utilizados: (m) corresponde a la milésima parte, T corresponde a 10 elevado a la potencia 12.

Semiperíodo: se refiere al tiempo que debe transcurrir para que la mitad de los átomos de una especie radiactiva se transformen en otra especie radiactiva o en una especie estable. Esta magnitud se mide en cualquiera de las unidades de tiempo. El símbolo utilizado para esta magnitud es $t_{1/2}$.

Equilibrio secular: Si la razón de la actividad de padre e hija alcanza el valor de uno, se dice que padre e hija se encuentran en equilibrio secular. Para alcanzar este equilibrio se requiere que $t_{1/2}$ del padre sea mucho mayor que $t_{1/2}$ de la hija.

AGRADECIMIENTOS

Los autores dejamos patente nuestro agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, por su apoyo a través del Proyecto 112-A0-019, así como a la

Agencia Internacional de Energía Atómica y al personal del Laboratorio de Espectrometría Gamma del Laboratorio Nacional de Argonne, por el soporte técnico, en equipo y estándares para calibración.

LITERATURA CITADA

- EISENBUD M., GESSELL T. 1997. Environmental radioactivity from natural, industrial and military sources. Academic Press. p. 172.
- FISSENE I., WELFORD G., PERRY P., BAIRD R., KELLER H. 1978. Distributional ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb and ^{210}Po in soil. Environmental Instruments (1):245-246.
- LEDERER C., HOLLANDER J., PERLMAN I. 1967. Table of isotopes, 6th Edition, John Wiley and Sons Inc. p. 174.
- LORIA L., MORA P. 1994. Specific activity and derived intervention levels for Cesium 137 in Costa Rican export goods: tuna fish, coffee and powdered milk. Radiation Measurements 23(4):731-736.
- MORA P., SALAZAR A. 1996. Natural radioactivity in soil samples in Costa Rica. Journal of Traces and Microprobe Techniques 14(2):727-738.
- NNUU. 1982. La radiación ionizante: Fuentes y efectos biológicos. Informe a la Asamblea General de las Naciones Unidas. New York, 1982.
- OIEA. 1997. Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra las radiaciones ionizantes y para la seguridad de las fuentes de radiación. Viena, AIEA. Colección Seguridad 115. p. 17.
- PFISTER H., PHILLIP G., PAULY H. 1976. Population dose from natural radionuclides in phosphate fertilizers. Radiation and Environmental Biophys. 13:147-261.
- REID D., SACKETT G., SPALDING R. 1977. Uranium and radium in livestock feed supplements. Health Physics 32:535-540.
- SALAZAR A., LORIA L. 1997. Control de calidad en espectrometría gamma de bajo nivel. Ciencia y Tecnología 21(1):35-44.
- STOWASSER W. 1977. Phosphate rocks in 1975. Mineral yearbook, U.S. Bureau of Mines. p. 173.