

Calibración semi-empírica de un detector de germanio hiperpuro para mediciones in situ de radionúclidos naturales

Daniel Hernández Ramírez, Carlos Ríos Martínez, José Luis Pinedo Vega,
Anahid Zharazan López Espinosa, y Vargas Hurtado Mauricio

Unidad Académica de Estudios Nucleares,
Universidad Autónoma de Zacatecas “Francisco García Salinas”,
Calle Cipres No.10, la Peñuela 98060, Zacatecas, Zac.

dhernandez@uaz.edu.mx

Resumen: Se realizó una calibración de eficiencia para el sistema de espectrometría gamma in situ GeRe-3522 de la Unidad Académica de Estudios Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas. La calibración consiste en calcular tres factores que describen la respuesta del detector, para una energía determinada, en la geometría in situ; la eficiencia a un haz paralelo de fotones en la línea central del detector, el flujo de fotones que arriban al detector por unidad de actividad en el suelo y el factor de corrección angular. Al tener estos tres factores, para cada energía de los rayos gamma de interés, es posible determinar la actividad específica de los radionúclidos presentes en el medioambiente a partir de mediciones in situ.

Palabras clave: Calibración, espectrometría, gamma.

Abstract: An efficiency calibration was carried out for the GeRe-3522 in situ gamma spectrometry system of the Academic Unit for Nuclear Studies from the Autonomous University of Zacatecas. The calibration consists of calculating three factors that describe the response of the detector, for a given energy, in the in situ geometry; the efficiency at a parallel beam of photons in the centerline of the detector, the flux of photons arriving at the detector per unit of activity in the ground and the angular correction factor. By having these three factors, for each gamma ray energy of interest, it is possible to determine the specific activity of radionuclides present in the environment from in situ measurements.

Keywords: Calibration, spectrometry, gamma.

1. Introducción

El monitoreo de la concentración de radionúclidos naturales y antropogénicos en el medioambiente es importante debido a que su radiación puede tener severas implicaciones para la salud humana, conocer los niveles de radiactividad es de gran importancia para la evaluación de las interacciones y los efectos de la radiación en los humanos [1], por lo que es esencial contar con métodos exactos para determinar los niveles de actividad en el medioambiente, como preparativos para situaciones de emergencia y a una escala de tiempo mayor, para obtener un mapeo radioecológico.

Existe una diferencia importante entre el monitoreo medioambiental con propósitos radioecológicos y con propósitos de preparación para emergencias. El primero requiere incertidumbres de medición pequeñas con el objetivo de detectar pequeños cambios con el tiempo, y la necesidad de resultados rápidos posiblemente es de menor importancia. En la preparación para emergencias la velocidad para obtener resultados es esencial. Sin embargo, la necesidad de bajas incertidumbres puede no ser tan importante. Existe un compromiso, entre la velocidad y la simplicidad por un lado y, bajas incertidumbres por el otro. Es importante hacer notar que cada escenario en particular debe tener su propio conjunto de parámetros y demandas, el cual se gobierna

con el compromiso que se debe hacer, y cual método de medición es el mejor y más adecuado para las condiciones de medición [2].

Los dos métodos más ampliamente usados para la determinación de los niveles de radiación en suelos son la espectrometría in situ de rayos gamma usando detectores de germanio hiperpuro y el muestreo en suelos [3]. En la actualidad los detectores de germanio hiperpuro (HPGe) son con frecuencia la mejor opción para las mediciones in situ debido a su resolución en energía superior. Este es uno de los métodos más exactos y efectivos para la medición de radionúclidos emisores gamma en suelos. Sin embargo, para obtener un factor de calibración exacto para la eficiencia de conteo es necesario conocer la eficiencia intrínseca del detector y la respuesta angular, así como la distribución en profundidad de la fuente radiactiva [4]. Cuando la eficiencia intrínseca y la respuesta angular es determinada en forma empírica y la fluencia de fotones es determinada analíticamente para una distribución en particular de la fuente radiactiva, los métodos de calibración se denominan semiempíricos [2].

La espectrometría in situ de rayos gamma es un poderoso método que puede identificar y potencialmente cuantificar radionúclidos directamente en el sitio de medición en forma rápida y en tiempo real [5]. Este es un método rápido que automáticamente integra la información sobre grandes áreas y, por lo tanto, proporciona valores promedio confiables. Sin embargo,

la espectrometría in situ de rayos gamma es una técnica compleja que requiere equipamiento costoso y usuarios con experiencia. El cálculo de los factores de calibración necesarios introduce una gran incertidumbre ya que se hacen suposiciones sobre la distribución en profundidad de los radionúclidos y sobre la densidad de los suelos [3].

Aunque la respuesta de un detector a los fotones que inciden de forma normal provee una medida general de la sensibilidad para mediciones in situ, una calibración real y completa del detector para la mayoría de las aplicaciones implica la respuesta a otros ángulos de incidencia debido a que generalmente en las determinaciones medioambientales se miden grandes áreas en lugar de fuentes puntuales. En estas circunstancias los fotones pueden incidir por la pared lateral del detector, y posiblemente con trayectorias diferentes a los incidentes normalmente. Por esta razón, se deben tomar algunas consideraciones respecto a la forma del cristal, el tamaño del dewar y la orientación del detector en la medición de campo [6].

Cualitativamente, la respuesta angular de una fuente puntual alrededor del cristal es el resultado de la variación de tres factores: a) el ángulo sólido geométrico del detector; b) la distribución de la longitud de trayectoria a través del volumen sensible del detector; y c) la atenuación de los fotones entre la fuente y el detector [7]. Uno de los primeros métodos de calibración en eficiencia para mediciones in situ fue desarrollado por Beck y que se encuentra plasmado en el reporte 53 del International Commission on Radiation Units and Measurements [6, 8, 9].

En este método se utiliza una ecuación para estimar la razón de conteo a la energía de interés por unidad concentración de actividad en un medio, $\frac{\dot{N}}{A_s}$. La ecuación es:

$$\frac{\dot{N}}{A_s} = \frac{\dot{N}}{\dot{N}_0} \times \frac{\dot{N}_0}{\varphi} \times \frac{\varphi}{A_s} \quad (1)$$

donde, $\frac{\dot{N}}{\dot{N}_0}$ es el factor de corrección angular para una fuente con una distribución dada en el medio determinado, $\frac{\dot{N}_0}{\varphi}$ es la razón de conteo del pico de energía total por unidad de flujo (fotones por unidad de área por unidad de tiempo) para un haz paralelo de fotones que inciden normalmente a la cara del detector y $\frac{\varphi}{A_s}$, es el flujo total de fotones a la energía de interés que arriba al detector por unidad de actividad en el suelo.

La probabilidad de que un fotón incidente deposite completamente su energía dentro del volumen activo del detector depende del ángulo de incidencia con el detector y de la energía del fotón incidente. Para una sola energía, esta probabilidad es descrita por la función de respuesta angular del detector $\left(\frac{\dot{N}(\theta)}{\dot{N}_0}\right)$.

El factor de corrección angular, $\frac{\dot{N}}{\dot{N}_0}$, es la integral de la función de respuesta angular de $0-\pi/2$ rads para una fuente específica. El valor de $\frac{\dot{N}(\theta)}{\dot{N}_0}$ es medido ubicando fuentes puntuales a varios ángulos de la línea central del detector y haciendo mediciones corregidas por

fondo de la razón de conteo a la energía de los picos de energía total del isótopo de interés.

El factor $\frac{\dot{N}_0}{\varphi}$ es comúnmente conocido como la eficiencia del detector en la línea central. Esta representa la probabilidad de que el fotón incidente de forma normal sobre la cara del detector deposite toda su energía dentro del volumen activo del detector. Esta es calculada colocando fuentes puntuales de un rango de energías a una distancia lejana del detector de tal manera que los fotones se consideren que arriban de forma paralela al detector. La medición de la tasa de conteo a cada energía es ajustada a una curva y esta es usada para determinar $\frac{\dot{N}_0}{\varphi}$ a cualquier energía. El valor de $\frac{\varphi}{A_s}$ no depende del detector y es determinado por examinación de tablas de valores previamente calculadas. Estos valores fueron calculados por Beck usando métodos Monte Carlo, métodos analíticos, y mediciones de laboratorio. Los resultados están disponibles para un rango de fuentes distribuidas exponencialmente en el suelo. La única variación en la composición del suelo que se toma en cuenta es la humedad. Solo una composición del suelo es usada para todos los cálculos [10].

2. Materiales y Métodos

Con el objetivo de estimar la eficiencia para mediciones in situ de nuestro sistema de detección se midió la respuesta angular como la razón de conteo (área bajo el pico de energía total) de diferentes energías de la una fuente de europio-152 por unidad de razón de fluencia relativas a la incidencia de fotones normal a la cara del detector $\left(\frac{\dot{N}(\theta)}{\dot{N}_0}\right)$ para ángulos desde 0° hasta 90° en intervalos de 10° .

2.1 Materiales

2.1.1. Sistemas de detección: el sistema de espectrometría gamma portátil GeRe-3522, está construido por componentes que contribuyen a la detección, procesamiento e identificación de los pulsos característicos proporcionados por los rayos gamma de los radioisótopos que interactúan con el detector semiconductor. Cada uno de los componentes que conforman el Sistema GeRe-3522 se describen a continuación:

1. Cristal de Ge hiperpuro (3522): El detector tiene una eficiencia relativa de 35% respecto a un cristal de NaI(Tl) 3 X 3 pulgadas y una resolución (FWHM) de 2.2 keV, ambas para la energía de 1332.5 keV del ^{60}Co .
2. Preamplificador 2002 CSL: dispositivo electrónico de reducidas dimensiones adyacente al detector, el cual facilita la transmisión de los pulsos de detección a los siguientes equipos de procesado.
3. Dewar portátil: el detector de germanio hiperpuro de electrodo inverso, así como el preamplificador 2002 CSL adyacente a él, se encuentran montados en un dewar portátil, figura 1. El dewar portátil Big MAC (Multi Attitude Cryostat) tiene la ventaja de adoptar diferentes posiciones en las cuales se puede colocar el dewar sin que se pierda el LN₂, su tamaño es

pequeño y compacto lo cual proporciona una versatilidad al momento de ser empleado en cualquier lugar, especialmente al hacer las mediciones in situ.

2.1.2. Gabinete NIM portátil modelo 100: proporciona energía eléctrica a los módulos:

1. Fuente de alto voltaje Canberra 3106D: proporciona el alto voltaje empleado para la polarización del detector, siendo en este caso -4000 V.
2. Amplificador espectroscópico modelo 2022 marca Camberra: La amplitud de la señal de salida del preamplificador sensible a carga está en el rango de los mV, la cual es amplificada a un rango de 0.1 – 10 V con el amplificador espectroscópico.

2.1.3. ADC (Convertidor Analógico Digital) y MCA (Analizador Multicanal) en una tarjeta de adquisición Accuspec-A de 32 kB de memoria marca Camberra: el convertidor analógico digital mide la amplitud máxima del pulso analógico proveniente del amplificador y lo transforma en un número digital, asignando al valor digital un canal específico en el analizador multicanal. El SEG-GeRe-3522 emplea un ADC Wilkinson, con una memoria para 8000 canales. En este tipo de ADC, el tiempo empleado para transformar la señal es proporcional a la energía (amplitud) del pulso. El ADC y MCA se encuentran confinados en una tarjeta interface ISA de adquisición (Acquisition Interface Board) AccuSpect-A.

2.1.4. Computadora para la adquisición de espectros: A través de este equipo se visualizan las señales debidamente procesadas y registradas en el espectro. El software empleado para la adquisición y análisis de los espectros de rayos gamma es Genie-2000 [11], dicho software presenta funciones tales como el control del analizador multicanal, la exhibición y manipulación del espectro de rayos gamma, así como el análisis y reporte de dichos espectros.

2.1.5. Trípode del detector: el trípode del detector es empleado para analizar las mediciones de radiación en campo y en laboratorio. El trípode modelo 7413, cuenta con patas deslizables para ajustar la altura del soporte según sea necesario. Las puntas del trípode son puntiagudas para que sean enterradas en el suelo y de esta forma estabilizar el detector.

2.1.6. Sistema para posicionar la fuente radiactiva: se creó un sistema para posicionar la fuente de europio-152 que cuenta con tres ejes en geometría trigonal plana, cada uno de estos ejes coloca la fuente alrededor del detector en diferentes ángulos (0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80° y 90°) a una distancia constante de 45 cm al centro del cristal del detector.

2.1.7. Fuente radiactiva de Europio-152: fuente certificada de rayos gamma de europio-152, suministrada por Medidores Industriales y Médicos S.A. de C.V., con una actividad de 1.036 μCi (38.33 kBq) al 15 de noviembre del 2015 a las 12:00 pm, con una incertidumbre total del 3%, con base de epóxido y cubierta de acrílico, con un diámetro activo de 5 mm formada a partir de una sal evaporada del metal.

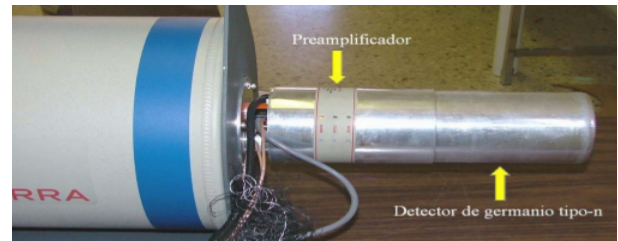


Fig. 1. Detector de Germanio tipo-n, preamplificador y Dewar.



Fig. 2. Gabinete NIM portátil modelo 100.



Fig. 3. Sistema GeRe-3522.

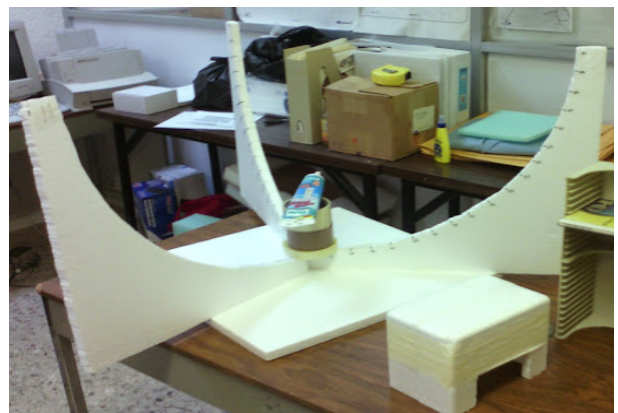


Fig. 4. Sistema para posicionar la fuente radiactiva en diferentes ángulos a una distancia fija del centro del detector.



Figura 5. Fuente radiactiva de europio-152.



Fig. 6. Montaje experimental para la adquisición de radiación de fondo natural.

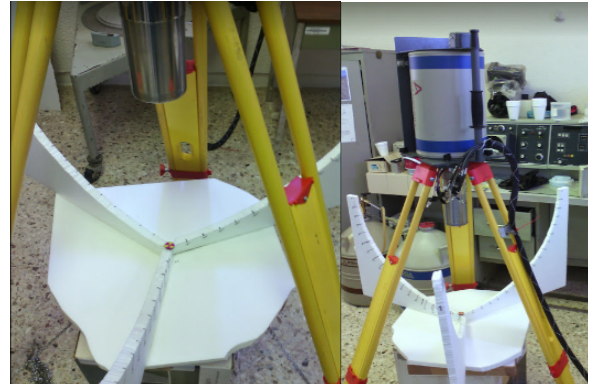


Fig. 7. Medición de la respuesta frontal del detector.

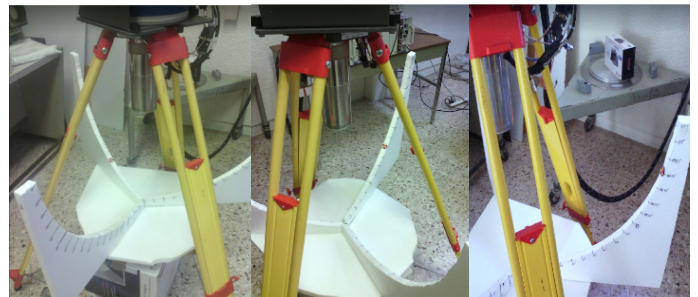


Fig. 8. Medición de la respuesta angular.

2.2 Método

1. Montaje del detector frío en el tripié sobre el dispositivo posicionador de la fuente radiactiva y conexiones.
2. Adquisición de radiación de fondo por un periodo de 252,300 segundos, con un voltaje de 4000 Volts en polaridad negativa, ganancia gruesa de 10, ganancia fina de 0.61, tiempo de formación de pulsos de 4 μ s.
3. Medición de la fuente de europio-152 a una distancia de 45 cm del centro del detector (a un ángulo polar de 0°) por un período de 7,200 segundos.
4. Medición de la fuente de europio-152 a una distancia de 45 cm del centro del detector a los ángulos polares de 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° , 70° , 80° y 90° , en tres ejes de geometría trigonal plana por periodos de 7,200 segundos.
5. Calibración de los espectros en energía. Esta calibración establece la relación existente entre el número del canal que se asigna en el multicanal y la energía de los fotones gamma. Para esto se seleccionaron 14 picos bien definidos que aparecen en el espectro de fondo.
6. Análisis de los espectros y determinación de la respuesta del detector a cada pico de energía total de interés, que son los que no tienen interferencias con los picos de fondo y con altas probabilidades de emisión.
7. Cálculo de la respuesta angular relativa a la respuesta frontal, como la razón entre la respuesta del detector, a cada energía, en los diferentes ángulos y la respuesta frontal.

Tabla 1. Energía de los rayos gamma del europio-152 de mayor probabilidad de emisión

Energías de los rayos gamma del europio-152 (keV)	Probabilidad de emisión
121.781	0.2853
244.6974	0.0755
344.2785	0.2659
411.116	0.02237
443.956	0.03125
688.67	0.00856
778.9045	0.1293
867.38	0.0423
964.057	0.1451
1085.837	0.1011
1112.076	0.1367
1212.948	0.01415
1408.013	0.2087

3. Resultados

En la figura 9 se muestra un espectro característico de las mediciones de la fuente de europio-152 con fondo y sin fondo, en la figura 10, donde se aprecia la presencia de varios picos de energía total de esta fuente, que fueron usados para hacer la determinación de la respuesta angular.

En la figura 11 se muestra la respuesta angular (de 0° hasta 90°) relativa a la respuesta frontal (0°) para las energías de los rayos gamma seleccionados de la fuente de europio-152.

En concordancia con el ICRU-53 el factor de calibración para las mediciones *in situ*, es decir la relación entre la razón de conteo en algún pico de energía total, \dot{N} (s^{-1}) y la actividad por unidad masa A_s ($Bq\ kg^{-1}$), se puede expandir como en la ecuación 1, donde \dot{N}_0 es la razón de conteo en algún pico de energía (s^{-1}) para los fotones que inciden en forma normal a la cara del detector, y φ es la razón de fluencia de fotones sobre el detector ($cm^{-2}\ s^{-1}$). Aunque la actividad específica es expresada en términos de actividad por unidad de masa en la ecuación anterior, el resultado final se puede recalculer fácilmente en unidades de actividad por unidad de área o de volumen.

El primer término del lado derecho de la ecuación 1 representa un factor de corrección para la respuesta angular del detector, y el segundo término representa la respuesta frontal (0°) del detector a una energía determinada de fotones y el tercero la razón de fluencia de fotones primarios en aire por unidad de actividad en suelo. El uso de dos factores de corrección para la dependencia angular y de energía es el método prevaeciente para la calibración en mediciones *in situ* [3].

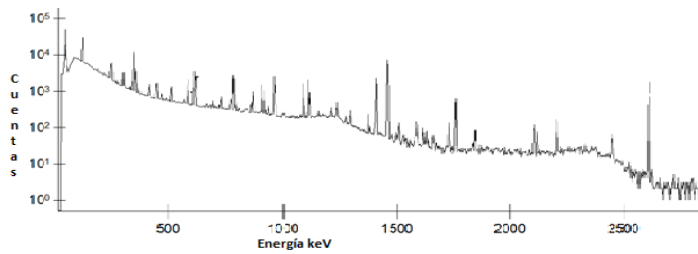


Fig. 9. Espectro con fondo de la fuente de europio-152 en escala log.

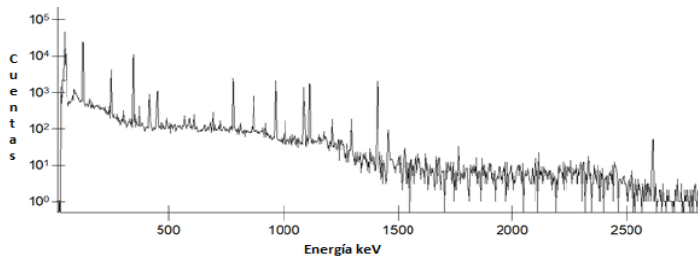


Fig. 10. Espectro sin fondo de la fuente de europio-152 en escala log.

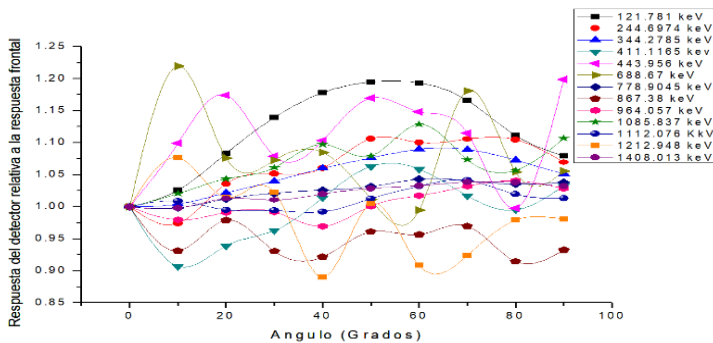


Fig. 11. Respuesta angular del sistema GeRe-3522 para las energías del europio-152.

3.1 Respuesta del detector por unidad de fluencia en función de la energía del rayo gamma

La respuesta del detector por unidad de razón de fluencia de fotones gamma de energía E, que inciden en forma paralela en la cara frontal del detector, puede ser expresada como $\varphi(E)$ donde φ es la razón de conteo del pico de energía total (s^{-1}) el cual se determina en forma empírica y φ_0 es la razón de fluencia ($cm^{-2}\ s^{-1}$) de los fotones de energía E, está última dada por:

$$\varphi = C(E)p(E)A(4\pi r^2)^{-1} \quad (2)$$

donde C(E) es un factor numérico que toma en cuenta el efecto de atenuación de la fuente por el aire que se encuentra entre la fuente radiactiva y el detector, p(E) es la probabilidad de emisión de los fotones de energía E por desintegración ($s^{-1}Bq^{-1}$), A es la actividad de la fuente (Bq) y r es la distancia de la fuente al detector (cm), que se recomienda que sea de 100 ó 200 cm, pero por cuestiones técnicas utilizamos una distancia de 45 cm.

La razón de conteo se determinó para diferentes picos de energía total que cubren sólo una parte del rango de energía de operación del equipo, se usó la fuente de europio-152 descrita en la sección de materiales.

La respuesta por unidad de fluencia se graficó en función de la energía y se realizó una regresión utilizando una función potencial con la cual se interpolaron los valores de la respuesta por unidad de fluencia para las energías recomendadas por Fernando de la Torre [13] que están dentro del rango de energías de la determinación experimental y que corresponden a emisores gamma naturales.

3.2 Factor de corrección angular de la respuesta del detector

Este factor toma en cuenta que la fluencia de los fotones emitidos por una fuente extendida no es normal a la cara del detector, que tiene una distribución en un rango determinado de ángulos. Este factor es dependiente de las características del detector y de la geometría de la fuente. Se calcula como el promedio ponderado de la respuesta normalizada de los picos de energía total entre la razón de fluencia de fotones en función del ángulo, $\frac{\dot{N}(\theta)}{\dot{N}_0}$, que es la respuesta angular, sobre la distribución de la razón de fluencia en $\cos \theta$, $\varphi_{\cos \theta}$

$$\frac{\dot{N}}{\dot{N}_0} = \frac{1}{\varphi} \int_{\cos \theta_1}^{\cos \theta_2} \varphi_{\cos \theta} \frac{\dot{N}(\theta)}{\dot{N}_0} d \cos \theta \quad (3)$$

Los límites de integración de esta ecuación para la geometría de medición usada son 0° y 90° .

Tabla 2. Energías e información requerida para calcular la respuesta del detector por unidad de fluencia (\dot{N}_0/φ)

Energía (keV)	Probabilidad de emisión	Coefficiente de atenuación lineal (cm-1) en aire seco a 1 atm. [12]	Factor de atenuación C (E)	Razón de fluencia φ (cm-2s-1)	Respuesta del detector por unidad de tiempo (s-1)	Respuesta del detector por unidad de fluencia (cm2)
121.781	0.2853	1.75488E-04	0.9921	0.4148	12.0806	29.12
244.6974	0.0755	1.48868E-04	0.9933	0.1099	2.2365	20.35
344.2785	0.2659	1.3464E-04	0.9939	0.3873	6.2846	16.23
411.116	0.02237	1.26309E-04	0.9943	0.0326	0.4813	14.76
443.956	0.03125	1.22536E-04	0.9945	0.0455	0.5558	12.20
688.67	0.00856	1.00144E-04	0.9955	0.0125	0.1164	9.32
778.9045	0.1293	9.39485E-05	0.9957	0.1887	1.6585	8.79
867.38	0.0423	8.86859E-05	0.9960	0.0617	0.5226	8.47
964.057	0.1451	8.36981E-05	0.9962	0.2118	1.5690	7.41
1085.837	0.1011	7.83398E-05	0.9964	0.1476	0.9958	6.75
1112.076	0.1367	7.73001E-05	0.9965	0.1996	1.3560	6.79
1212.948	0.01415	7.36268E-05	0.9966	0.0207	0.1401	6.78

Tabla 3. Respuesta por unidad de fluencia interpolada para las energías dentro del rango de estudio de los emisores naturales

Serie radiactiva	Radio-núcleo	Energía (keV)	Respuesta por unidad de fluencia interpolada (\dot{N}_0/φ) (cm ²)
U-238	Pb-214	295.39	17.09
U-238	Pb-214	351.95	15.17
Th-232	Tl-208	583.33	10.77
U-238	Bi-214	609.61	10.45
Th-232	Tl-208	860.69	8.27
Th-232	Ac-228	911.42	7.95
Th-232	Ac-228	969.08	7.63

$$\frac{\dot{N}}{\dot{N}_0} = \frac{1}{\varphi} \int_{\cos \theta_1}^{\cos \theta_2} \varphi_{\cos \theta} \frac{\dot{N}(\theta)}{\dot{N}_0} d \cos \theta \quad (3)$$

Los límites de integración de esta ecuación para la geometría de medición usada son 0° y 90°.

3.3 Distribución de los radionúclidos en el suelo

Para muchas aplicaciones de la espectrometría gamma in situ, una buena aproximación de la distribución de la muestra es la de un espacio semi infinito con una concentración homogénea de la fuente en el plano horizontal y que sólo varía con la profundidad del suelo. En la práctica un espacio semi infinito puede ser una gran área de suelo abierto (de un radio que puede ser de 10 a 70

m) donde existen pocas obstrucciones (naturales o antropogénicas). Para radionúclidos naturales (series del uranio, del torio y el potasio-40) se asume una concentración uniforme respecto a la profundidad [6] (que equivale a una distribución exponencial con masa de relajación por unidad de área infinita).

La distribución polar de la razón de fluencia de los fotones primarios en aire, de una fuente distribuida en un suelo está dada por:

$$\varphi_{\cos \theta} = \frac{p(E)}{2} A_{\alpha} \left[\frac{1}{\cos \theta + \beta \mu_s / \rho} \right] \exp(-\mu_a h / \cos \theta) \quad (4)$$

donde p(E) es la probabilidad de emisión (s⁻¹Bq⁻¹) de fotones con energía E por desintegración de la fuente, $-\mu_a$ es el coeficiente de atenuación lineal del aire sin dispersión coherente (cm⁻¹), μ_s es el coeficiente de atenuación lineal del suelo sin dispersión coherente (cm⁻¹), h es la distancia del detector al suelo (cm) y θ es el ángulo entre la normal y el plano del suelo y el elemento de volumen.

La ecuación 3 puede evaluarse numéricamente usando los datos experimentales para $\frac{\dot{N}(\theta)}{\dot{N}_0}$ y con los valores calculados de $\varphi_{\cos \theta}$ para las diferentes energías y geometrías de la fuente. Integrando $\varphi_{\cos \theta}$ sobre $\cos \theta$ se obtiene la fluencia total. Si la densidad no depende de la profundidad en el suelo la integración puede hacerse con procedimientos semi analíticos. Estos valores son válidos para los casos más generales de diferente densidad de suelo [6]. Los valores de fluencia primaria en aire, a una altura de 1 metro sobre el suelo por unidad de área para una distribución constante de la fuente radiactiva para el rango de energías de interés se muestran en la tabla 4.

Estos valores se graficaron y se les realizó una regresión logarítmica para obtener los valores de fluencia primaria de las energías de interés.

Tabla 4. Fluencia primaria de fotones de una fuente distribuida en forma constante a una distancia de un metro del detector en el rango de energías de interés

Energía (keV)	Fluencia primaria de fotones ($\varphi_{\cos\theta}$)
100	1.72
150	1.77
200	1.82
300	1.9
500	2.01
662	2.05
1000	2.15
1461	2.24

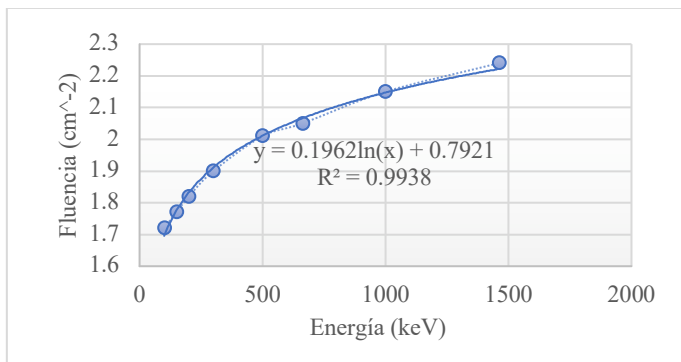


Fig. 13. Fluencia de fotones primarios en función de la energía y regresión logarítmica de los datos.

Tabla 5. Fluencia primaria de fotones de una fuente distribuida en forma constante a una distancia de un metro del detector en el rango de energías de interés.

Energía (keV)	Fluencia de fotones primarios $\varphi_{\cos\theta}$ (cm ⁻²)
121.781	1.7692
244.6974	1.6694
344.2785	1.6554
411.116	1.5632
443.956	1.6735
688.67	1.6944
778.9045	1.5897
867.38	1.5846
964.057	1.5757
1085.837	1.6691
1112.076	1.5876
1212.948	1.6456

1408.013	1.6075
----------	--------

3.4 Factor de corrección angular

La respuesta angular relativa para esas mismas energías que se determinó experimentalmente y se ajustó a una función polinómica para después integrarse, por el método de cuadratura adaptativa [14], de 0° a 90° utilizando el programa MATLAB.

Los valores de estas integrales y los valores de la fluencia de fotones primarios se usaron para calcular el factor de corrección angular de cada energía ($\frac{N}{N_0}$), la cual se graficó y se realizó regresión logarítmica y por interpolación se calcularon los valores para las energías de interés.

Tabla 6. Factor de corrección angular para energías del europio-152.

Energía (keV)	Factor de corrección angular ($\frac{N}{N_0}$)
121.781	0.9803
244.6974	1.1209
344.2785	1.1708
411.116	1.2622
443.956	1.1880
688.67	1.2242
778.9045	1.3200
867.38	1.3376
964.057	1.3583
1085.837	1.2962
1112.076	1.3657
1212.948	1.3280
1408.013	1.3776

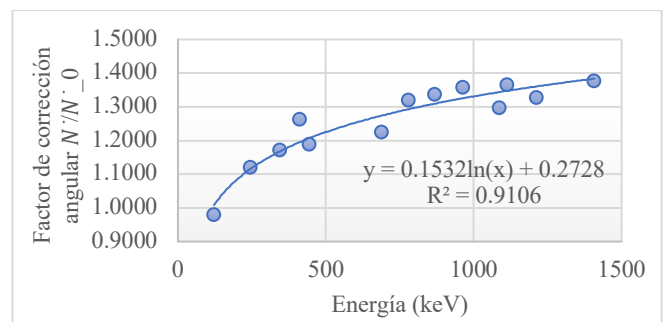


Fig. 14. Factor de corrección angular para las energías del europio-152 y ajuste de los datos a una función logarítmica.

Tabla 7. Factor de corrección angular para las energías de los emisores gamma naturales, obtenidos por interpolación.

Serie radiactiva	Radionúclido	Energía (keV)	Factor de corrección angular ($\frac{N}{N_0}$)
------------------	--------------	---------------	--

U-238	Pb-214	295.39	1.1442	Th-232	Tl-208	860.69	1.3081
U-238	Pb-214	351.95	1.1711	Th-232	Ac-228	911.42	1.3169
Th-232	Tl-208	583.33	1.2485	Th-232	Ac-228	969.08	1.3263
U-238	Bi-214	609.61	1.2552				

Tabla 8. Factores de calibración para mediciones *in situ*.

Serie radiactiva	Radionúclido	Energía (keV)	Respuesta por unidad de fluencia interpolada \dot{N}_0/φ (cm ²)	Factor de corrección angular $\frac{\dot{N}}{\dot{N}_0}$	Fluencia de fotones por unidad de actividad $\frac{\varphi}{A_m}$ (cm ⁻² s ⁻¹ Bq ⁻¹ g)
U-238	Pb-214	295.39	17.09	1.1442	0.828
U-238	Pb-214	351.95	15.17	1.1711	1.71
Th-232	Tl-208	583.33	10.77	1.2485	1.76
U-238	Bi-214	609.61	10.45	1.2552	2.75
Th-232	Tl-208	860.69	8.27	1.3081	0.313
Th-232	Ac-228	911.42	7.95	1.3169	2.060
Th-232	Ac-228	969.08	7.63	1.3263	1.282

3.5 Fluencia de fotones por unidad de actividad

Para fuentes homogéneas en suelos, la razón de fluencia de fotones a un metro de altura sobre el suelo se obtuvo del ICRU-53 [6]. Los factores de calibración obtenidos con la metodología propuesta se muestran en la tabla 8.

4. Conclusiones

Se determinaron factores de calibración que permiten convertir el área de los picos de energía total, de los espectros generados por el sistema de detección GeRe-3522 para la técnica *in situ*, en actividad específica de los correspondientes emisores gamma naturales, de acuerdo al ICRU-53. Para esto se determinó la respuesta angular del sistema, incluyendo la respuesta frontal, que es uno de los parámetros que caracterizan la respuesta de este sistema de detección en las mediciones *in situ*, ya que incluye la respuesta cuando la fluencia de rayos gamma no incide normalmente a la cara del detector. Estas mediciones implican la respuesta del detector a otros ángulos de incidencia debido a que en mediciones medioambientales se analizan grandes áreas en lugar de fuentes puntuales. Este parámetro, la respuesta angular, es por sí mismo interesante debido a que cada detector tiene una respuesta particular y específica que describe su comportamiento para cada ángulo de incidencia de los rayos gamma diferentes a la normal.

Aunque el rango de energías para las cuales se determinó la respuesta angular es bastante amplio (de 121.781 keV hasta 1408.013 keV), las energías están concentradas en la parte de baja energía de tal manera que la parte de alta energía queda con poca cobertura.

El método usado para realizar esta calibración es restringido en el sentido de que solo puede ser aplicado a un número limitado de escenarios de medición y puede ser usado para estimar la respuesta a una fuente distribuida exponencialmente en el suelo. Como $\frac{\varphi}{A_s}$ se determina solo en base a valores previamente calculados, este puede usarse solo en situaciones donde las condiciones reales presentes en el sitio se asemejan a los usados

para calcular los valores tabulados. Las propiedades del suelo pueden variar significativamente de lugar a lugar dentro de un área de muestreo. Además, el método asume que la fuente tiene una distribución exponencial hasta una profundidad infinita en el suelo. Muchas fuentes no muestran esta distribución en el suelo. La precisión de este método se estima que tiene un 10% de incertidumbre.

Referencias

- [1] Santo, A.S.E., F.G. Wasserman, and C.C. Conti, HPGe well detector calibration procedure by MCNP5 Monte Carlo computer code. *Annals of Nuclear Energy*, 2012. 46: p. 213-217.
- [2] Boson, J., Improving accuracy of in situ gamma-ray spectrometry, in *Radiofysik*. 2008, Umeå. p. 47.
- [3] Boson, J., et al., In situ gamma-ray spectrometry for environmental monitoring: A semi empirical calibration method. *Radiation Protection Dosimetry*, 2006. 121(3): p. 310-316.
- [4] Boson, J., et al., Improving Calibration of HPGe Detectors for In Situ Measurements – a Comparison of Semi-empirical and Monte Carlo Methods. 2008.
- [5] Tyler, A.N. and D. Copplestone, Preliminary results from the first national in situ gamma spectrometry survey of the United Kingdom. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2007. 96(1): p. 94-102.
- [6] Gehrke, R.J., *Gamma-ray spectrometry in the environment: ICRU Report 53 (International Commission on Radiation Units and Measurements, Inc., Washington, DC, USA, 1994)*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1996. 372(1-2): p. 333-334.
- [7] Nir-El, Y. and O. Sima, Angular response of a HPGe detector to gamma-rays in in situ measurements. *Applied Radiation and Isotopes*, 2001. 55(1): p. 1-7.
- [8] Beck, H.L., J. DeCampo, and C. Gogolak, *In situ Ge(Li) and NaI(Tl) gamma ray spectrometry*, U.S.A.E. Commission, Editor. 1972, U.S. Atomic Energy Commission.
- [9] Jacob, P., et al., Report 53. *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements*, 1994. os27(2): p. NP-NP.

- [10] UNSCEAR, SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2008, Report to the General Assembly., in 2008.
- [11] Genie-2000, Genie 2000 Operations Manual. 2001: Camberra Industries.
- [12] J. H., H. and S. S. M. NIST: X-Ray Mass Attenuation Coefficients. 1989,1990,1996 june 30, 2017.
- [13] De la torre Aguilar, F., Conformación de una secuencia de análisis óptima para espectros de radiación gamma ambiental con el programa Genie 2000, in Unidad Académica de Estudios Nucleares. 2010, Universidad Autónoma de Zacatecas: Zacatecas, Zactecas, México. p. 76.
- [14] Gander, W. and W. Gautschi, Adaptive Quadrature—Revisited. Vol. 40. 2000. 84-101.