



## Practica 4: Radiación natural

Escobar , Santiago<sup>1</sup>; Cortes, Sebastian<sup>2</sup>; Barbosa Rafael<sup>3</sup>

*Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogota, Colombia*

03 de Marzo del 2025

60/60

### 1. Introducción

El objetivo de esta práctica es cuantificar la presencia de los isótopos radiactivos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$  en una muestra de suelo de 500 g. Durante su desintegración, estos isótopos generan núclidos secundarios que forman parte de sus respectivas cadenas de decaimiento. En conjunto, tanto los isótopos originales como sus productos de desintegración se conocen como NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials). La detección y cuantificación de estos radionucleidos es fundamental en estudios de radioprotección, evaluación de impacto ambiental y caracterización de materiales geológicos.

El experimento se realizará con tres muestras: la muestra de suelo en estudio, una muestra de referencia proporcionada por un organismo internacional y una muestra incógnita. A partir de la comparación con las dos últimas, se determinará la actividad radiactiva de la muestra analizada mediante interpolación.

Para ello, se empleará un detector de germanio de alta resolución, el cual ofrece una excelente capacidad de discriminación energética, permitiendo identificar con precisión los fotopicos característicos de cada isótopo en sus espectros de emisión. Este tipo de análisis espectrométrico es ampliamente utilizado en estudios de radiactividad ambiental debido a su alta sensibilidad y precisión.

El procedimiento experimental incluirá la calibración del detector utilizando fuentes de referencia certificadas, la adquisición de espectros de emisión gamma y el procesamiento de los datos obtenidos para determinar la concentración de cada radionucleido en la muestra de suelo. Además, se tomarán en cuenta factores como la eficiencia del detector y la autoabsorción de la radiación en la muestra para obtener resultados más precisos.

### 2. Procedimiento

#### 2.1. Montaje experimental y adquisición de espectros

Para la práctica se emplea un detector de germanio de alta pureza (HPGe), conectado a una unidad de alto voltaje. La señal de salida del detector se procesa mediante un preamplificador, un amplificador lineal y un conversor analógico-digital (ADC), para finalmente ser analizada con un multicanal (MCA). Se asegura la correcta alineación de cada muestra con respecto a la ventana del detector para optimizar la eficiencia de detección.

Se emplean fuentes de calibración de  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{60}\text{Co}$ , las cuales se miden en el detector para obtener la relación entre energía y canal. Además, se utilizan tres muestras de

suelo: una muestra de estudio, una muestra de referencia certificada y una muestra inc6gnita. Todas las mediciones se realizan dentro de un barril de plomo para minimizar la radiaci6n de fondo, con tiempos de adquisici6n de 24 horas.

## 2.2. Procesamiento de los datos

1. **Visualizaci6n de espectros:** Se grafican los espectros obtenidos para la muestra de estudio, la muestra de referencia y la muestra inc6gnita, identificando los picos principales de emisi6n gamma.
2. **Sustracci6n de fondo:** Se resta el espectro de fondo a cada espectro medido, eliminando contribuciones no asociadas a la muestra.
3. **Identificaci6n de picos:** Se localizan los picos gamma caracteristicos de cada radion6clido en la muestra:  $^{40}\text{K}$  (1460.9 keV),  $^{238}\text{U}$  (352 keV) y  $^{232}\text{Th}$  (2614.5 keV).
4. **Ajuste de picos:** Se ajusta una funci6n gaussiana sobre cada pico identificado para determinar su centroide, anchura total a media altura (FWHM) y 6rea.

## 2.3. Calibraci6n canal-energía y resoluci6n

Se ajusta una funci6n lineal para la calibraci6n canal-energía:

$$E_{\gamma}(\text{keV}) = a_0 + a_1 \times (\text{canal})$$

Con la anchura en canales (FWHM<sub>canal</sub>), se obtiene la resoluci6n en energía:

$$\text{FWHM}(\text{keV}) = c_0 + c_1 \sqrt{E_{\gamma}(\text{keV})}$$

Se analiza si el detector HPGe logra resolver los picos cercanos de las muestras.

## 2.4. Análisis de concentraci6n y actividad

Con los valores de intensidad gamma obtenidos, se calcula la concentraci6n de cada is6topo en la muestra de estudio utilizando la relaci6n:

$$C_m(K) = \frac{I_m}{I_r} C_r(K) \quad (1)$$

Donde  $I_m$  e  $I_r$  son las intensidades del pico de 1461 keV para la muestra de estudio y la referencia, respectivamente, y  $C_r(K)$  es la concentraci6n conocida de potasio en la referencia.

Finalmente, se calcula la actividad de los is6topos en la muestra utilizando la ecuaci6n:

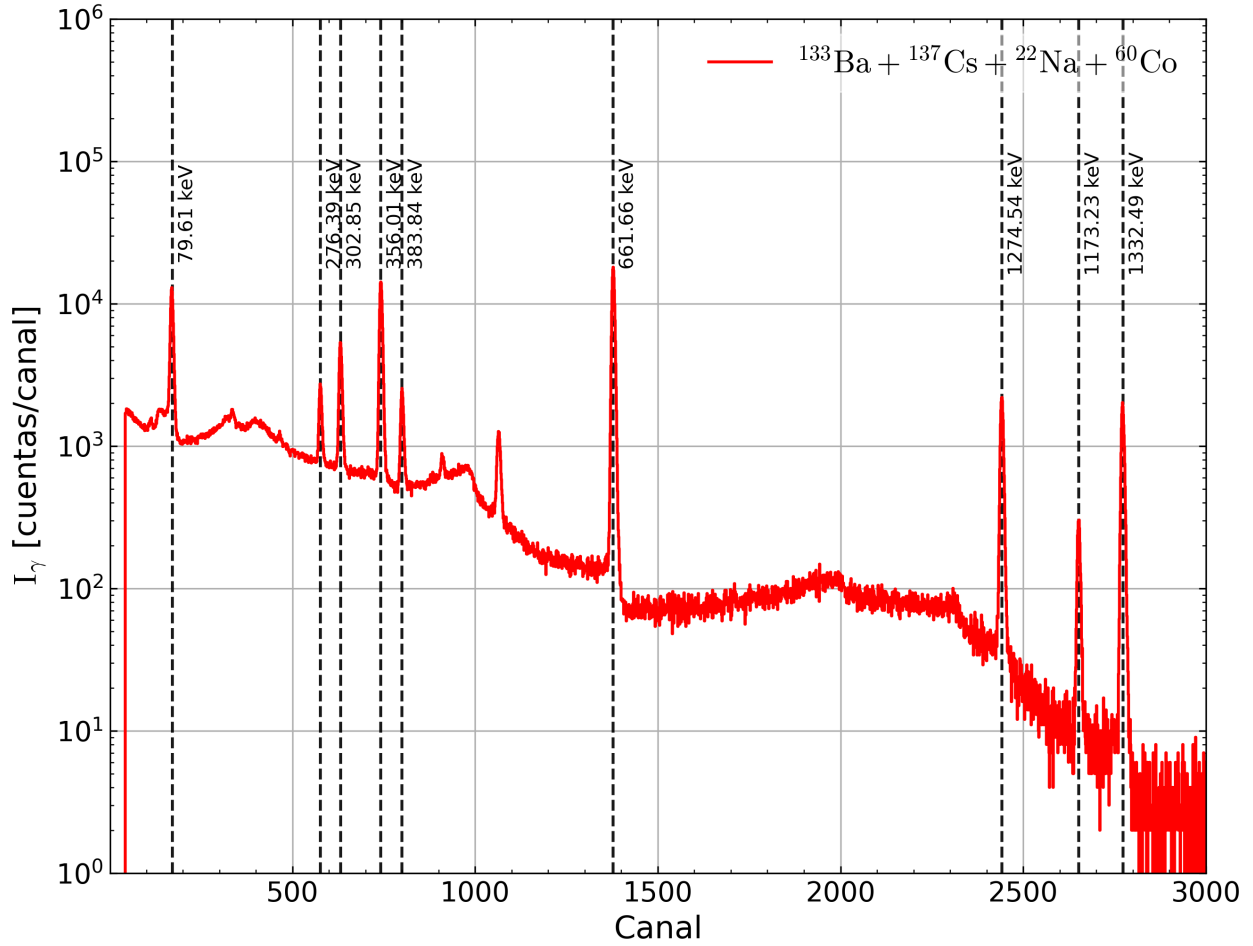
$$A = \frac{0.693}{T_{1/2}} N \quad (2)$$

Donde  $T_{1/2}$  es la vida media del is6topo y  $N$  es el n6mero de n6cleos radiactivos presentes en la muestra. Se obtiene así la actividad en Bq para cada is6topo analizado.

### 3. Análisis

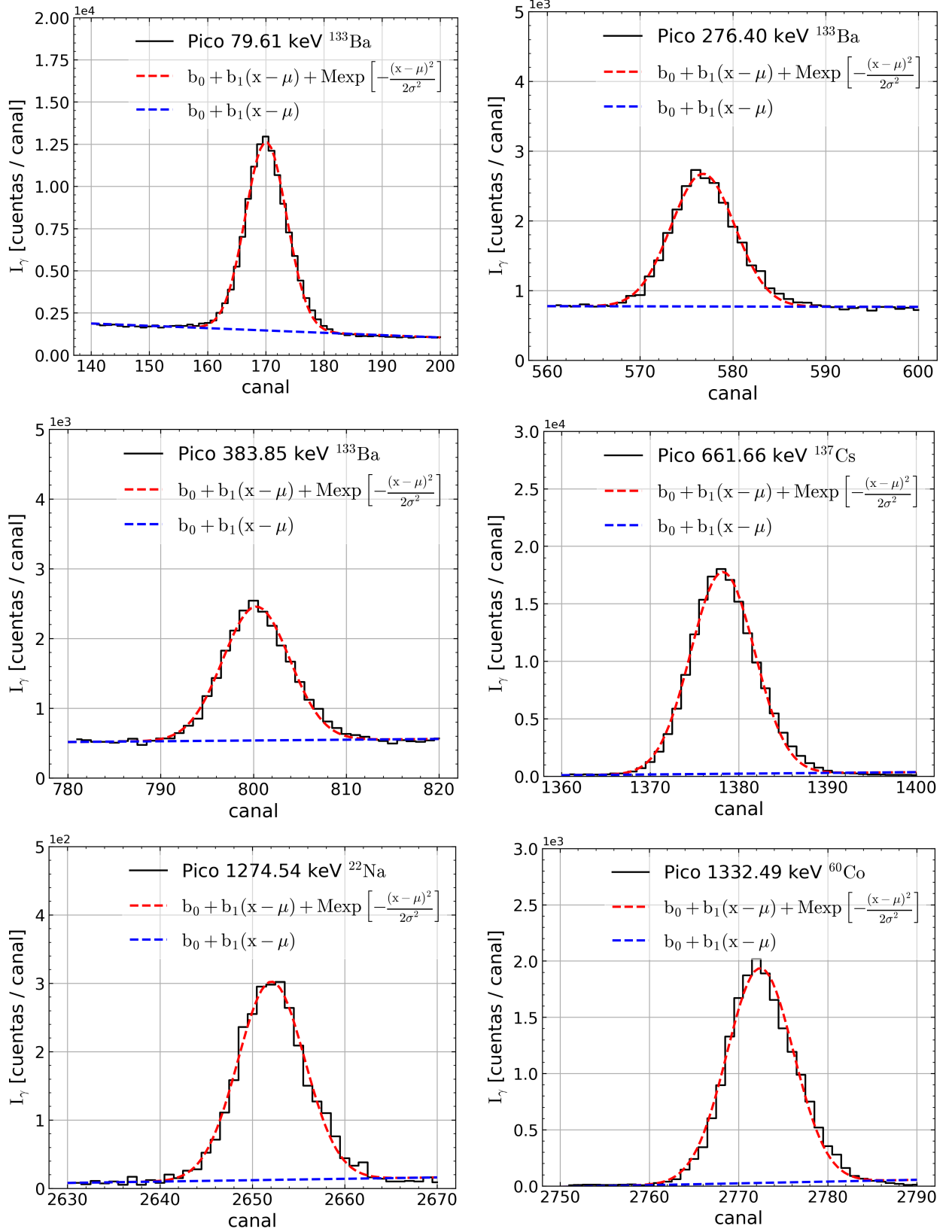
#### 3.1. Calibración

El proceso comienza con la calibración del detector, utilizando una muestra que contiene los radionucleidos  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{60}\text{Co}$ , su espectro se muestra en la Figura 1. Es importante la calibración del detector para establecer la correspondencia entre los fotopicos de energías conocidas y los picos detectados en el espectro de la muestra y referencias.



**Figura 1.** Espectro para la calibración del detector

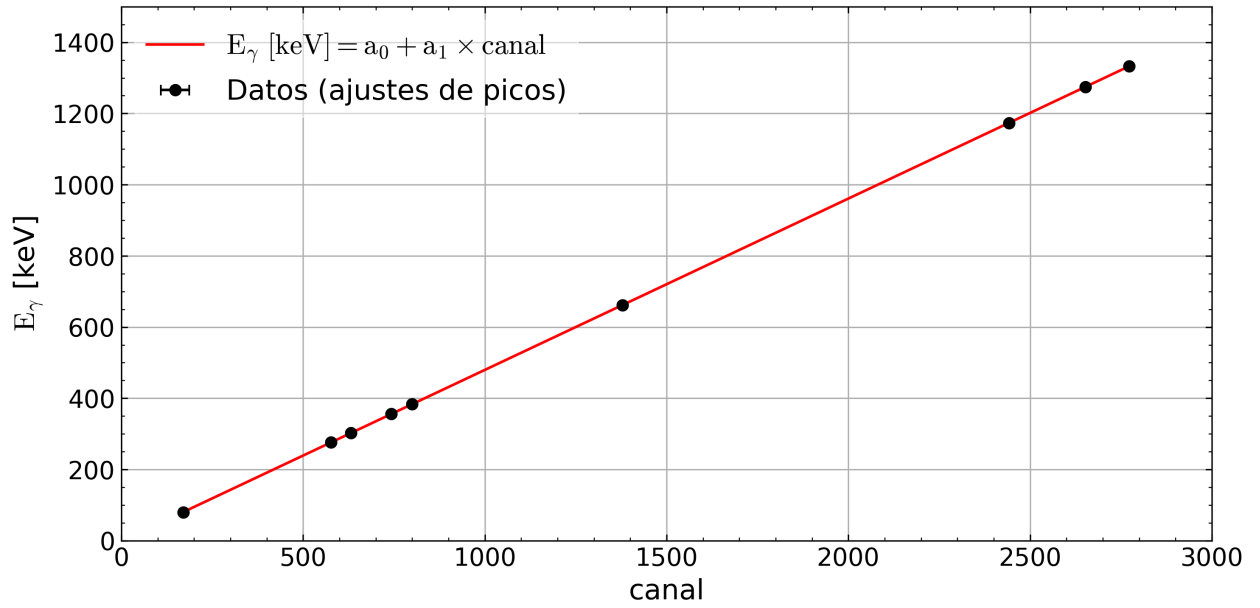
En la Figura 2 se presentan los ajustes individuales de algunos de los fotopicos, mientras que la Tabla 1 recoge los valores de canal correspondientes al ajuste de cada uno de los picos. A partir de estos datos, se lleva a cabo la calibración energética, ajustando la relación entre la posición de los picos en el espectro y su energía en keV reportada en la literatura [Firestone y Shirley, 1996]. La Figura 3 muestra la recta de calibración, y en la Tabla 2 se detallan los coeficientes obtenidos en el proceso.



**Figura 2.** Ajuste a los fotopicos del espectro de calibración. Por fines visuales solo se muestra el ajuste realizado a 6 fotopicos, sin embargo su ajuste se realizo de misma forma que el resto de picos.

**Tabla 1.** Datos de energía de cada fotopico [Firestone y Shirley, 1996] y su valor en Canal obtenido del ajuste de los picos en el espectro de calibración.

Isótopo	$E_\gamma$ (keV)	$E_\gamma$ (Canal)
$^{133}\text{Ba}$	79.6139(13)	170.07(3)
	276.3997(13)	576.79(5)
	302.8510(6)	631.83(5)
	356.0134(6)	742.44(5)
	383.8480(12)	800.31(4)
$^{137}\text{Cs}$	661.657(3)	1378.19(4)
$^{22}\text{Na}$	1274.537(7)	2652.06(7)
$^{60}\text{Co}$	1173.228(3)	2441.67(4)
	1332.490(6)	2772.43(7)



**Figura 3.** Ajuste para la calibración de canal a  $E_\gamma$

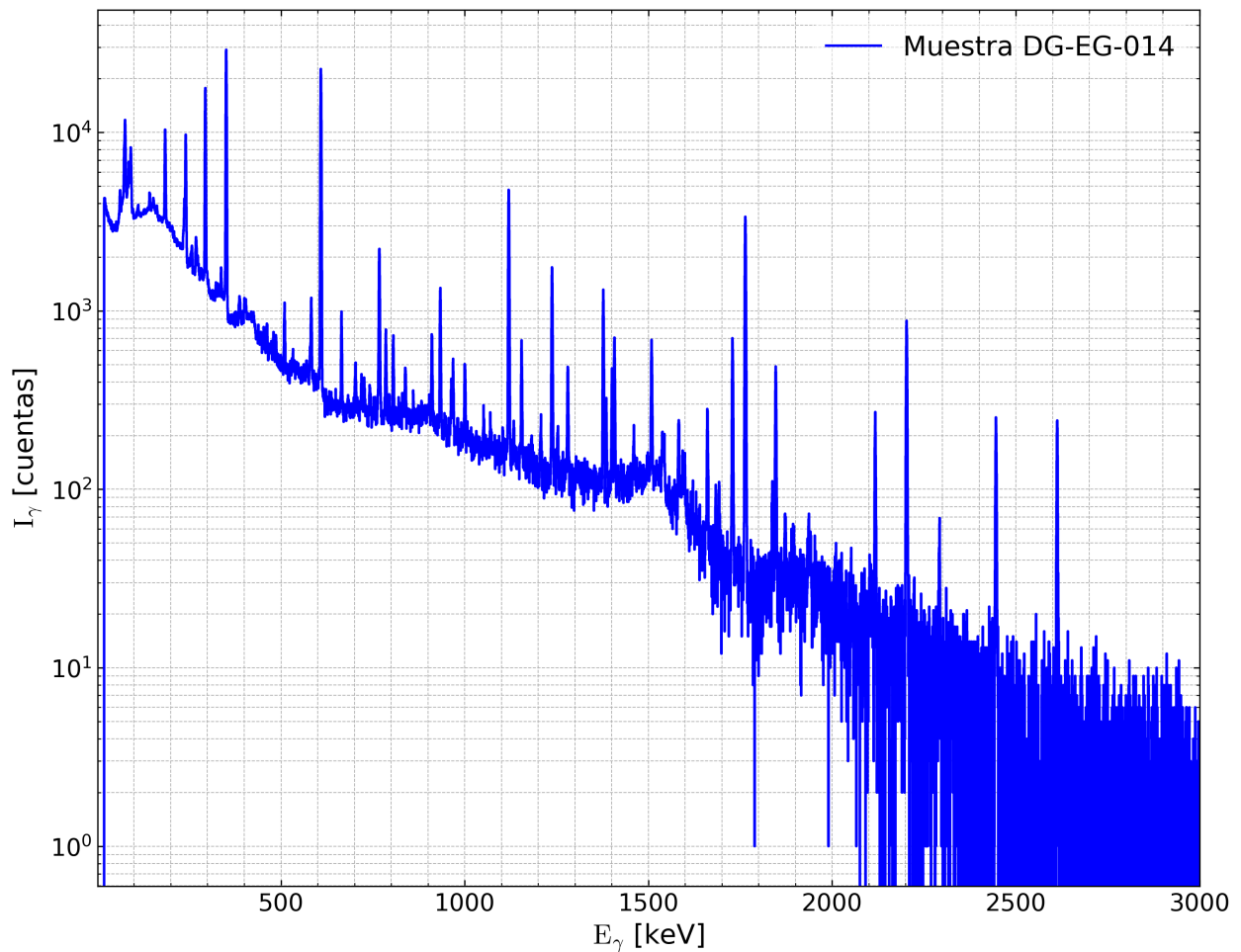
**Tabla 2.** Constantes relacionadas al ajuste de la Figura 1.

$a_0$ [keV]	$a_1$ [keV/canal]
-1.72(2)	0.4813(1)

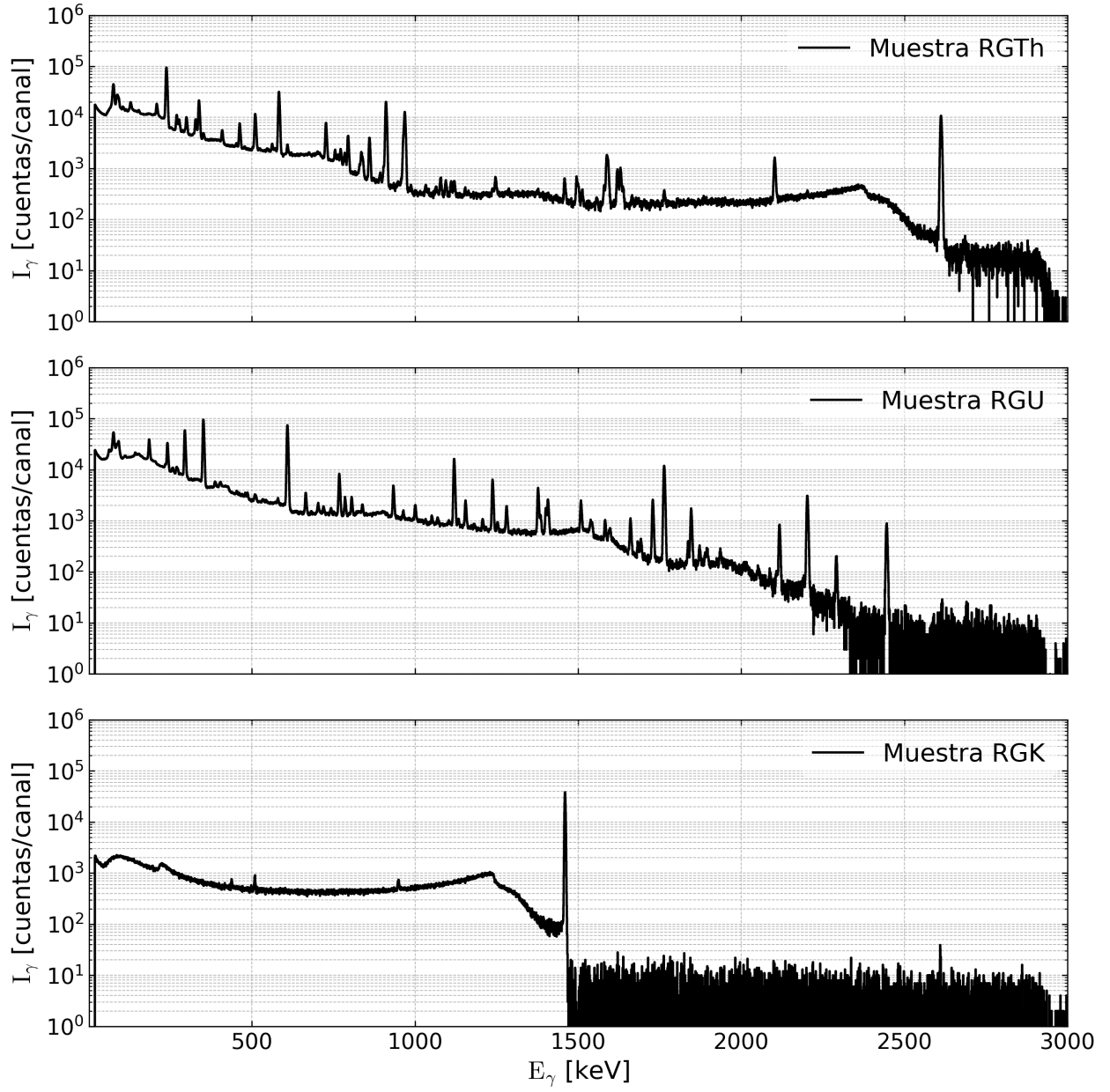
### 3.2. Espectro de las muestras de estudio y referencias

Una vez se tiene la calibración del detector, se procede a registrar el espectro de la muestra de interés DG-EG-014, el cual se muestra en la Figura 4. Además, se presentan los espectros de las muestras de referencia de potasio, uranio y torio (K, U y Th), Figura 5, aplicando en todos los casos la resta del fondo para conocer la intensidad correcta asociada a cada fotopico.

Igualmente resulta importante reportar las concentraciones de cada elemento en las muestras de referencia, ya que estos valores serán fundamentales para el análisis de concentración en la muestra de estudio. La Tabla 3 recoge dicha información reportada por el IAEA.



**Figura 4.** Espectros para las muestra de estudio DG-EG-014.



**Figura 5.** Espectros para las muestras de referencia (tienen el fondo restado).

**Tabla 3.** Contenido porcentual de 500 g de cada una de las muestras de referencia [IAEA, 1983-1985].

	RGU-1	RGTh-1	RGK-1
Concentración $\mu\text{g/g}$			
Uranio	400.0(2)	6.3(4)	$< 10^{-3}$
Torio	$< 1$	800(16)	$< 10^{-2}$
Potasio	$< 20$	0.02(1)	44.8(3) %

### 3.3. Radicación del $^{40}\text{K}$

Para determinar la actividad radiactiva del isótopo  $^{40}\text{K}$ , primero es necesario establecer su relación con la cantidad de núcleos presentes en la muestra, representada por  $N(^{40}\text{K})$ . Esta relación se expresa como:

$$A(^{40}\text{K}) = \frac{N(^{40}\text{K})}{\tau} \quad (3)$$

Dado que el número de átomos del isótopo se puede expresar en términos de la cantidad total de potasio y su fracción isotópica, se tiene que:

$$N(^{40}\text{K}) = \frac{N_A \cdot m(^{40}\text{K})}{w(\text{K})} \quad (4)$$

donde  $N_A$  es el número de Avogadro y  $w(\text{K})$  es la masa atómica promedio del potasio. Al sustituir esta expresión en la ecuación anterior, obtenemos:

$$A(^{40}\text{K}) = \frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot \frac{N_A \cdot m(^{40}\text{K})}{w(\text{K})} \quad (5)$$

Si además expresamos la masa del isótopo en términos de la cantidad total de potasio en la muestra y su proporción isotópica:

$$A(^{40}\text{K}) = \frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot \frac{N_A}{w(\text{K})} \cdot \varphi(^{40}\text{K}) \cdot C_m(\text{K}) \cdot m \quad (6)$$

En esta ecuación,  $\varphi(^{40}\text{K})$  corresponde a la fracción de este isótopo en el potasio natural, mientras que  $C_m(\text{K})$  indica la cantidad de potasio en la muestra. Los valores numéricos de estas magnitudes están reportados en la guía [Cristancho, 2025].

Por otro lado, la cantidad de potasio en la muestra se puede comparar con la de una muestra de referencia utilizando la proporción entre las intensidades de los fotopicos en sus respectivos espectros:

$$\frac{I_m}{I_r} = \frac{C_m(\text{K})}{C_r(\text{K})} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t_r} \quad (7)$$

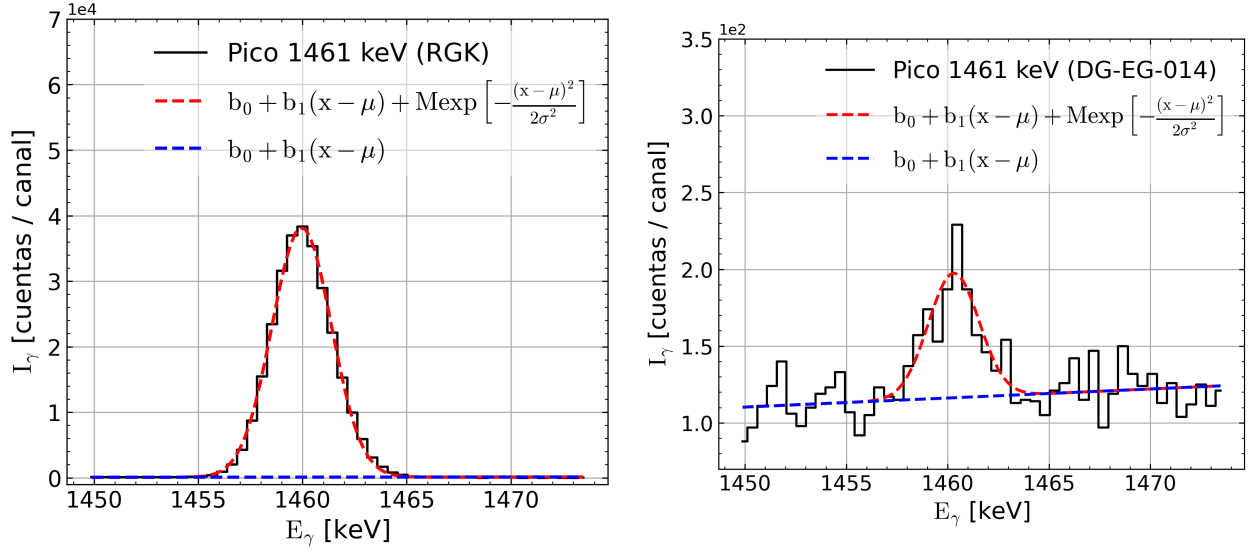
Dado que el tiempo de adquisición en ambas mediciones fue el mismo ( $\Delta t = \Delta t_r$ ), la ecuación anterior se reduce a:

$$C_m(\text{K}) = \frac{I_m}{I_r} \cdot C_r(\text{K}) \quad (8)$$

Los valores de referencia de  $C_r(\text{K})$  se presentan en la Tabla 3. Con estos cálculos, es posible estimar la cantidad de material radiactivo en la muestra DG-EG-014, utilizando el análisis de los fotopicos observados en los espectros de la referencia y muestra de estudio.



### 3.4. Concentración de $^{40}\text{K}$



**Figura 6.** Ajuste del fotopico de 1461 keV para la muestra de estudio y referencia.

**Tabla 4.** Resultados del ajuste para la muestra de K.

$E_\gamma = 1461 \text{ keV}$			
Muestra	$\sigma$ [keV]	$Y$ [cuentas/canal]	$I$ [cuentas]
RGK	1.43(1)	38094(234)	282795(2728)
DG-EG	1.43(1)	81(9)	605(95)

Considerando la Figura 6 y los datos de la Tabla 4 se calcula la concentración utilizando la ecuación 8, de modo se obtiene el siguiente resultado:

$$C_m = 0.0958(2) \% \quad \text{Incertidumbre mal calculada} \quad \text{Mejor: } 0.10(2) \% \quad (9)$$

Para la muestra de referencia, se tomó como valor conocido  $C_r(K) = 44.8(3) \%$ .

Dado que un 1 % equivale a 10,000 partes por millón (ppm), la conversión de la concentración obtenida a estas unidades se realiza mediante una simple multiplicación:

$$C_m = 958(2) \text{ ppm} \quad (10)$$

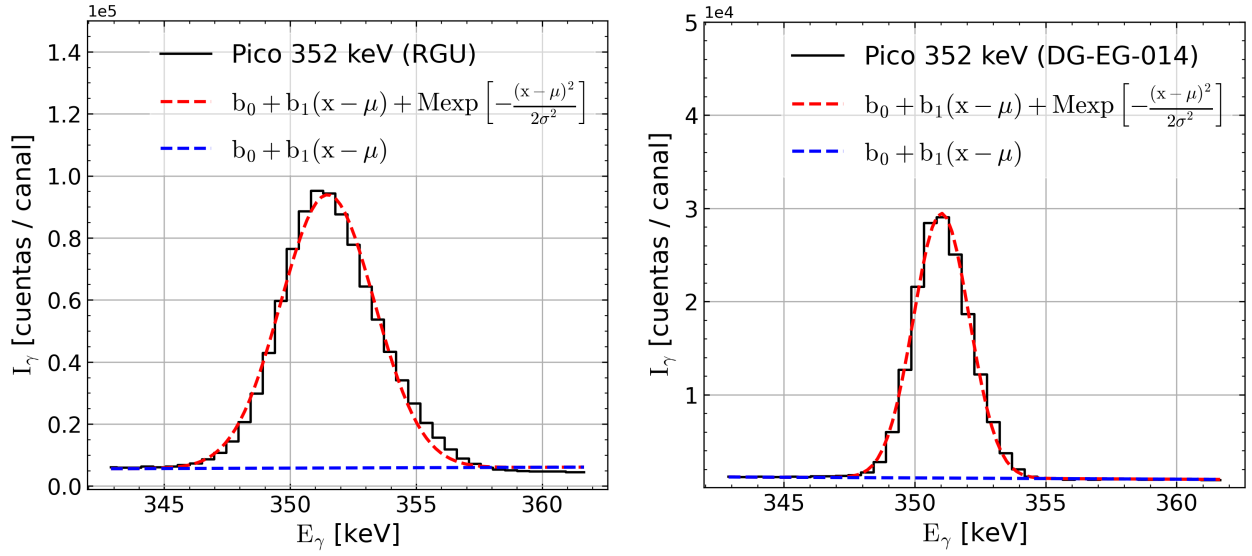
Con este valor y considerando la fracción isotópica  $\varphi(^{40}\text{K}) = 0.000117$  y la semivida  $T_{1/2} = 1.3 \times 10^9$  años, se procede a determinar la actividad radiactiva utilizando la ecuación 6.

Si usan su propia ecuación (6) el resultado es 14.59(3) Bq

$$A(^{40}\text{K}) = 55863(392) \text{ Bq} \quad (11)$$

Este resultado proporciona la actividad específica del isótopo en la muestra analizada, permitiendo su comparación con valores de referencia y otras mediciones similares.

### 3.5. Concentración de $^{238}\text{U}$



**Figura 7.** Ajuste del fotopico de 352 keV para la muestra de estudio y referencia.

**Tabla 5.** Resultados del ajuste para la muestra de U.

$E_\gamma = 352 \text{ keV}$			
Muestra	$\sigma$ [keV]	$Y$ [cuentas/canal]	$I$ [cuentas]
RGU	1.86(3)	88086(1285)	852754(20156)
DG-EG	1.06(1)	28406(299)	157338(2598)

Considerando la Figura 7 y los datos de la Tabla 5 se calcula la concentración de U a partir de la ecuación 8, tomando como referencia el valor conocido de la muestra patrón  $C_r(U) = 400.0(2) \mu\text{g/g} = 4.000(2) \%$ . El resultado obtenido es:

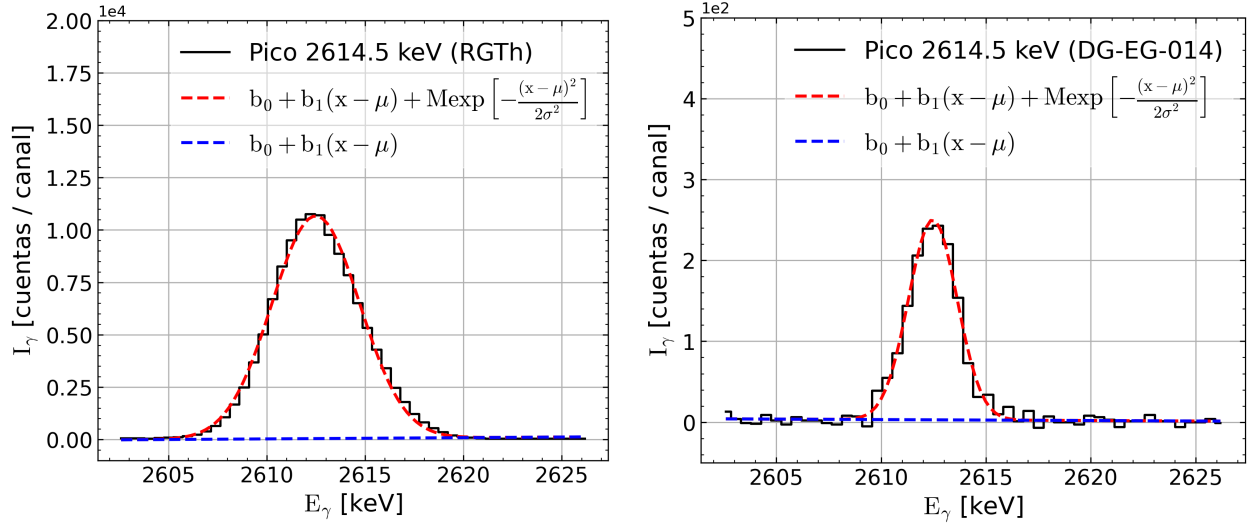
$$C_m(U) = 0.0074(2) \% = 74(2) \text{ ppm} \quad (12)$$

Con este valor y considerando la fracción isotópica  $\varphi(^{238}\text{U}) = 0.992742(10)$  y la semivida  $T_{1/2} = 4.5 \times 10^9$  años, se procede a determinar la actividad radiactiva empleando la ecuación 6.

$$A(^{238}\text{U}) = 460(12) \text{ Bq} \quad (13)$$

El cálculo de la actividad permite cuantificar la presencia de  $^{238}\text{U}$  en la muestra analizada, facilitando su comparación con estándares de referencia y otros materiales estudiados.

### 3.6. Concentración de $^{232}\text{Th}$



**Figura 8.** Ajuste del fotopico de 1614.5 keV para la muestra de estudio y referencia.

**Tabla 6.** Resultados del ajuste para la muestra de Th.

$E_\gamma = 1614.5 \text{ keV}$			
Muestra	$\sigma$ [keV]	$Y$ [cuentas/canal]	$I$ [cuentas]
RGTh	2.23(3)	10628(98)	123515(1843)
DG-EG	1.16(3)	247(5)	1490(43)

Utilizando la ecuación 8, se determina la concentración de torio en la muestra, tomando como referencia el valor de la muestra patrón  $C_r(\text{Th}) = 800(16) \mu\text{g/g} = 8.00(16) \%$ , y considerando que la fracción isotópica es  $\varphi(^{232}\text{Th}) = 1$ . El resultado obtenido es:

$$C_m(\text{Th}) = 0.00098(1) \% \approx 10(1) \text{ ppm} \quad (14)$$

A partir de este valor y considerando la semivida  $T_{1/2} = 1.4 \times 10^{10}$  años de  $^{232}\text{Th}$ , se calcula la actividad radiactiva mediante la ecuación 6:

$$A(^{232}\text{Th}) = 69.95(71) \text{ Bq} \quad (15)$$

Comparando los resultados de actividad obtenidos, se observa que el  $^{40}\text{K}$  es el isótopo con mayor actividad, lo que se debe a su menor tiempo de semivida de  $1.3 \times 10^9$  años. En segundo lugar, se encuentra el  $^{238}\text{U}$ , cuya actividad es inferior debido a su semivida de  $4.5 \times 10^9$  años. Finalmente, el  $^{232}\text{Th}$  presenta la menor actividad de los tres radionucleidos analizados, lo cual es consistente con su mayor tiempo de semivida y su abundancia isotópica del 100 %.

## 4. Conclusiones

El primer paso consistió en la calibración del detector empleando una fuente que contenía radionucleidos de referencia ( $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{60}\text{Co}$ ). Con la recta de calibración obtenida, se pudieron identificar de forma confiable las energías y fotopicos de la muestra de estudio DG-EG-014 y de las muestras patrón (K, U y Th). Esta metodología fue fundamental para asociar la posición de los picos en los espectros con los valores de energía reportados en la literatura.

Tras registrar los espectros y corregir por el fondo, se determinaron las concentraciones de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$  en la muestra. El potasio, identificado a 1461 keV, resultó tener una concentración de 0.0958 % (958 ppm) y una actividad de 55863 Bq, superando a los valores obtenidos para uranio y torio, cuyos contenidos se estimaron en 74 ppm y 10 ppm (equivalentes a 460 y 70 Bq, respectivamente). El predominio de  $^{40}\text{K}$  en la radiactividad total pone de relieve la influencia de su semivida y su abundancia isotópica. Finalmente, la comparación con muestras de referencia certificadas avala el proceso de calibración y cuantificación, consolidándolo como una herramienta confiable para el análisis radiológico de muestras geológicas o ambientales.

## Referencias

- Cristancho, Fernando (28 de ene. de 2025). *Instrumentación Nuclear: Prácticas Experimentales*. Universidad Nacional de Colombia.
- Firestone, R. B. y V. S. Shirley (1 de ene. de 1996). "Table of Isotopes, 8th Edition". En. IAEA (1983-1985). *Preparation and certification of IAEA gamma spectrometry reference materials*. Technical report. International Atomic Energy Agency.