



Practica 3: Calibración de detectores de Ge

Escobar , Santiago¹; Cortes, Sebastian²; Barbosa Rafael³

Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogota, Colombia
17 de Febrero del 2025

60/60

1. Introducción

En esta práctica se llevará a cabo la calibración de un detector de germanio de alta pureza (HPGe, High-Purity Germanium), un dispositivo ampliamente utilizado en espectroscopía gamma debido a su alta resolución en la discriminación de energías. A diferencia de los detectores de NaI (yoduro de sodio) el HPGe ofrece una capacidad superior para resolver picos cercanos, lo que permite una caracterización más detallada de las fuentes radiactivas.

1. **Calibración en energía:** Se establecerá la relación entre el número de canal registrado por el MCA (Analizador Multicanal) y la energía real de los fotones gamma incidentes, utilizando fuentes de referencia bien caracterizadas (^{22}Na , ^{57}Co , ^{60}Co y ^{137}Cs).
2. **Resolución poder de separación de picos:** Se determinará la anchura a mitad de altura (FWHM) de los picos de emisión para evaluar la capacidad del detector de diferenciar líneas espectrales cercanas.
3. **Eficiencia en función de la energía:** Se calculará la probabilidad de detección relativa a diferentes energías, considerando la actividad y la intensidad de emisión de las fuentes utilizadas.

La notación correcta es ^{22}Na , ..

Para ello, se tomarán espectros con diferentes fuentes radiactivas, incluyendo un espectro inicial con ^{22}Na , ^{57}Co , ^{60}Co y ^{137}Cs , que proporcionará puntos de referencia para la calibración energética. Posteriormente, se analizará el espectro de una fuente mixta de ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu , el cual presenta una gran cantidad de picos, permitiendo un estudio detallado del rendimiento del detector a lo largo de un amplio rango energético. A partir de los datos obtenidos, se construirán curvas de calibración, se ajustarán funciones gaussianas a los picos observados y se comparará el desempeño del detector de HPGe con el de un detector de NaI, resaltando diferencias en resolución y eficiencia.

En las secciones siguientes se detalla el procedimiento experimental y el análisis requerido para cumplir estos objetivos.

2. Procedimiento

2.1. Montaje experimental y adquisición de espectros

Para la práctica se emplea un detector de Ge hiperpuro (HPGe), a una unidad de alto voltaje. La señal de salida del detector se procesa a través de un preamplificador, un amplificador lineal y un conversor analógico-digital (ADC), para finalmente ser analizada con

un multicanal (MCA). Es fundamental asegurar la correcta alineación de cada fuente con respecto a la ventana del detector para optimizar la eficiencia de detección.

2.2. Procesamiento de los datos

1. **Visualización de espectros:** Se grafican los espectros obtenidos, identificando los picos principales de cada fuente.
2. **Sustracción de fondo:** Se resta el espectro de fondo a cada espectro medido, eliminando contribuciones no asociadas a las fuentes.
3. **Identificación de picos:** Se localizan los picos gamma de cada radionúclido utilizando datos bibliográficos de energía y fracción de emisión (b_γ).
4. **Ajuste de picos:** Se ajusta una función gaussiana sobre cada pico identificado para determinar su centroide, anchura total a media altura (FWHM) y área.

2.3. Calibración canal-energía y resolución

Se ajusta una función lineal para la calibración canal-energía:

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

Con la anchura en canales ($\text{FWHM}_{\text{canal}}$), se obtiene la resolución 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 fuentes.

2.4. Análisis de eficiencia

Con el área de los picos $I(E_\gamma)$ y la actividad de cada fuente, se calcula la eficiencia del detector:

$$\varepsilon(E_\gamma) = \frac{I(E_\gamma)}{N_0(E_\gamma)} \quad (1)$$

donde:

$$N_0(E_\gamma) = A \cdot b_\gamma \cdot \Delta t \quad (2)$$

Se ajusta la actividad de cada fuente a la fecha actual utilizando:

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}} \quad (3)$$

Finalmente, se grafica $\varepsilon(E_\gamma)$ vs. E_γ y se discute la eficiencia del detector HPGe en función de la energía del fotón gamma.

3. Análisis

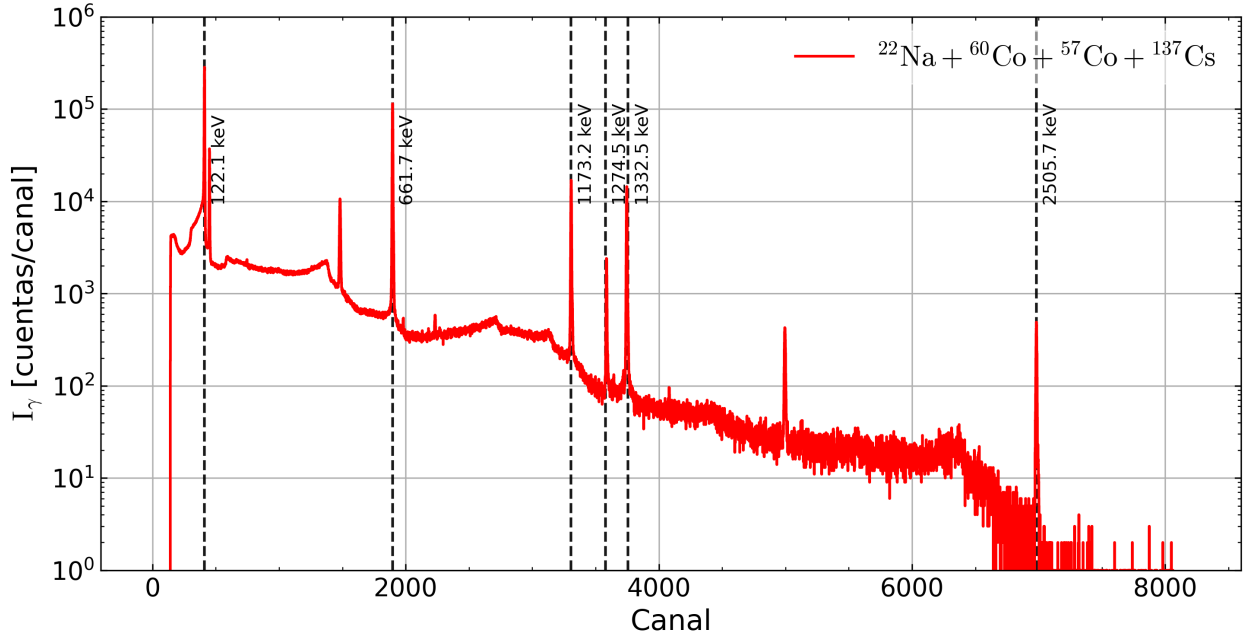


Figura 1. Espectro para la muestra calibración $NaCoCoCsGe8K.xy$.

Como se puede observar en la figura Figura 1, se obtuvo el espectro de la muestra de calibración cuyo contenido es de ^{22}Na , ^{57}Co , ^{60}Co y ^{137}Cs . Para la calibración del detector de germanio se utilizarán únicamente los picos correspondientes a las energías de 122.1 keV del cobalto 57, 661.7 keV del cesio 137, 1173.2 keV y 1332 keV del cobalto 60, 1274 keV del sodio 22, y el denominado "pico sumaübicado en 2505.7 keV. Este último es producto de que en el espectro del cobalto 60 sus respectivos decaimientos ocurren de forma extremadamente rápida, del orden de los picosegundos, lo que permite interpretarlos como decaimientos simultáneos y genera un pico localizado en la suma de las energías de los dos picos correspondientes al espectro. Cada uno de estos picos se puede observar claramente en las gráficas de canales.

Además de los picos seleccionados para la calibración, se pueden identificar otros picos asociados al espectro. Por ejemplo, el pico que se observa entre los canales 1000 y 2000, producido por la aniquilación electrón-positrón a causa del decaimiento beta menos del sodio 22, con una energía de 511 keV, no se tiene en cuenta para la calibración. De igual manera, el pico que se encuentra junto al pico de 122 keV del cobalto 57, el cual también pertenece al espectro del cobalto 60, es descartado en el proceso de calibración del detector de germanio.

Un último pico puede observarse cerca del canal 5000, el cual podría corresponder a otro pico suma provocado por el espectro del sodio 22, ya que este isótopo también presenta decaimientos del orden de los picosegundos, los cuales pueden considerarse como simultáneos. No obstante, al realizar un análisis más detallado sobre las cuentas en este pico, se encuentra que también hay otras contribuciones, probablemente provocadas por la medición simultánea de varios isótopos, lo que podría explicar la complejidad en su interpretación.

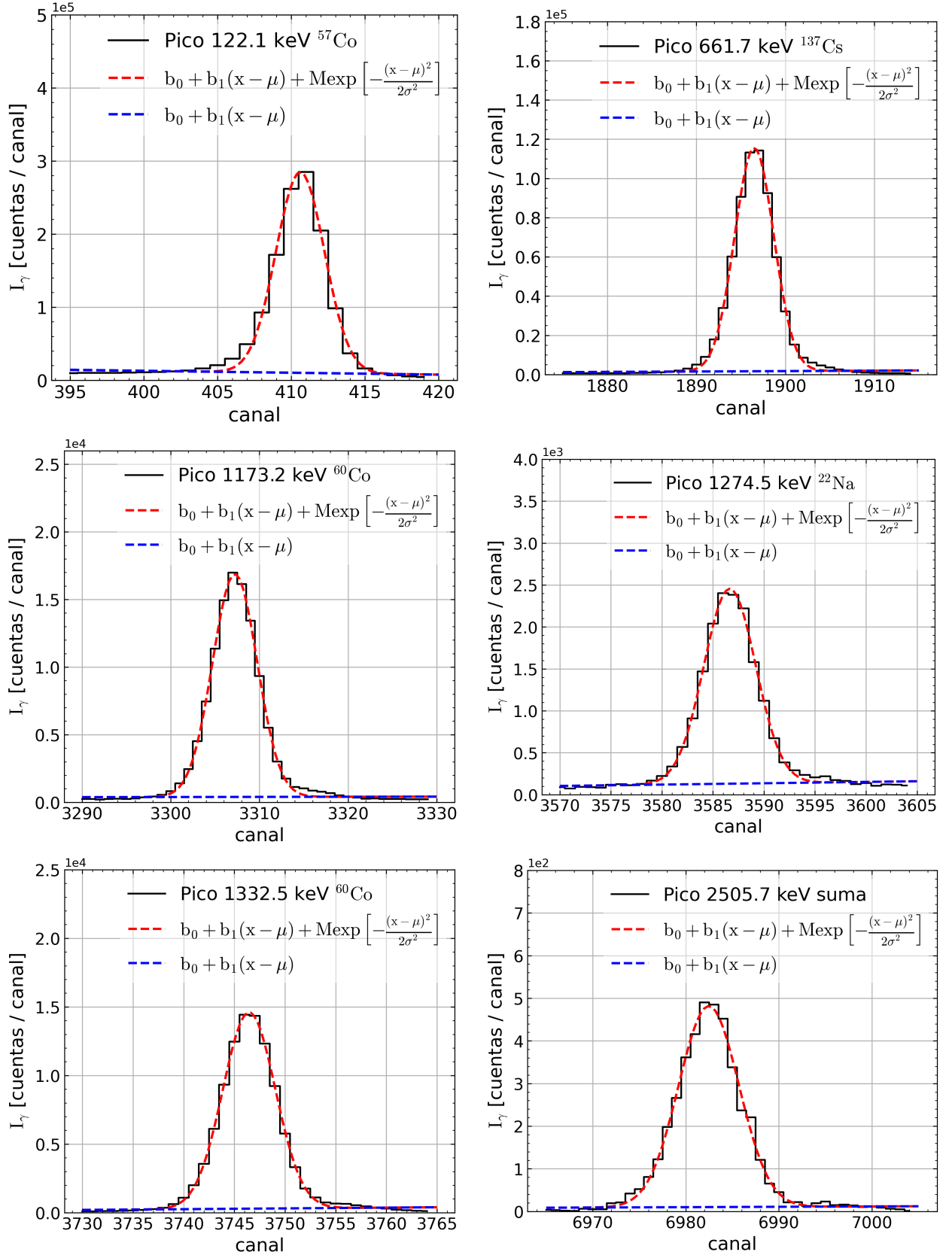


Figura 2. Ajuste a los fotopicos del espectro calibracionNaCoCoCsGe8K.xy.

Tabla 1. Datos de ajuste para los picos del espectro calibracionNaCoCoCsGe8K.xy.

E_γ [keV]	Canal	σ [canales]	FWHM [canales]	I_γ [cuentas]
122.1	410.61(3)	1.64(4)	3.87(8)	1130387(31032)
661.7	1896.49(2)	2.20(2)	5.17(5)	627840(7343)
1173.2	3307.23(2)	2.51(2)	5.92(5)	103917(1213)
1274.5	3586.65(3)	2.54(3)	5.98(7)	14804(229)
1332.5	3746.46(2)	2.60(2)	6.11(5)	93115(926)
2505.7	6982.47(5)	3.24(6)	7.63(13)	3228(83)

Por qué en esta col

De manera similar, se realiza el proceso de ajuste de los fotopicos para la muestra con isótopos de Europio, ^{152}Eu , ^{154}Eu y ^{155}Eu . En este caso, se ajustan los picos sugeridos en la guía. La visualización del espectro se presenta en la Figura 3, el ajuste para los fotopicos en la Figura 4 y, finalmente, las constantes del ajuste se muestran en la Tabla 2.

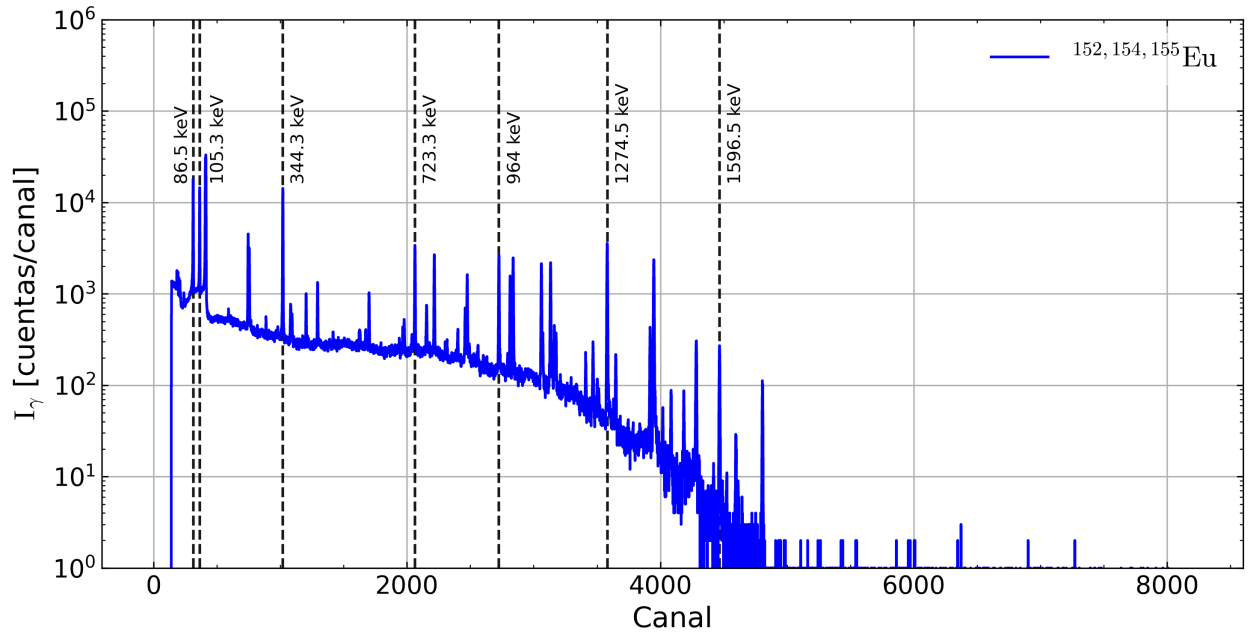


Figura 3. Espectro para la muestra calibracionEu-Ge8K.xy.

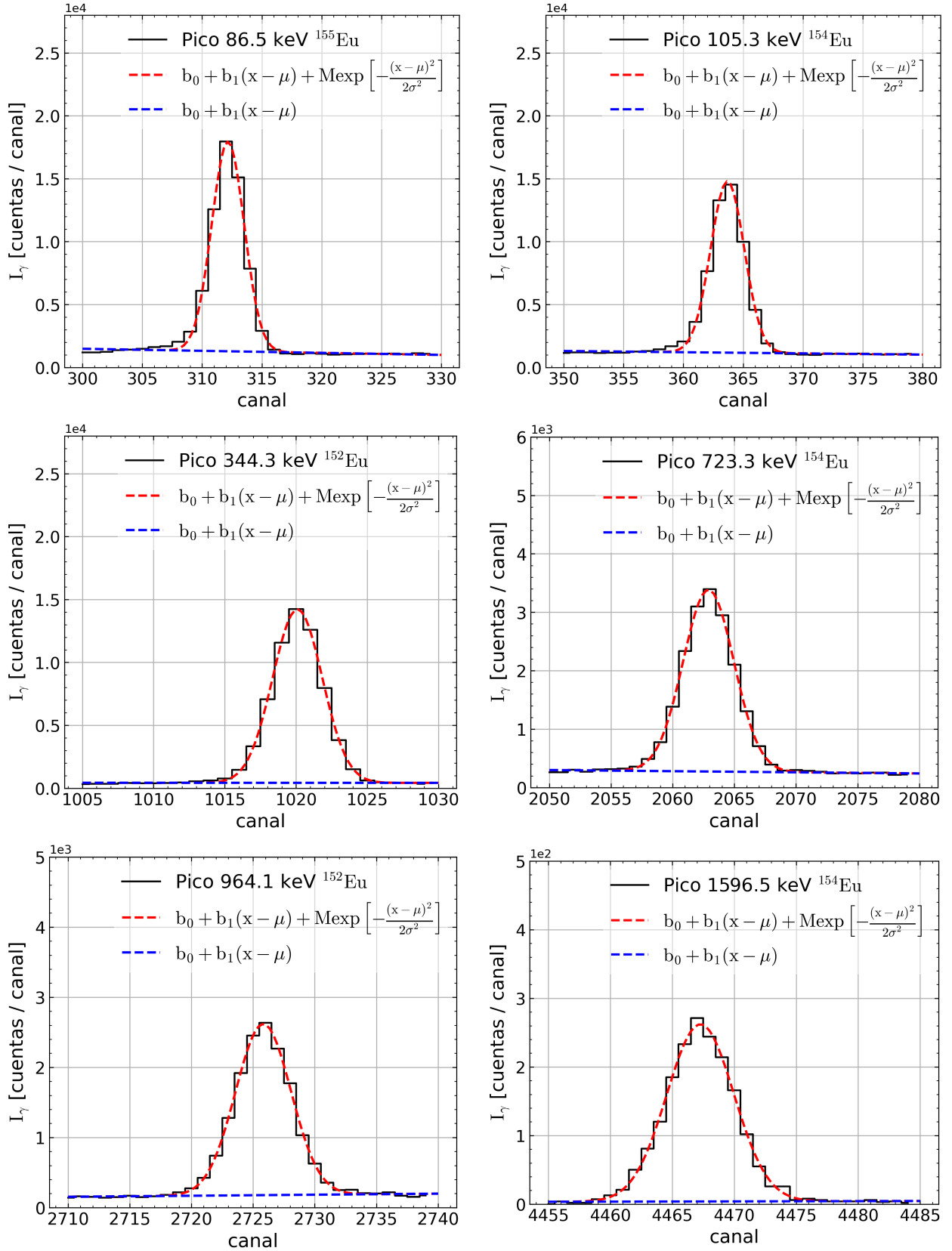


Figura 4. Ajuste a los fotopicos del espectro calibracionEu-Ge8K.xy. Por fines visuales no se muestra el ajuste del pico correspondiente a 1596.5 keV, sin embargo su ajuste se realizo de misma forma que el resto de picos.

Tabla 2. Datos de ajuste para los picos del espectro calibracionEu-Ge8K.xy.

E_γ [keV]	Canal	σ [canales]	FWHM [canales]	I_γ [cuentas]
86.5	312.16(2)	1.36(2)	3.19(4)	56612(886)
105.3	363.68(1)	1.41(1)	3.32(4)	48092(665)
344.3	1020.10(1)	1.74(1)	4.10(3)	60116(488)
723.3	2062.91(1)	2.06(1)	4.84(3)	16022(138)
964.1	2725.83(2)	2.25(2)	5.29(5)	13747(151)
1274.5	3580.55(1)	2.45(1)	5.77(4)	21471(169)
1596.5	4467.27(3)	2.70(4)	6.37(9)	1749(31)

Cifras significativas?

El análisis individual de cada pico se llevó a cabo mediante un ajuste gaussiano, cuyos resultados se presentan en la Figura 2. Este procedimiento permitió determinar con precisión el centroide de cada pico, valor que se utiliza como referencia de canal en los datos organizados en la Tabla 1. A partir de esta información, se realizó un ajuste lineal utilizando los centroides obtenidos, lo cual permitió establecer una relación directa entre la energía y los canales detectados. Dicho ajuste se muestra de manera detallada en la representación gráfica de la Figura 5, mientras que los parámetros del ajuste se reportan en la Tabla 3. Finalmente, con estos parámetros, se procedió a ajustar los picos en el espectro de los distintos isótopos de *Eu*, un proceso que involucró la comparación con los espectros experimentales presentados anteriormente y cuyos resultados consolidados se exponen en la Tabla 2.

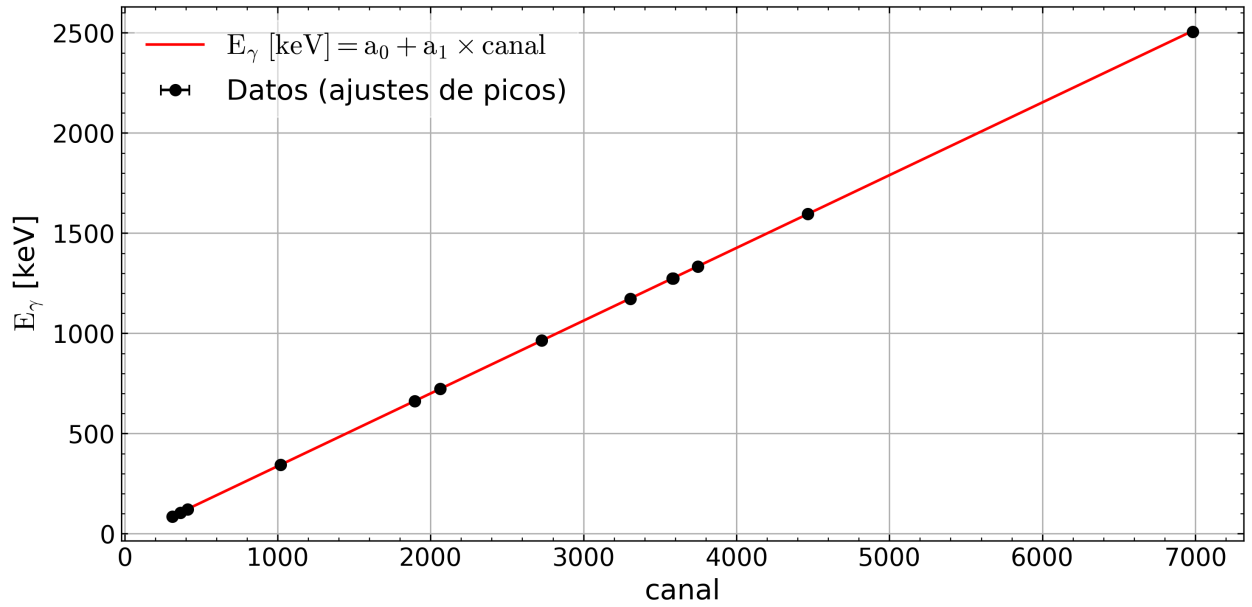


Figura 5. Ajuste para la calibración de canal a E_γ

Tabla 3. Constantes relacionadas al ajuste de la Figura 5.

a_0 [keV]	a_1 [keV/canal]
-26.39(2)	0.3631(1)

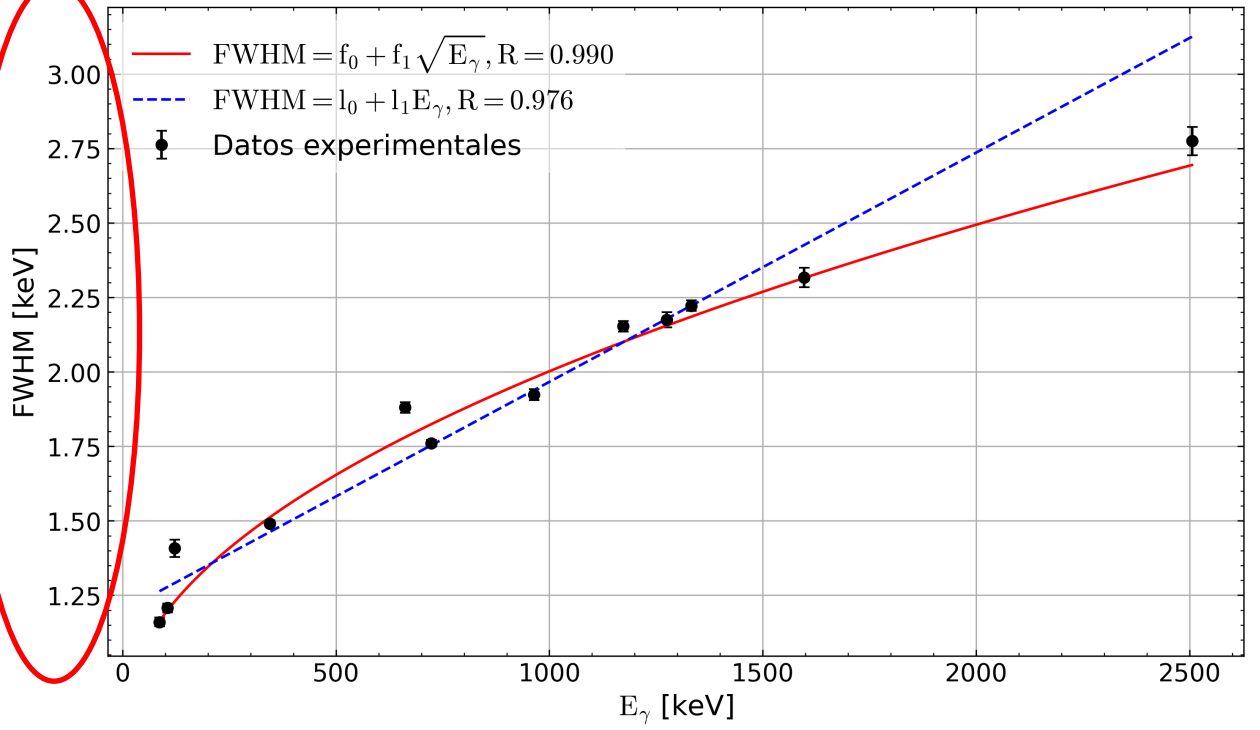


Figura 6. Ajuste para la relación entre el FWHM y E_γ

Tabla 4. Constantes relacionadas al ajuste de la Figura 6.

R=0.990		R=0.977	
f_0 [keV]	f_1 [$\sqrt{\text{keV}}$]	l_0 [keV]	l_1 [keV]
0.814(12)	0.038(1)	1.197(8)	0.001(1)

El ajuste de la relación entre el ancho completo a la mitad del máximo (FWHM) y la energía (E_γ), presentado en la Figura 6, revela una clara preferencia por el modelo que sigue una dependencia con la raíz cuadrada de la energía. La alta correlación ($R = 0.990$) de este modelo sugiere que el comportamiento del ensanchamiento de los picos está dominado por fluctuaciones estadísticas inherentes al proceso de detección. En contraste, aunque el modelo lineal también proporciona un ajuste razonable, la menor correlación ($R = 0.976$) indica una menor precisión en la representación de los datos experimentales, especialmente en los extremos del espectro de energías.

Tabla 5. Valores para el calculo de la eficiencia. Los datos de actividad A_0 y branching ratio b_γ se toman de las tablas presentadas en la guía [Cristancho, 2025].

E_γ [keV]	I_γ [cuentas]	A^a [kBq]	b_γ	A_γ [kBq]	ϵ
86.5	56612(886)	2.27	3.10	0.07	805802.17(1260597)
105.3	48092(665)	3.24	2.20	0.07	674981.40(933846)
344.3	60116(488)	4.17	26.57	1.11	54200.69(43999)
723.3	16022(138)	3.24	20.20	0.65	24491.03(21095)
964.1	13747(151)	4.17	14.63	0.61	22509.71(24726)
1274.5	21471(169)	3.24	35.00	1.13	18942.00(14910)
1596.5	1749(31)	3.24	1.81	0.06	29836.84(52910)

Cifras significativas?

La Tabla 5 presenta los valores de eficiencia obtenidos para cada energía, mostrando cómo esta disminuye de manera significativa conforme E_γ incrementa. En la Figura 7, se observa que la eficiencia normalizada decae rápidamente, estabilizándose en valores bajos a partir de aproximadamente 200 keV. Esta tendencia refleja la menor sensibilidad del detector para fotones de alta energía, limitando su uso efectivo en este rango energético.

La actividad de las fuentes radiactivas se calculó utilizando la ecuación 3, considerando un tiempo inicial $t_0 = 2006 - 07 - 13$ y un tiempo final $t_1 = 2018 - 05 - 29$, lo que abarca un periodo de casi 12 años. Este procedimiento permitió ajustar la actividad a la fecha de la medición, asegurando que los cálculos de eficiencia fueran consistentes con las condiciones experimentales.

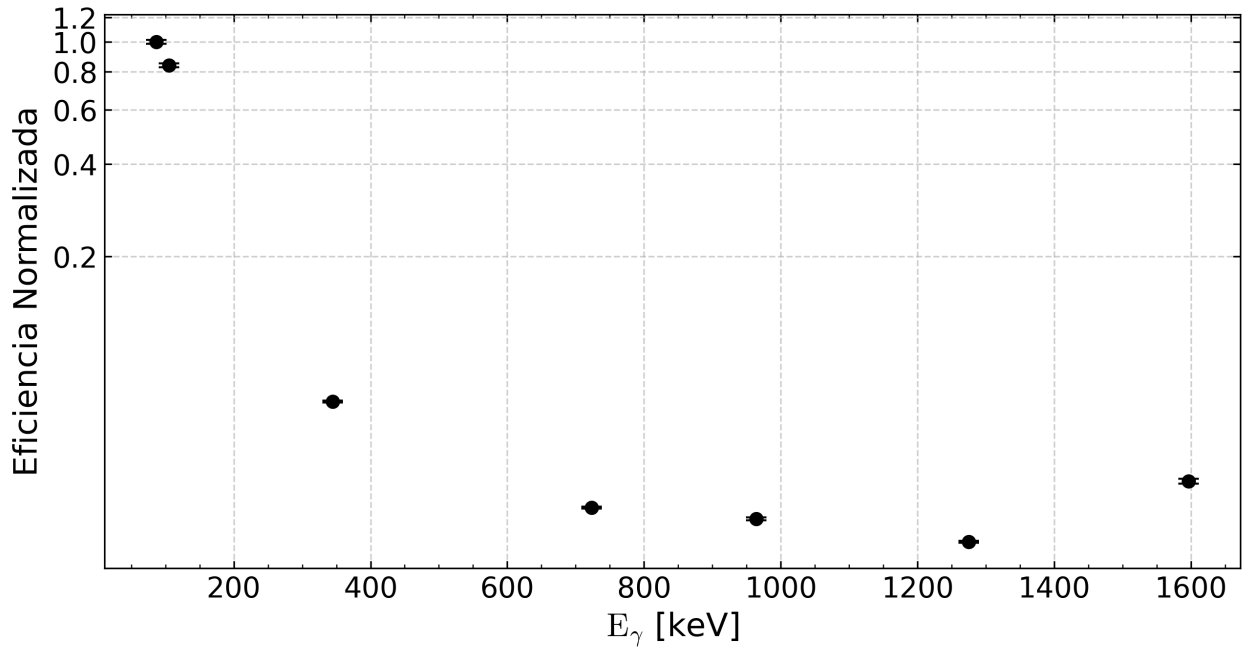


Figura 7. Valores de eficiencia normalizados para diferentes energías.

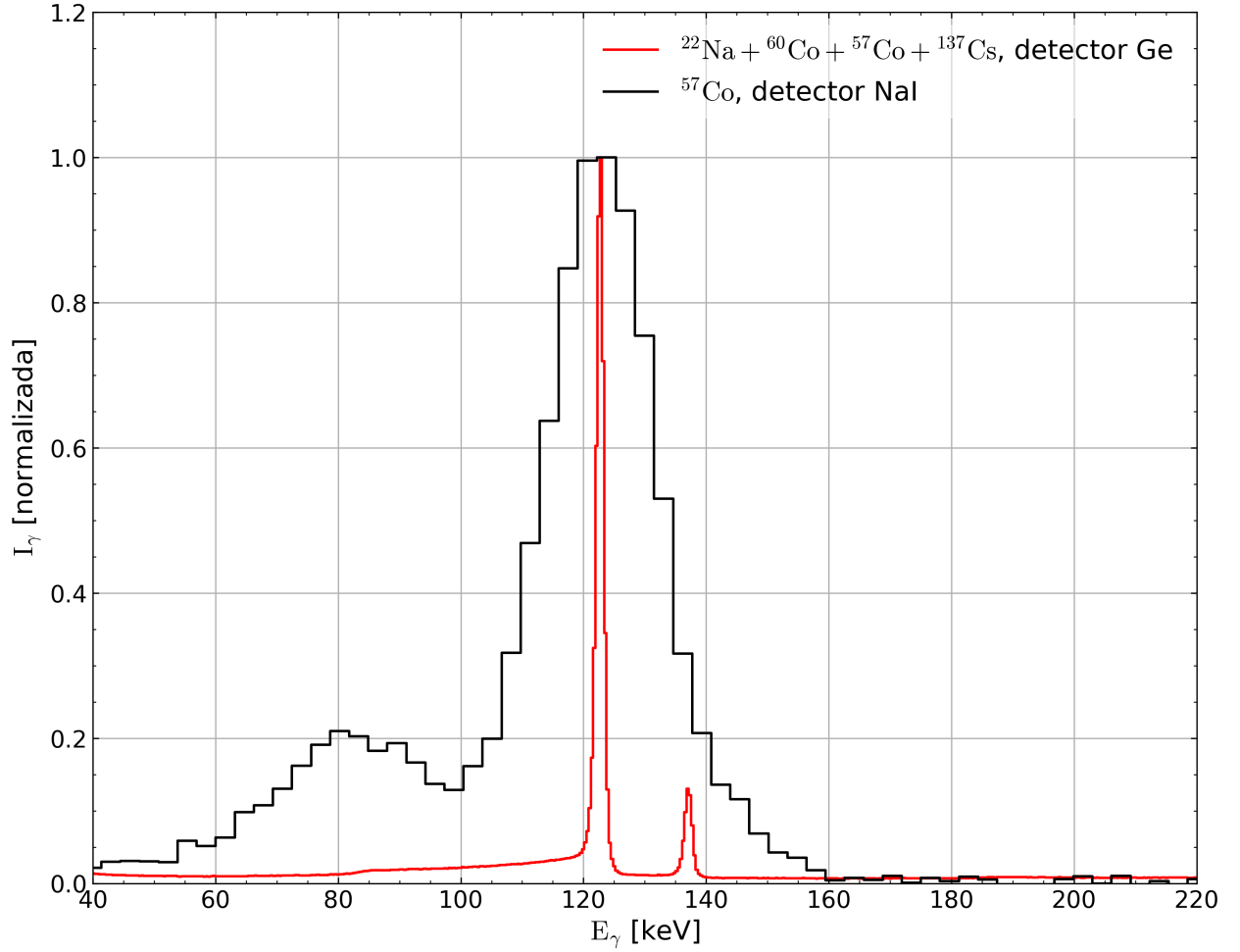


Figura 8. Comparación del espectro normalizado obtenido para el ^{57}Co con un detector de Ge y NaI.

3.1. Observaciones:

- El detector Ge muestra picos estrechos y bien definidos a 122 keV y 136 keV, permitiendo una clara separación de energías cercanas.
- En contraste, el detector NaI presenta picos más anchos y solapados, lo que dificulta la distinción entre picos cercanos y reduce la precisión espectral.
- El espectro del detector Ge se caracteriza por un fondo bajo y uniforme, lo que minimiza la interferencia con los picos de interés.
- El detector NaI exhibe un mayor ruido de fondo, especialmente en las regiones de baja energía, lo cual afecta la relación señal/ruido y puede enmascarar picos pequeños.
- El espectro del detector NaI presenta un pico adicional alrededor de 80 keV, debido al fenómeno de retrodispersión, mientras que el detector Ge ofrece un análisis más limpio al evitar estas señales no deseadas.

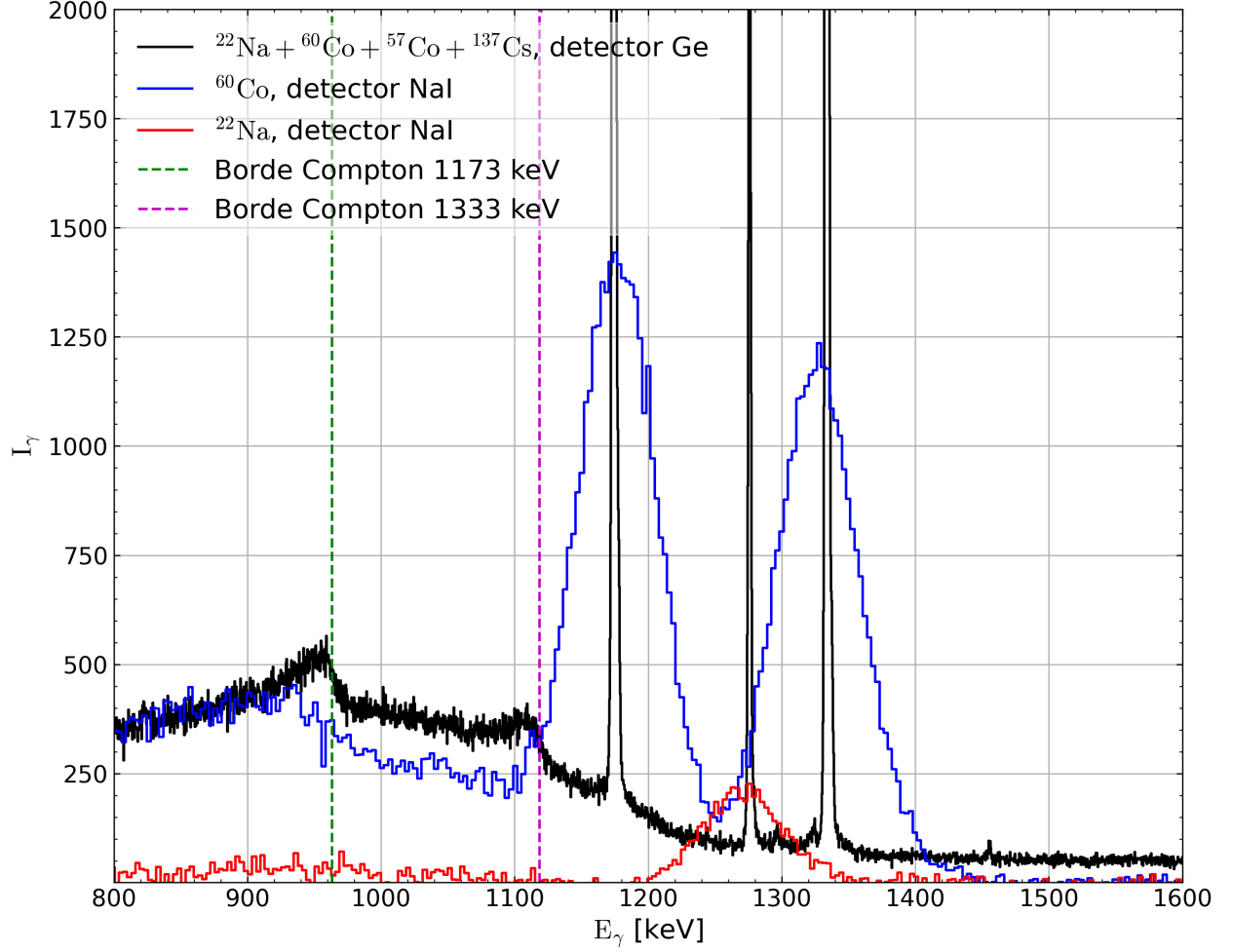


Figura 9. Comparación del obtenido para la visualización de los fotopicos del ^{60}Co y ^{22}Na .

La comparación de la región Compton en los espectros obtenidos con los detectores de germanio (Ge) y de yoduro de sodio (NaI) evidencia diferencias significativas en la claridad y calidad del análisis espectral. En el detector Ge, la intensidad relativa de la región Compton es considerablemente menor en proporción al pico principal del espectro, lo que contribuye a una mayor claridad en la interpretación de los espectros. Además, un análisis detallado de esta región muestra que los picos dentro de la región Compton son más prominentes en el detector Ge, lo cual facilita su identificación y permite un análisis más preciso de los eventos de dispersión Compton.

En contraste, el detector NaI presenta una distribución Compton más ancha y pronunciada, reflejando una mayor probabilidad de interacciones parciales en el cristal. Esta característica se traduce en una pérdida de resolución espectral, ya que la dispersión de eventos genera un aumento del ruido de fondo y una disminución en la nitidez de los picos espectrales. Mientras que en el detector Ge el borde Compton y su meseta asociada son menos prominentes, lo cual indica una mayor eficiencia en la recolección de la energía total de los fotones detectados, en el NaI esta región es más difusa, dificultando la correcta diferenciación de los eventos asociados a la dispersión Compton y afectando negativamente la precisión del

análisis espectral.

4. Conclusiones

Los cálculos de eficiencia y el análisis de los fotopicos han demostrado que, aunque contienen información relevante, la manera en que se desarrollan los experimentos, así como las características específicas del detector, juegan un papel fundamental en la cantidad de información y la precisión de los datos obtenidos. La resolución del detector, en particular, limita la capacidad de discernir claramente las características de los picos, especialmente cuando se trata de muestras con picos cercanos, como en el caso del ^{57}Co y el ^{137}Cs . En estos casos, la definición del detector no es suficiente para una identificación precisa de las características individuales de los picos, lo que puede afectar la exactitud de las mediciones.

Asimismo, el tiempo de desarrollo del experimento es un factor crucial para la obtención de datos más precisos. Un mayor tiempo de adquisición permite realizar mejores ajustes de eficiencia, lo que puede contribuir a la reducción de elementos estadísticos que afectan la calidad de los resultados, como el FWHM y la intensidad de cada pico. De esta manera, se facilita la obtención de una representación más precisa de los fotopicos y, por ende, de las propiedades de las muestras analizadas.

Referencias

Cristancho, Fernando (28 de ene. de 2025). *Instrumentación Nuclear: Prácticas Experimentales*. Universidad Nacional de Colombia.