

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Calibración de detectores de Ge

Instrumentación Nuclear

Pedro Luis Epalza Castillo
Juan David Hernández Pineda
Miguel Augusto Rojas Jiménez
Andrés Felipe Pinzón Harker

Profesor:
Luis Fernando Cristancho Mejia

Universidad Nacional de Colombia
Bogotá D.C.
Facultad de Ciencias
25 de febrero de 2025

Introducción

En la espectroscopia de radiación gamma, el uso diverso de detectores provee información según lo soliciten las condiciones: si es una muestra menos activa y se requiere un espectro poco definido pero eficiente, se proveería de un centelleador NaI, generalmente portable y fácil de obtener el espectro. En esta práctica experimental se usarán los espectros de radiación gamma desde un detector de Germanio (Ge) de alta pureza, el cual se encuentra permanentemente en el laboratorio y requiere unas condiciones específicas para su uso, pero provee una definición sin igual en este estándar.

El objetivo principal de esta práctica es estudiar los espectros arrojados por el detector Ge de una muestra de diferentes isótopos radiactivos, entre ellos: ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs y ^{57}Co en conjunto, y luego una muestra de distintos isótopos del Europio ^{152}Eu , ^{154}Eu y ^{155}Eu , realizando el ejercicio de determinación de las cantidades espectroscópicas experimentales, la calibración de las energías y finalmente la comparación con un centelleador de NaI.

Preparación

Se obtiene a partir de una muestra proveída en el laboratorio del Grupo de Física Nuclear con fechas diversas del año 2006, según las tablas C.2 y C.3 de [1], los datos respecto a la muestra *combinada* de elementos isotópicos (^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs y ^{57}Co) en `calibracionNaCoCoCs-Ge8K.xy` y la muestra de isótopos del *Europio* con ^{152}Eu , ^{154}Eu y ^{155}Eu en `calibracionEu-Ge8K.xy`.

Espectro Combinado

Se obtiene el espectro sin procesamiento mostrado en la fig. 1, de los 8192 canales tomados con un filtro gaussiano para reducir el ruido en un factor $\sigma = 2.0$, se observan los principales picos de radiación hasta el canal 7000. Además, se observaron los picos en escala semi-log mostrada en la fig. 2, de los que se destacan alrededor de 9 picos, que podrán ser etiquetados según la calibración lo indique en los decaimientos de cada elemento.

Se destaca la importancia de tener un método general para atribuir un pico de radiación fuera del ruido, del cuál se propone una forma de suavizar, siempre que no haya un cambio en una cierta tolerancia ϵ con el promedio en los alrededores, eliminando el ruido y las radiaciones de fondo a través de las dos diferentes muestras de distintos espectros, permitiendo caracterizar, o también en general realizar la calibración y diferenciar cuál canal destaca para atribuirle una radiación que no sea de fondo, sino característica de los elementos isotópicos estudiados.

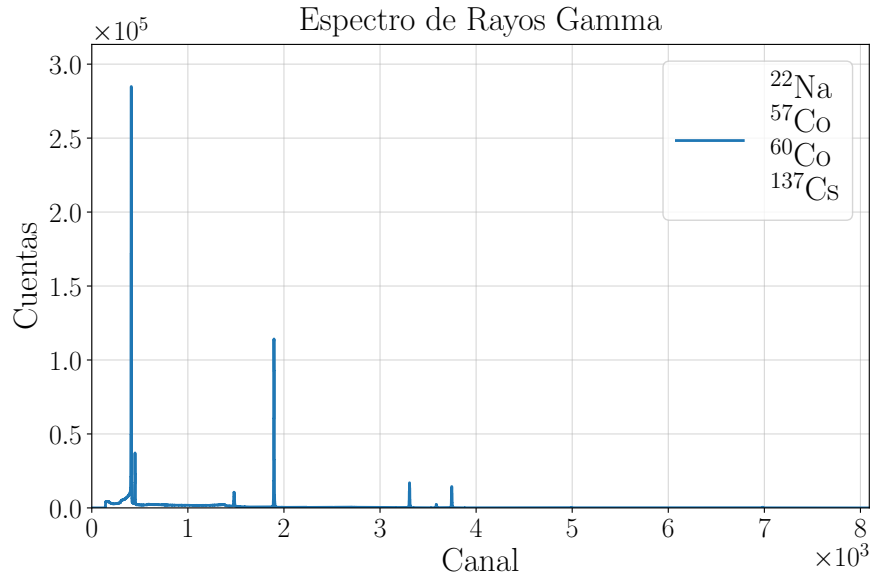


Figura 1: Espectro general de los 8k canales de los isótopos: ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs y ^{57}Co .

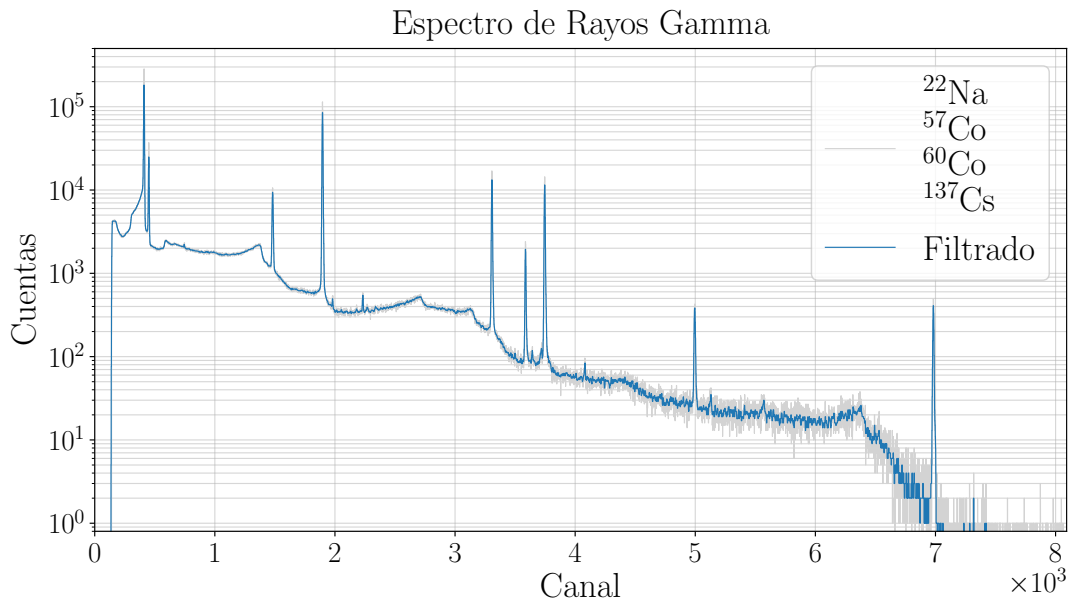


Figura 2: Espectro en escala semi-log de las cuentas de los 8k canales en el espectro combinado de los isótopos: ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs y ^{57}Co .

De la fig. 2, la tendencia de picos se distribuye principalmente desde el canal 141, donde se empiezan a obtener mediciones consistentes del fondo de radiación (en esta sección, generalmente Rayos X por *radiación de frenado*), hasta el canal 7000 donde se observa el último pico característico. Al obtener los ajustes se atribuirá un nivel de energía como ha sido usual en anteriores prácticas para la calibración de energía y la discriminación de los picos según el último método mencionado, a través de la teoría de decaimiento se asignan los niveles de energía.

Espectro Isótopos de Europio

Se presenta el espectro sin mayor procesamiento en la fig. 3, nuevamente, con el filtro gaussiano en un factor $\sigma = 2.0$.

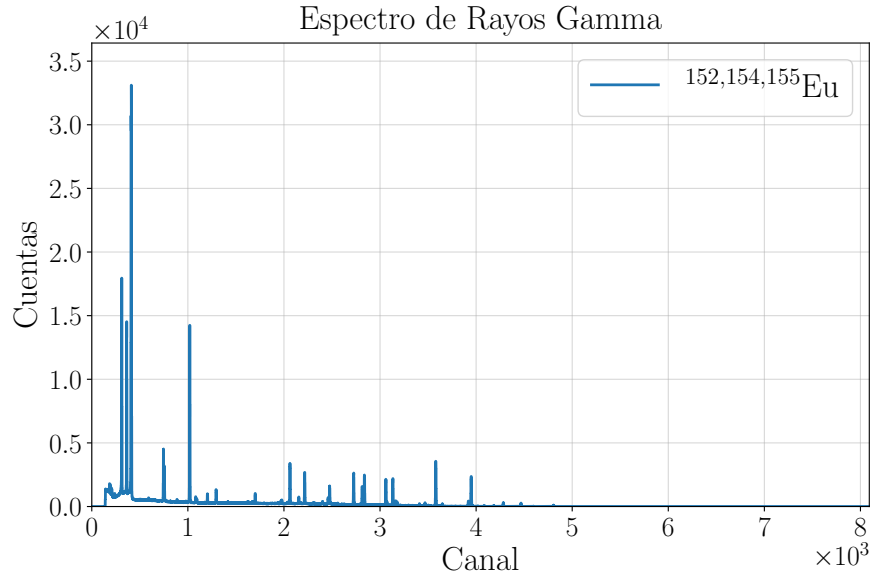


Figura 3: Espectro general de los 8k canales de los isótopos: ^{152}Eu , ^{154}Eu y ^{155}Eu .

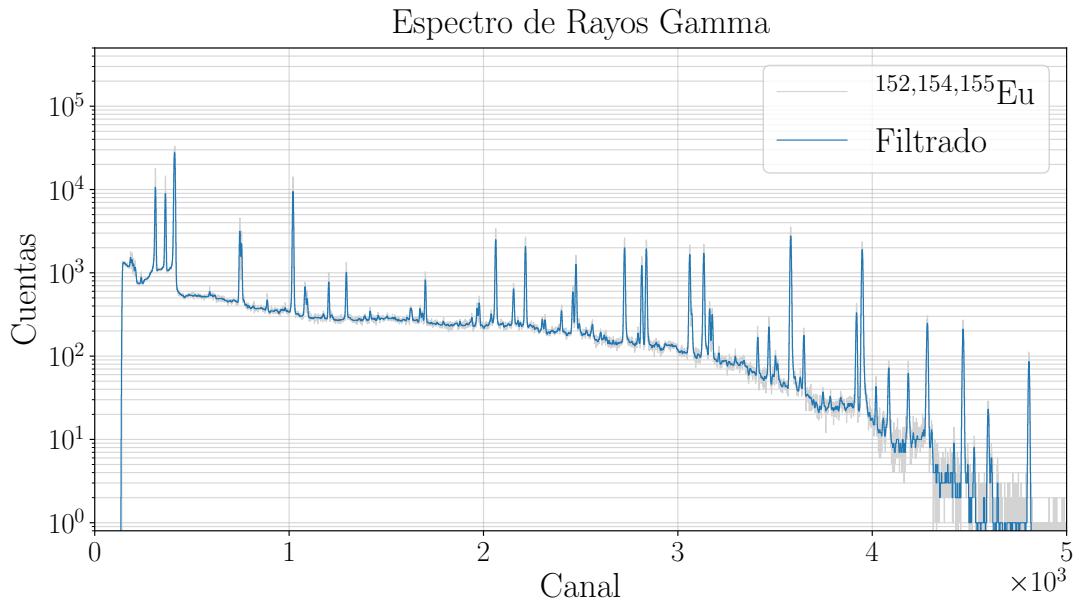


Figura 4: Espectro en escala semi-log de las cuentas de los 8k canales en el espectro combinado de los isótopos: ^{152}Eu , ^{154}Eu y ^{155}Eu .

De la fig. 3, se observa que se presenta mayor dificultad en encontrar los picos característicos, debido a que se alcanzan a reconocer más de 33 picos, interesa hacer el suavizado mostrado en la fig. 4, además, los conteos de los canales mayores al canal 5000 se pueden considerar

despreciables. En esta situación sólo se distinguirán alrededor de 7 picos característicos de estos isótopos.

1. Calibraciones

En primer lugar, se procede a realizar los ajustes de cada pico identificado, según la ec. 1.1.

$$G(x[\text{canal}])[\text{cuentas}] = A[\text{cuentas}] \exp \left(-\frac{(x[\text{canal}] - \mu[\text{canal}])^2}{2(\sigma[\text{canal}])^2} \right) + a_0[\text{cuentas}] + a_1[\text{cuentas}/\text{canal}] x \quad (1.1)$$

Donde x es el canal donde se va a justar la gaussiana $G(x)$, A es la amplitud, μ es el centroide, σ es la desviación estándar típica, a_0 y a_1 son los ajustes de la recta del fondo, todas en las unidades dadas por la misma ecuación. Se procede a determinar las *cantidades espectroscópicas* de cada pico.

1.1. Cantidades Espectroscópicas Espectro Combinado

Se determina en la fig. 5 el ajuste del pico del isótopo ^{57}Co atribuible a la energía 122.1 keV con los parámetros dados en la tabla 1. Del decaimiento β^- , el isótopo ^{57}Co decae en 100 % a través de captura electrónica [2] al ^{57}Fe y se genera el pico de 136 keV en el 99.80 % de los casos, el cual se corre en un cierto porcentaje debido al *escape peak*.

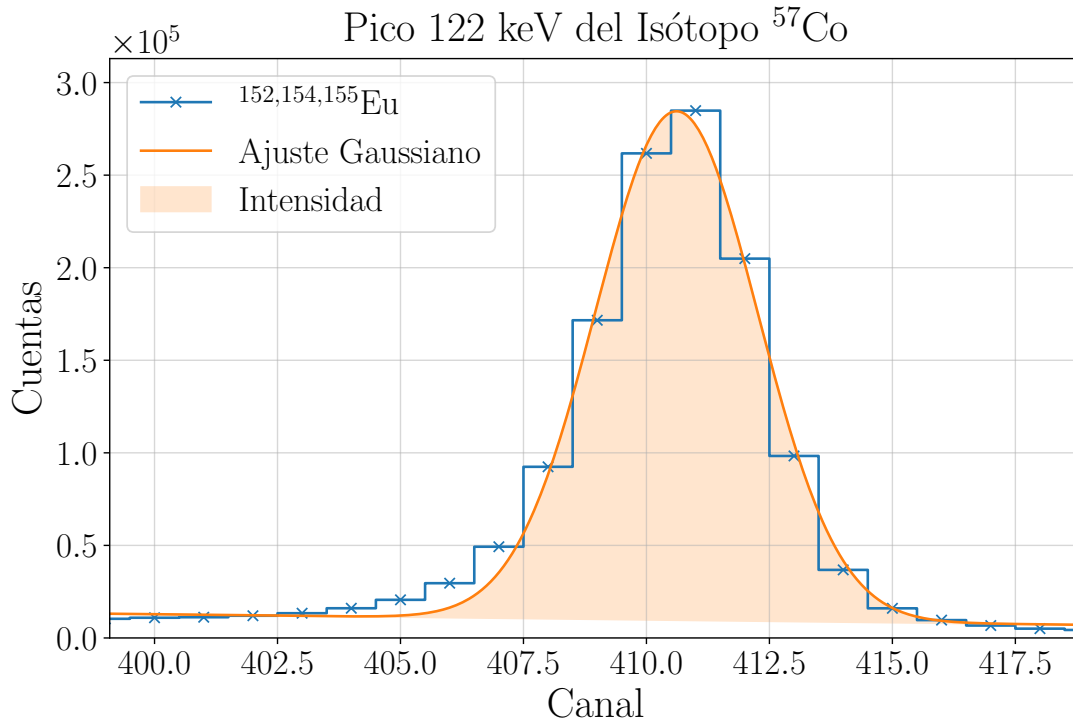


Figura 5: Pico del ^{57}Co de transición gamma con parámetros dados en la tab. 1.

Parámetro	Valor	Unidad
μ	410.614(23)	canal
σ	1.646(24)	canal
A	$2.749(34) \times 10^5$	cuentas
I	$1.14(35) \times 10^6$	cuentas
a_0	$1.34(23) \times 10^5$	cuentas
a_1	-302(55)	cuentas/canal
FWHM	3.88(6)	canal

Tabla 1: Parámetros espectroscópicos del ^{57}Co donde μ , σ , A , a_0 y a_1 son como describe la ec. 1.1 e I es la intensidad a través del área del ajuste gaussiano, y $FWHM$ el ancho en la mitad de la altura del pico, obtenidos de la fig. 5.

El siguiente pico caracterizado corresponde al isótopo ^{137}Cs en la energía de 661.7 keV, donde se precisará únicamente del producido por la transición de estabilidad, luego del decaimiento del isótopo ^{137}Ba del estado metaestable al estable en un 95 % de los casos [2]. Se muestra en la fig. 6 el ajuste gaussiano respectivo y los parámetros de ajuste y caracterización en la tab. 2.

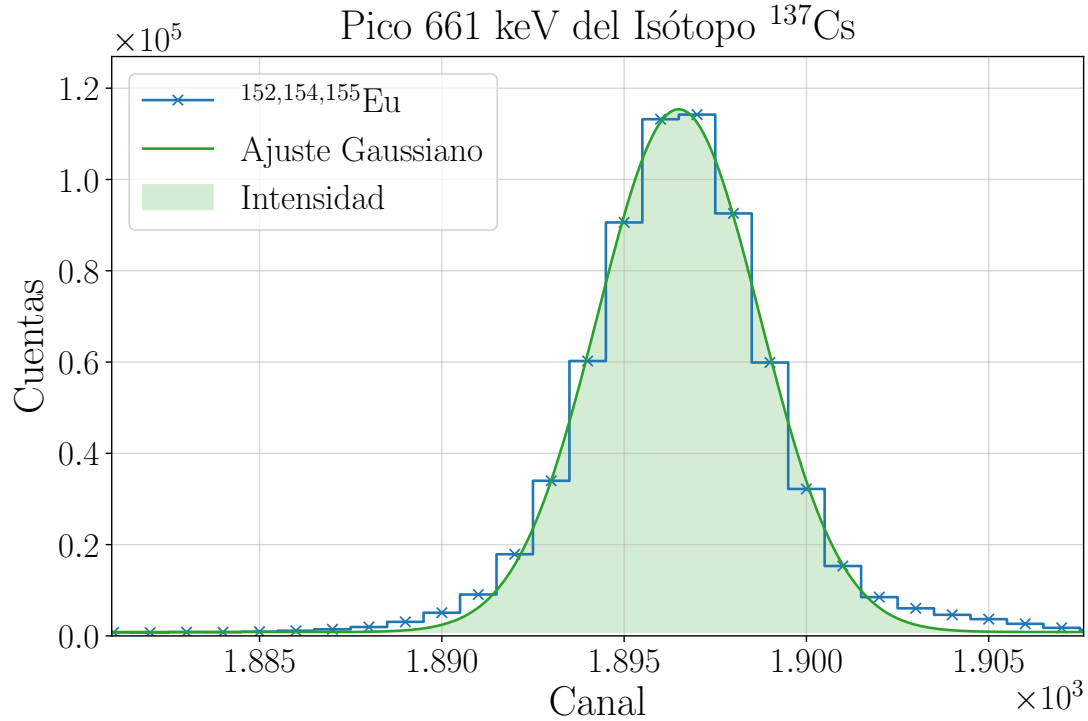


Figura 6: Pico del ^{137}Cs de estabilidad con parámetros dados en tabla 2

Parámetro	Valor	Unidad
μ	1896.50(12)	canal
σ	2.221(12)	canal
A	$1.1455(55) \times 10^5$	cuentas
I	$6.4(1) \times 10^5$	cuentas
a_0	$(-0.5 \pm 4.4) \times 10^3$	cuentas
a_1	0.7 ± 2.4	cuentas/canal
FWHM	5.23(3)	canal

Tabla 2: Parámetros espectroscópicos del ^{137}Cs donde μ , σ , A , a_0 y a_1 son como lo describe la ec. 1.1 e I es la intensidad a través del área del ajuste gaussiano, y FWHM el ancho en la mitad de la altura del pico, obtenidos de la fig. 5.

En la fig. 7 se identifica el fotopico del ^{22}Na , ubicado en la energía de 1274.5 keV, debido a la estabilidad por desexcitación del isótopo ^{22}Ne en un 99.94 % de los casos [2]. Se ajusta la distribución gaussiana a este pico de radiación en la fig. 7 y se obtienen los resultados dados en la tabla 3.

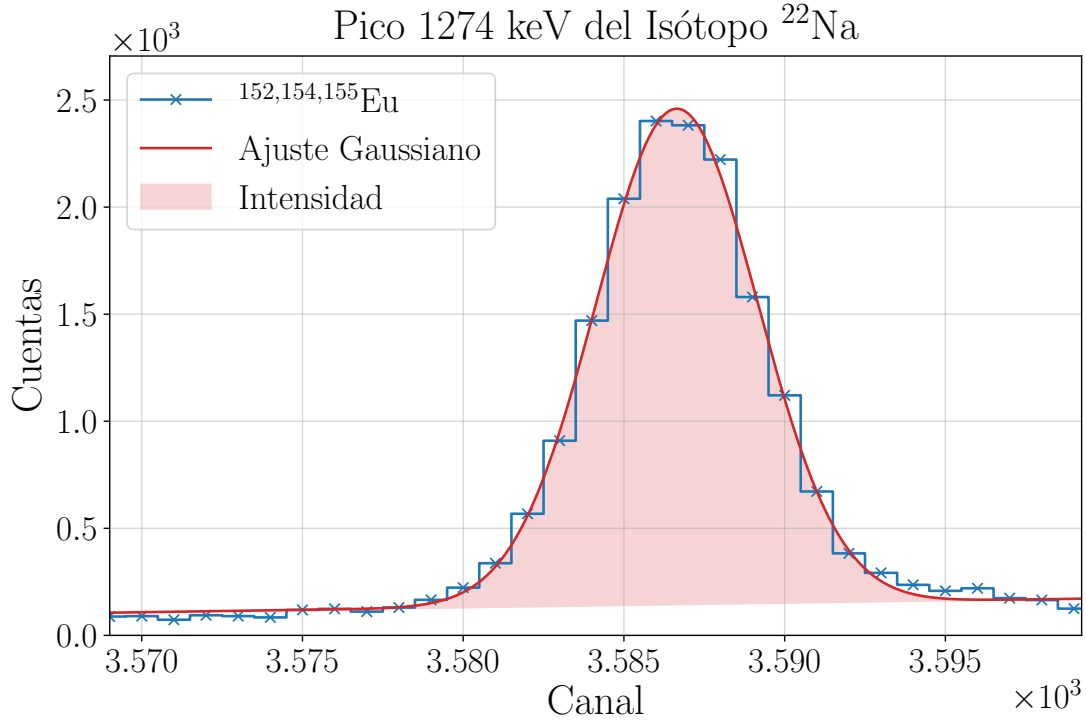


Figura 7: Pico del ^{22}Na con parámetros dados en tabla 3.

Parámetro	Valor	Unidad
μ	3586.66(26)	canal
σ	2.520(22)	canal
A	2316(17)	cuentas
I	$1.462(26) \times 10^4$	cuentas
a_0	$(-0.5 \pm 4.4) \times 10^3$	cuentas
a_1	0.7 ± 2.4	cuentas/canal
FWHM	5.93(5)	canal

Tabla 3: Parámetros espectroscópicos del ^{22}Na donde μ , σ , A , a_0 y a_1 son como describe la ec. 1.1 e I es la intensidad a través del área del ajuste gaussiano, y $FWHM$ el ancho en la mitad de la altura del pico, obtenidos de la fig. 7.

El cuarto pico determinado del espectro inicial es del isótopo ^{60}Co , generado por transición gamma del decaimiento β^- hacia el ^{60}Ni [2]. Se obtienen las mediciones espectroscópicas respectivas de la fig. 8 en la tabla 4.

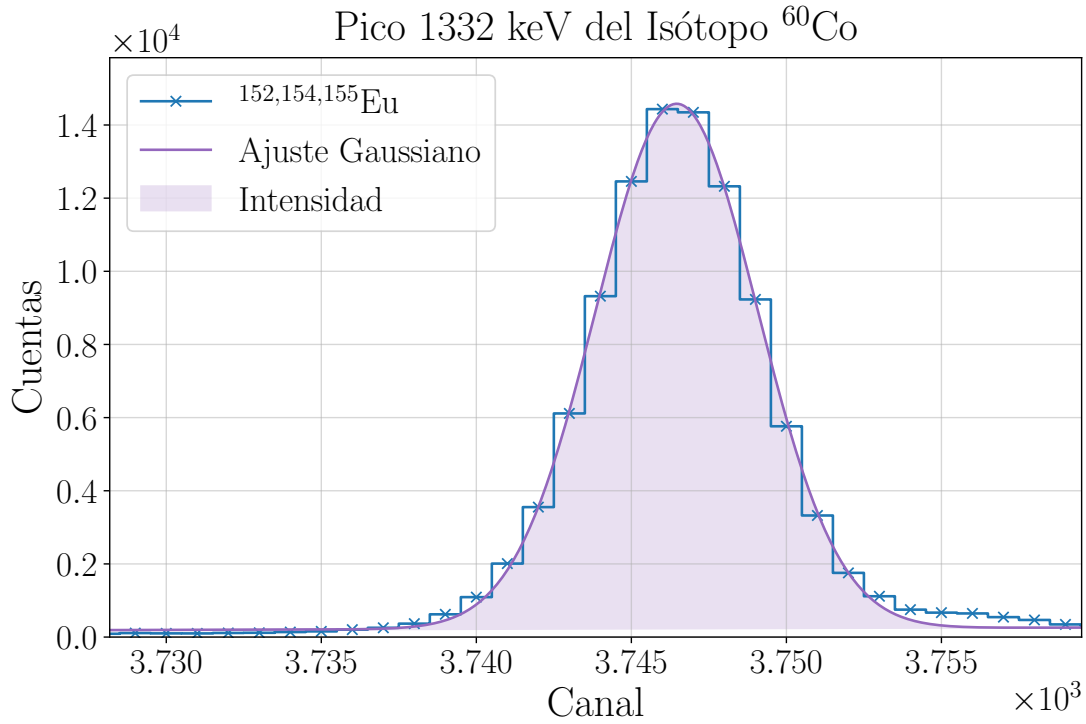


Figura 8: Pico del ^{60}Co con parámetros dados en tabla 4.

Parámetro	Valor	Unidad
μ	3746.461(19)	canal
σ	2.612(20)	canal
A	$1.44(1) \times 10^4$	cuentas
I	$9.40(15) \times 10^4$	cuentas
a_0	$-8(7) \times 10^3$	cuentas
a_1	2.2(18)	cuentas/canal
FWHM	6.15(5)	canal

Tabla 4: Parámetros espectroscópicos del ^{60}Co donde μ , σ , A , a_0 y a_1 son como describe la ec. 1.1 e I es la intensidad a través del área del ajuste gaussiano, y $FWHM$ el ancho en la mitad de la altura del pico, obtenidos de la fig. 8.

El último pico a registrar en la calibración se encuentra en la energía de 2505.7 keV, como *pico suma* cuando coinciden las radiaciones de los picos anteriores de 1332 keV y 1274 keV de los elementos isotópicos ^{60}Co y ^{22}Na . Se obtienen las mediciones espectroscópicas respectivas de la fig. 9 en la tabla 5.

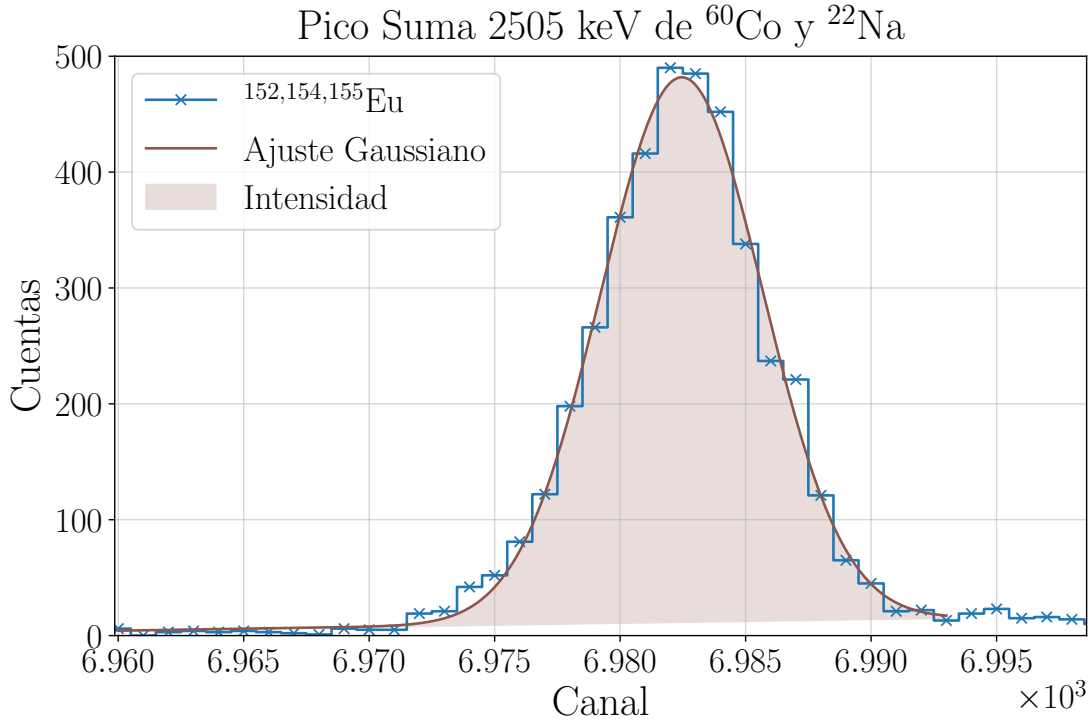


Figura 9: Pico suma del ^{60}Co y ^{22}Na con parámetros dados en tabla 5.

Parámetro	Valor	Unidad
μ	6982.45(5)	canal
σ	3.23(7)	canal
A	470(7)	cuentas
I	$3.80(15) \times 10^3$	cuentas
a_0	$-2(2) \times 10^3$	cuentas
a_1	0.33(30)	cuentas/canal
FWHM	7.60(16)	canal

Tabla 5: Parámetros espectroscópicos de los isótopos ^{60}Co y ^{22}Na donde μ , σ , A , a_0 y a_1 son como describe la ec. 1.1 e I es la intensidad a través del área del ajuste gaussiano, y $FWHM$ el ancho en la mitad de la altura del pico, obtenidos de la fig. 9.

La tabla 6 resume el comportamiento de los picos encontrados, la cual permite generar la posterior calibración.

E_γ (keV)	canal	σ (canales)	I_γ (cuentas)
122.1	410.614(23)	1.646(24)	$1.13(35) \times 10^6$
661.7	1896.50(12)	2.221(12)	$6.4(1) \times 10^5$
1274.5	3586.66(26)	2.520(22)	$1.462(26) \times 10^4$
1332.5	3746.461(19)	2.612(20)	$9.40(15) \times 10^4$
2505.7	6982.45(5)	3.23(7)	$3.80(15) \times 10^3$

Tabla 6: Calibración de la energía de cada pico bien diferenciado en el espectro combinado.

1.2. Cantidades Espectroscópicas Espectro Isótopos Eu

Así como se realizó en la calibración de la primera parte con diferentes isótopos, ahora, se realiza con el Europio. Se determina en la fig. 10 el ajuste del pico del isótopo ^{155}Eu atribuible a la energía 86.5 keV y con los parámetros dados en la tabla 7. Del isótopo ^{155}Eu decae en 100 % a través de desintegración β^- al estado base en ^{155}Gd [3].

Parámetro	Valor	Unidad
μ	312.155(17)	canal
σ	1.369(18)	canal
A	$1.673(18) \times 10^4$	cuentas
I	$5.74(16) \times 10^4$	cuentas
a_0	$1.71(94) \times 10^3$	cuentas
a_1	-2(3)	cuentas/canal
FWHM	3.22(4)	canal

Tabla 7: Parámetros espectroscópicos del ^{155}Eu donde μ , σ , A , a_0 y a_1 son como describe la ec. 1.1 e I es la intensidad a través del área del ajuste gaussiano, y $FWHM$ el ancho en la mitad de la altura del pico, obtenidos de la fig. 10.

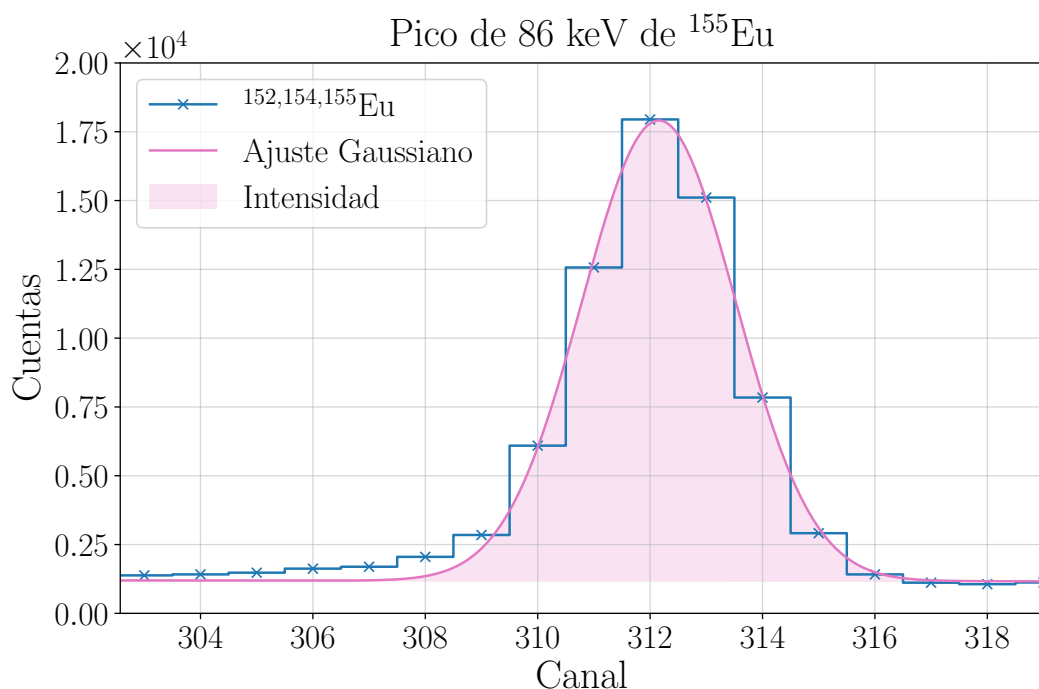


Figura 10: Pico del ^{155}Eu de transición gamma con parámetros dados en la tab. 7.

Se determina en la fig. 11 el ajuste del pico del isótopo ^{152}Eu atribuible a la energía 105.3 keV y con los parámetros dados en la tabla 8. Del isótopo ^{152}Eu decae en 72.1 % a través de captura electrónica y cerca del 0.027 % por emisión de positrones al ^{152}Sm y el 27.9 % por decaimiento β^- al ^{152}Eu [4].

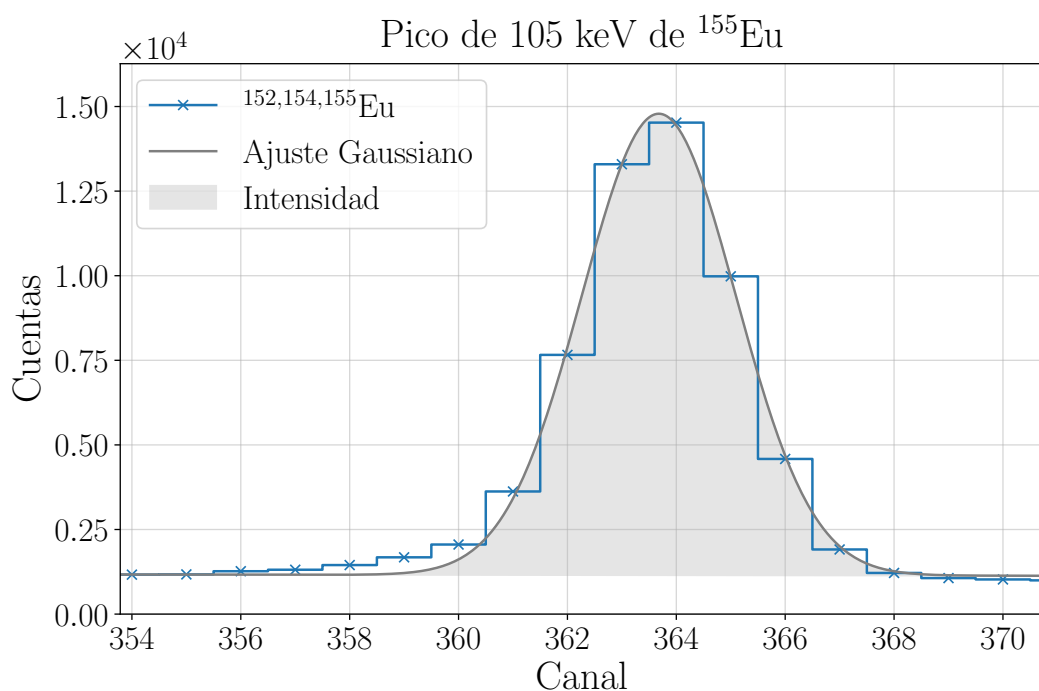


Figura 11: Pico del ^{152}Eu de transición gamma con parámetros dados en la tab. 8.

Parámetro	Valor	Unidad
μ	363.079(14)	canal
σ	1.413(15)	canal
A	$1.264(12) \times 10^4$	cuentas
I	$4.83(11) \times 10^4$	cuentas
a_0	$1.91(88) \times 10^3$	cuentas
a_1	-2(2)	cuentas/canal
FWHM	3.33(4)	canal

Tabla 8: Parámetros espectroscópicos del ^{152}Eu donde μ , σ , A , a_0 y a_1 son como describe la ec. 1.1 e I es la intensidad a través del área del ajuste gaussiano, y $FWHM$ el ancho en la mitad de la altura del pico, obtenidos de la fig. 11.

Se determina en la fig. 12 el ajuste del pico del isótopo ^{152}Eu atribuible a la energía 344.3 keV y con los parámetros dados en la tabla 9. El decaimiento se explicó en la energía 105.3 keV.

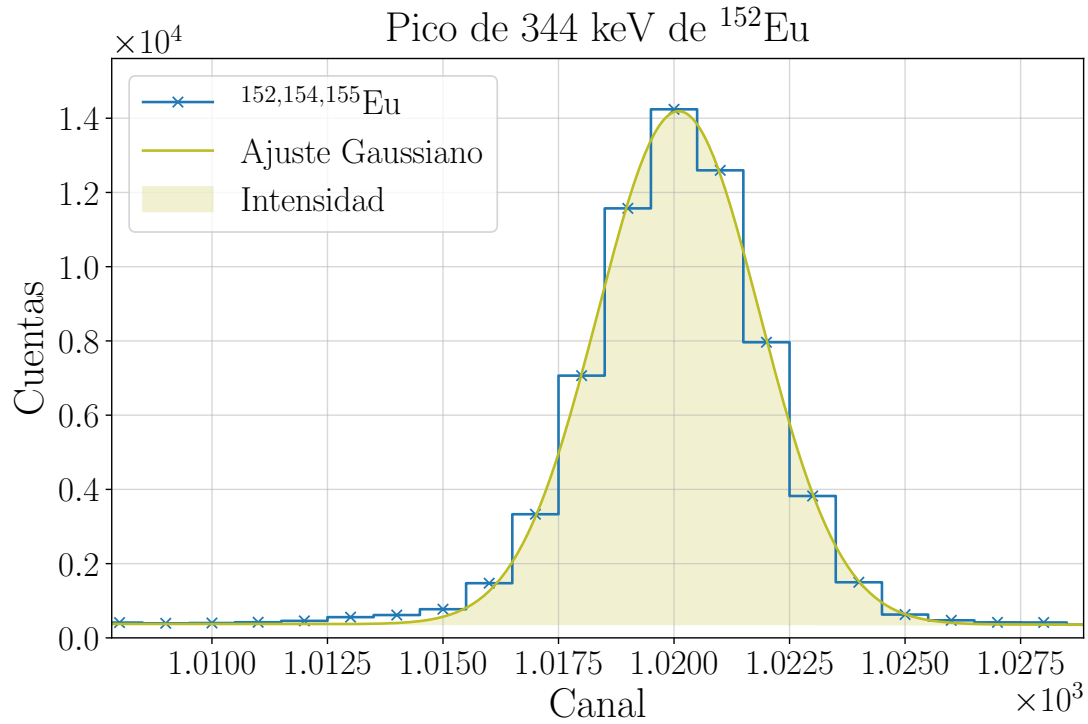


Figura 12: Pico del ^{152}Eu de transición gamma con parámetros dados en la tab. 9.

Parámetro	Valor	Unidad
μ	$1.020(7) \times 10^3$	canal
σ	1.753(8)	canal
A	$1.3826(51) \times 10^4$	cuentas
I	$6.075(56) \times 10^4$	cuentas
a_0	$1.17(54) \times 10^3$	cuentas
a_1	-0.80(53)	cuentas/canal
FWHM	4.127(18)	canal

Tabla 9: Parámetros espectroscópicos del ^{152}Eu donde μ , σ , A , a_0 y a_1 son como describe la ec. 1.1 e I es la intensidad a través del área del ajuste gaussiano, y $FWHM$ el ancho en la mitad de la altura del pico, obtenidos de la fig. 12.

Se determina en la fig. 13 el ajuste del pico del isótopo ^{154}Eu atribuible a la energía 723.2 keV y con los parámetros dados en la tabla 10. Del decaimiento β^- , el isótopo ^{154}Eu decae en 99.982 % a través de excitación de niveles al ^{154}Gd y al 0.018 % por captura electrónica al ^{154}Sm [5].

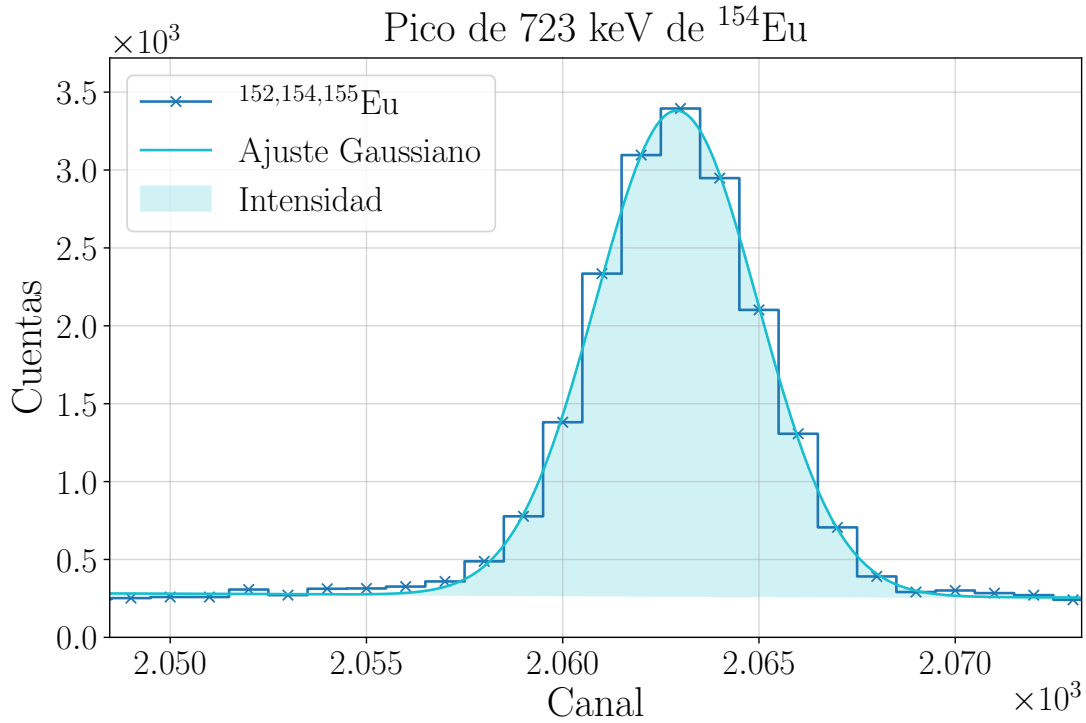


Figura 13: Pico del ^{154}Eu de transición gamma con parámetros dados en la tab. 10.

Parámetro	Valor	Unidad
μ	2062.903(14)	canal
σ	2.063(15)	canal
A	$3.11(2) \times 10^3$	cuentas
I	$1.611(24) \times 10^4$	cuentas
a_0	$2.45(1.02) \times 10^3$	cuentas
a_1	-1.06(49)	cuentas/canal
FWHM	4.86(3)	canal

Tabla 10: Parámetros espectroscópicos del ^{154}Eu donde μ , σ , A , a_0 y a_1 son como describe la ec. 1.1 e I es la intensidad a través del área del ajuste gaussiano, y $FWHM$ el ancho en la mitad de la altura del pico, obtenidos de la fig. 13.

Se determina en la fig. 14 el ajuste del pico del isótopo ^{152}Eu atribuible a la energía 964.1 keV y con los parámetros dados en la tabla 12. El decaimiento se explicó en la energía 105.3 keV.

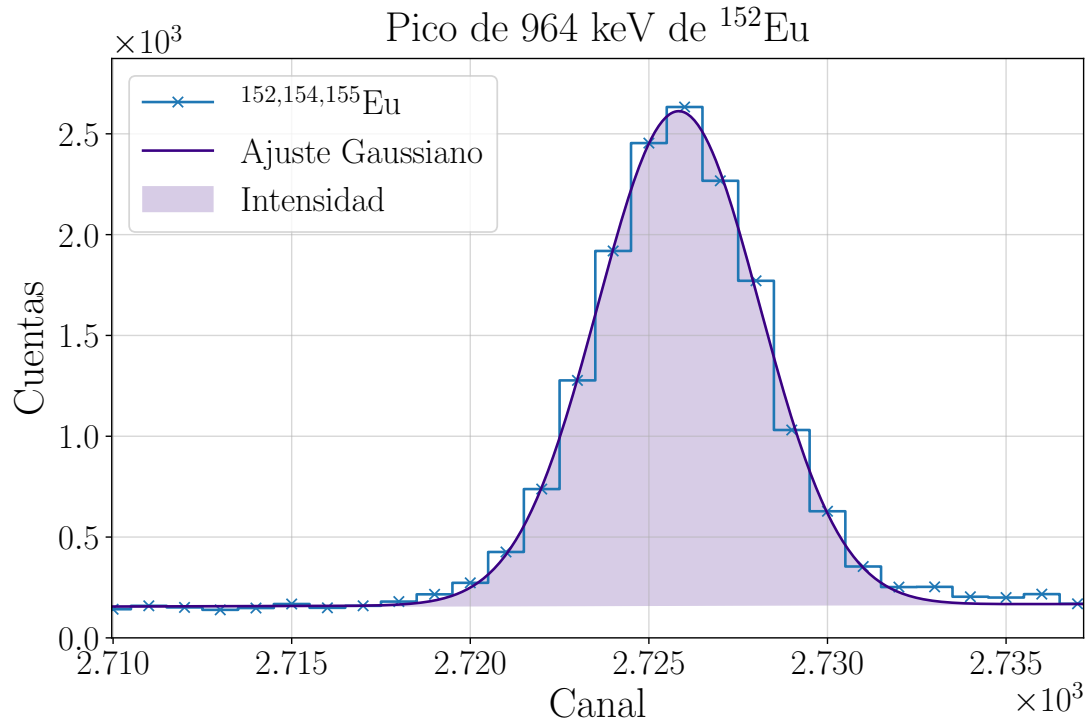


Figura 14: Pico del ^{152}Eu de transición gamma con parámetros dados en la tab. 11.

Parámetro	Valor	Unidad
μ	2725.834(16)	canal
σ	2.267(17)	canal
A	$2.449(15) \times 10^3$	cuentas
I	$1.392(22) \times 10^4$	cuentas
a_0	$-1.14(64) \times 10^3$	cuentas
a_1	0.48(23)	cuentas/canal
FWHM	5.34(4)	canal

Tabla 11: Parámetros espectroscópicos del ^{152}Eu donde μ , σ , A , a_0 y a_1 son como describe la ec. 1.1 e I es la intensidad a través del área del ajuste gaussiano, y $FWHM$ el ancho en la mitad de la altura del pico, obtenidos de la fig. 14.

Se determina en la fig. 15 el ajuste del pico del isótopo ^{154}Eu atribuible a la energía 1596.5 keV y con los parámetros dados en la tabla 12. El decaimiento se explicó en la energía 723.3 keV.

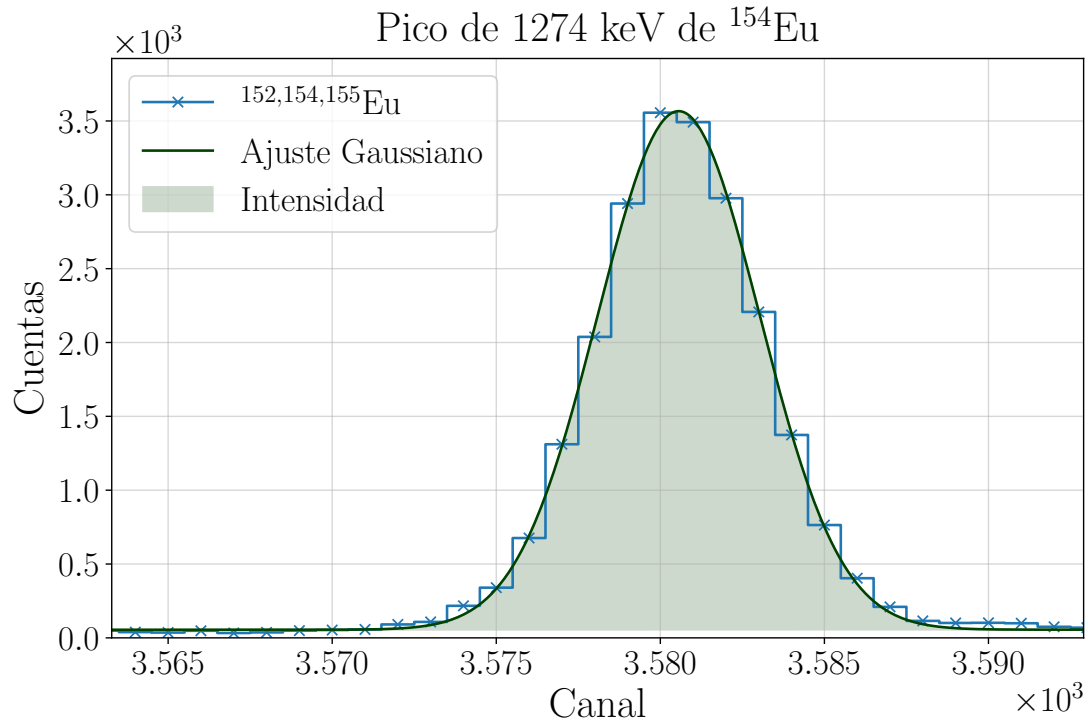


Figura 15: Pico del ^{154}Eu de transición gamma con parámetros dados en la tab. 12.

Parámetro	Valor	Unidad
μ	3580.559(11)	canal
σ	2.468(12)	canal
A	$3.511(14) \times 10^3$	cuentas
I	$2.176(22) \times 10^4$	cuentas
a_0	$1.71(94) \times 10^3$	cuentas
a_1	0.04(15)	cuentas/canal
FWHM	5.812(27)	canal

Tabla 12: Parámetros espectroscópicos ^{154}Eu donde μ , σ , A , a_0 y a_1 son como describe la ec. 1.1 e I es la intensidad a través del área del ajuste gaussiano, y $FWHM$ el ancho en la mitad de la altura del pico, obtenidos de la fig. 15.

Se determina en la fig. 16 el ajuste del pico del isótopo ^{154}Eu atribuible a la energía 1596.5 keV y con los parámetros dados en la tabla 13. El decaimiento se explicó en la energía 723.3 keV.

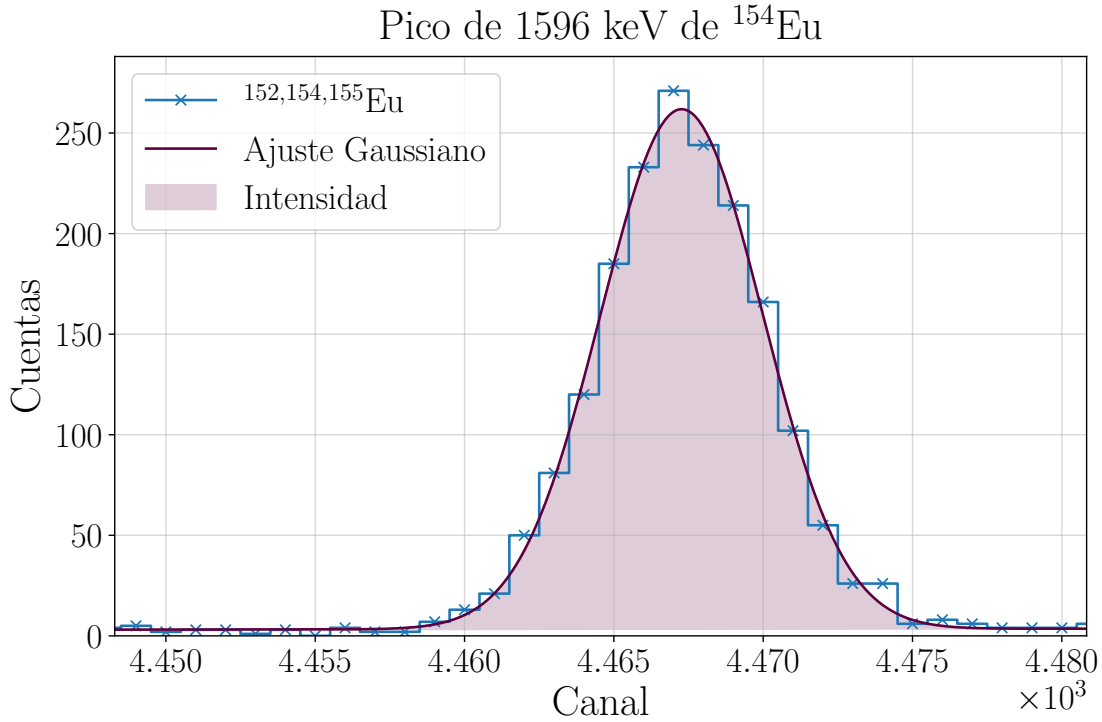


Figura 16: Pico del ^{154}Eu de transición gamma con parámetros dados en la tab. 13.

Parámetro	Valor	Unidad
μ	4467.270(23)	canal
σ	2.712(24)	canal
A	258.5(19)	cuentas
I	$1.767(32) \times 10^3$	cuentas
a_0	-68(86)	cuentas
a_1	0.02(2)	cuentas/canal
FWHM	6.39(6)	canal

Tabla 13: Parámetros espectroscópicos del ^{154}Eu donde μ , σ , A , a_0 y a_1 son como describe la ec. 1.1 e I es la intensidad a través del área del ajuste gaussiano, y $FWHM$ el ancho en la mitad de la altura del pico, obtenidos de la fig. 16.

La tabla 14 resume el comportamiento de los picos encontrados para los diferentes isótopos del Europio.

E_γ (keV)	canal	σ (canales)	$I_\gamma \times 10^4$ (cuentas)
86.5	312.155(17)	1.369(18)	5.742(15)
105.3	363.679(14)	1.413(15)	4.832(11)
344.3	1020.100(7)	1.75(1)	6.075(56)
723.3	2062.903(14)	2.063(15)	1.611(23)
964.1	2725.834(16)	2.267(17)	1.392(22)
1274.5	3580.559(11)	2.468(12)	2.170(21)
1596.5	4467.270(23)	2.712(7)	0.1767(32)

Tabla 14: Calibración de la energía de cada pico bien diferenciado en el espectro de los isótopos de Eu.

1.3. Calibración Ajustada

1.3.1. Calibración Energía

En la fig. 17 representa la linealización de los valores dados por la tabla 6 según la ec. 1.2

$$E_\gamma [\text{keV}] = c_0 + c_1 x [\text{canal}], \quad (1.2)$$

donde E_γ es la función de energía respecto el x el canal dado, con los parámetros de ajuste c_i de la recta, con unidades $c_0[\text{keV}]$ y $c_1[\text{keV/canal}]$.

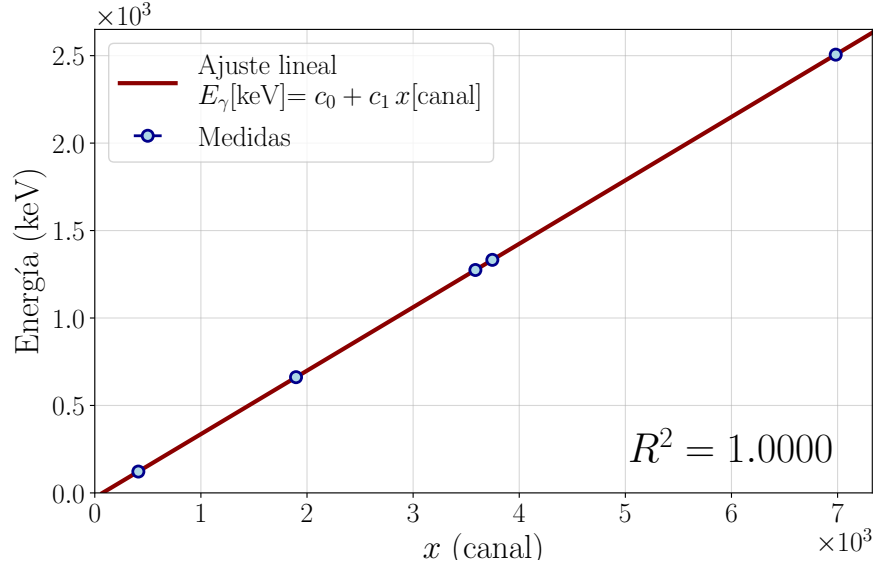


Figura 17: Calibración de la energía comparando los picos con las energías esperadas para el espectro de ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs y ^{57}Co .

Parámetro	Valor
$c_0(\text{keV})$	-26.67(18)
$c_1(\text{keV}/\text{canal})$	0.3627(7)

Tabla 15: Parámetros espectroscópicos donde c_0 y c_1 es como en la ec. 1.2 obtenido de la fig. 17.

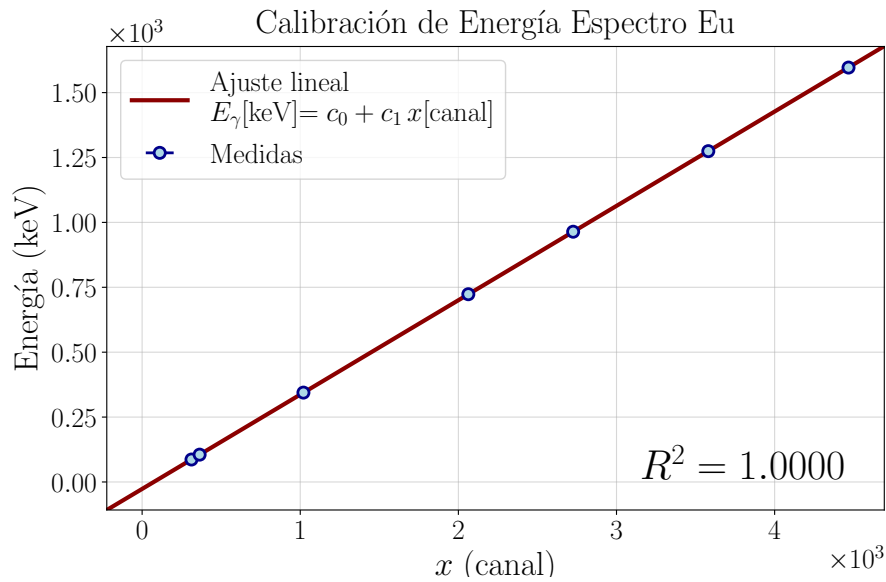


Figura 18: Calibración de la energía comparando los picos con las energías esperadas para el espectro de ^{152}Eu , ^{154}Eu y ^{155}Eu .

Parámetro	Valor
$c_0(\text{keV})$	-27(1)
$c_1(\text{kev/canal})$	0.3635(5)

Tabla 16: Parámetros espectroscópicos del espectro isótopos ^{152}Eu , ^{154}Eu y ^{155}Eu donde c_0 y c_1 es como en la ec. 1.2 obtenido de la fig. 18.

Debido a la precisión del detector Ge, se puede tener una correlación total $r^2 = 1$ de los dos espectros estudiados. A pesar de esta correlación, el ajuste tiene un margen de error del cual los parámetros de los ajustes coinciden en el σ esperado en las tablas 15 y 16.

Para tomar los valores definitivos, propagamos la incertidumbre del promedio de estos datos dado que son solo 2 mediciones y se obtienen los parámetros de la tabla

Parámetro	Valor
$c_0(\text{keV})$	-27(1)
$c_1(\text{kev/canal})$	0.3631(4)

Tabla 17: Parámetros obtenidos de promediar los resultados y propagar las incertidumbres de los espectros previos.

1.3.2. Calibración FWHM

Aquí se estudia el comportamiento del *ancho a mitad de la altura*, bien conocido como FWHM, respecto el nivel de energía. Se estudia el comportamiento a través de dos ajustes: lineal y potencial, lineal de la forma de la ec. 1.3

$$\text{FWHM}(\text{keV}) = \ell_0 + \ell_1 E_\gamma \quad (1.3)$$

donde ℓ_i son los parámetros de ajuste, FWHM es el mismo en cada pico a partir del σ del ajuste y E_γ son las energías de cada pico.

A través de las figs. 19 y 20 se puede notar que a pesar de tener una correlación ~ 0.9 , los puntos se distribuyen con otro comportamiento como se verá a continuación.

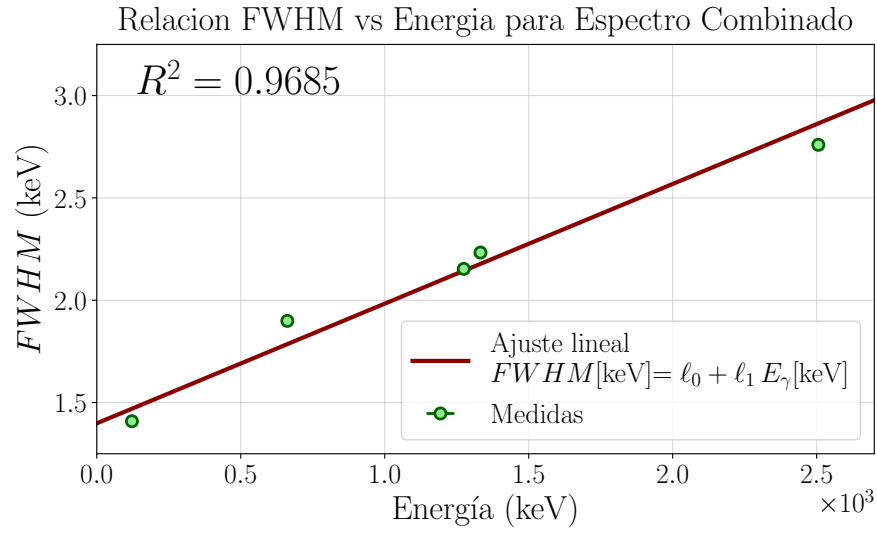


Figura 19: Ajuste lineal del espectro de Isótopos ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs y ^{57}Co de la relación del FWHM con parámetros dados en la tabla 18.

Parámetro	Valor
$\ell_0(\text{keV})$	1.469(17)
$\ell_1(\text{kev/canal})$	$5.71(1.7) \times 10^{-4}$

Tabla 18: Parámetros del ajuste como en la ec. 1.3 de la fig. 19.

Parámetro	Valor
$\ell_0(\text{keV})$	1.036(2)
$\ell_1(\text{kev/canal})$	$3.309(7) \times 10^{-2}$

Tabla 19: Parámetros del ajuste como en la ec. 1.3 de la fig. 20.

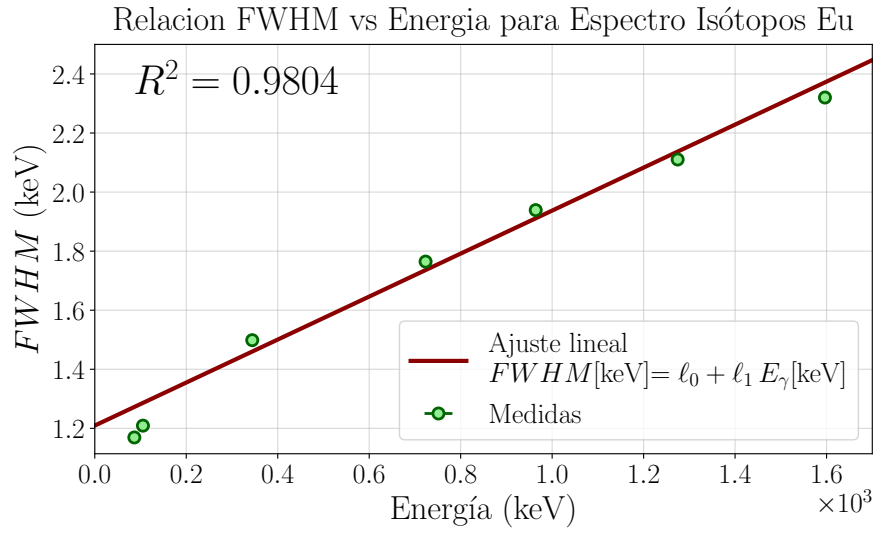


Figura 20: Ajuste lineal del espectro de Isótopos Eu de la relación del FWHM con parámetros dados en la tabla 18.

Se sugiere que el comportamiento del FWHM respecto a la energía en cada pico es potencial según la raíz de la energía E_γ según la ec. 1.4

$$FWHM(\text{keV}) = f_0 + f_1 \sqrt{E_\gamma}, \quad (1.4)$$

donde f_i son los parámetros de ajuste, FWHM es el mismo en cada pico a partir del σ del ajuste y E_γ son las energías de cada pico como ya se ha descrito.

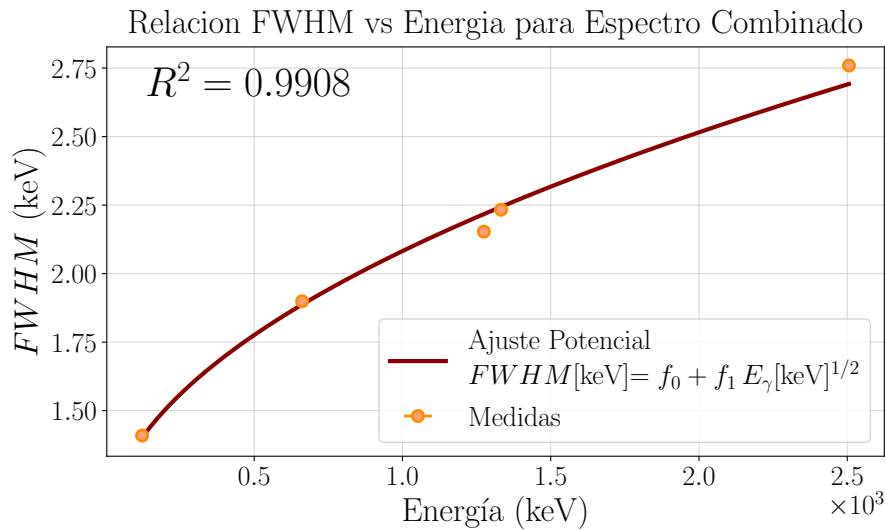


Figura 21: Ajuste lineal del espectro de Isótopos ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs y ^{57}Co de la relación del FWHM con parámetros dados en la tabla 20.

Parámetro	Valor
$f_0(\text{keV})$	1.469(17)
$f_1(\text{kev/canal})$	$5.71(17) \times 10^{-4}$

Tabla 20: Parámetros del ajuste potencial de la ec. 1.4 de la fig. 21.

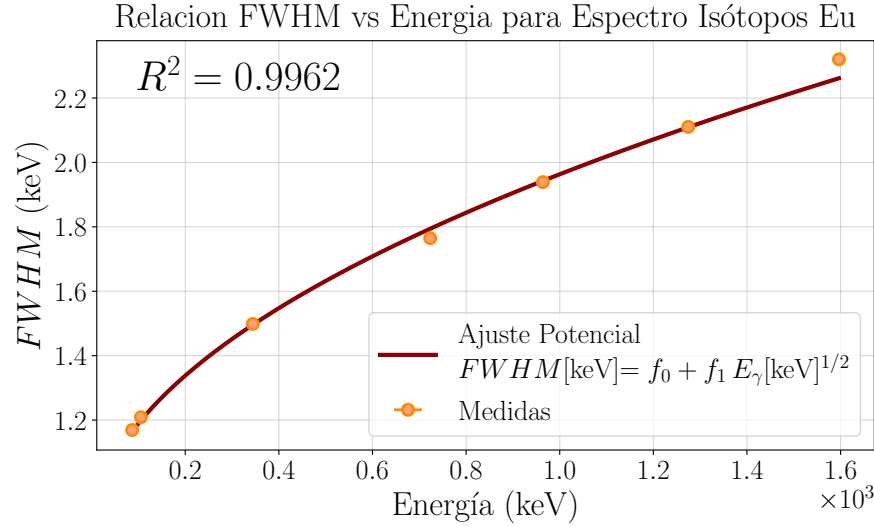


Figura 22: Ajuste lineal del espectro de Isótopos Eu de la relación del FWHM con parámetros dados en la tabla 21.

Parámetro	Valor
$f_0(\text{keV})$	0.832(11)
$f_1(\text{kev/canal})$	$3.577(5) \times 10^{-2}$

Tabla 21: Parámetros del ajuste potencial de la ec. 1.4 de la fig. 22.

En conclusión, la relación más precisa respecto a la correlación más cercana $r^2 \sim 1$ es evidentemente los ajustes potenciales de raíz como en la ec. 1.4, aunque no se puede linealizar efectivamente por el factor constante que aunque pequeño, restringe esta posibilidad. Además, se observa que las incertidumbres de cada dato es despreciable en este orden, lo cual no asegura que la coincidencia potencial sea realmente la efectiva para describir este problema según nuestra prueba de hipótesis, que no se generó en totalidad pero se sugiere para futuras prácticas.

1.3.3. Eficiencia del Detector Ge

La eficiencia de detección de un espectrómetro de germanio depende de la energía del fotón y la geometría experimental. La muestra compuesta de ^{152}Eu , ^{154}Eu y ^{155}Eu resulta particularmente práctica a la hora de determinar este parámetro debido a que sus líneas gamma

cubren un amplio rango de energías.

La eficiencia relativa ϵ_{rel} se obtiene como:

$$\epsilon_{rel} = \frac{N(\text{cuentas})}{A(\text{Bq}) \cdot b_{\gamma}(\%)}$$
 (1.5)

Donde N es el número de cuentas registradas por el detector o la intensidad del pico para una energía dada, A es la actividad de la muestra al momento del experimento y b_{γ} la probabilidad de decaimiento gamma correspondiente al pico particular.

Como es evidente, para realizar este cálculo se requiere conocer la actividad de la muestra en la fecha del experimento. Para ello, se emplea un modelo de decaimiento exponencial:

$$A(\text{KBq}) = A_0(\text{KBq}) \exp\left(-\frac{\ln(2) \cdot t(\text{a})}{T_{1/2}(\text{a})}\right),$$
 (1.6)

con A_0 la actividad de la muestra en KBq reportada en los anexos de la guía suministrada para la fecha (en formato día-mes-año) 13-07-2013, t el tiempo transcurrido desde la medida de referencia de la actividad hasta la fecha del experimento 29-05-2018, y $T_{1/2}$ la semivida de los isótopos de la muestra.

Se calculan estos valores para picos selectos de la muestra de ^{152}Eu , ^{154}Eu y ^{155}Eu , como se muestra en la Tabla 22:

E (KeV)	N (cuentas)	A (KBq)(29-05-2018)	b_{γ} (%)	A_{γ} (KBq)	ϵ
86.5	5.74×10^4	2.27	3.10	0.07	8.16×10^2
105.3	4.83×10^4	2.27	2.20	0.05	9.68×10^2
344.3	6.08×10^4	4.18	26.57	1.11	5.48×10^1
723.3	1.61×10^4	3.24	20.20	0.65	2.46×10^1
964.1	1.39×10^4	4.18	14.63	0.61	2.28×10^1
1274.5	2.17×10^4	3.24	35.00	1.13	1.91×10^1
1596.48	1.767×10^3	3.24	1.81	0.06	3.01×10^1

Tabla 22: Tabla de Datos de Energía y Eficiencia

Se destaca el hecho de que esta forma de calcular la eficiencia pretende *únicamente* evaluar el comportamiento relativo de la eficiencia en relación con los parámetros de exposición del sensor y las energías de los picos evaluados, por lo que las unidades del valor ϵ son despreciables.

Para el análisis de estos resultados, se presenta una gráfica en escala semilogarítmica de eficiencia vs energía (Figura 23), donde se aprecia cómo la eficiencia del detector tiende a decaer para valores de energía altos. Esto implica que se registran menos cuentas en relación con los fotones gamma emitidos en una ventana de tiempo arbitraria.

Se presenta una excepción para la energía de emisión correspondiente a 1596.45 (KeV). Esto se atribuye al bajo índice de probabilidad de decaimiento gamma ($b_{\gamma} = 1.81\%$) de esta

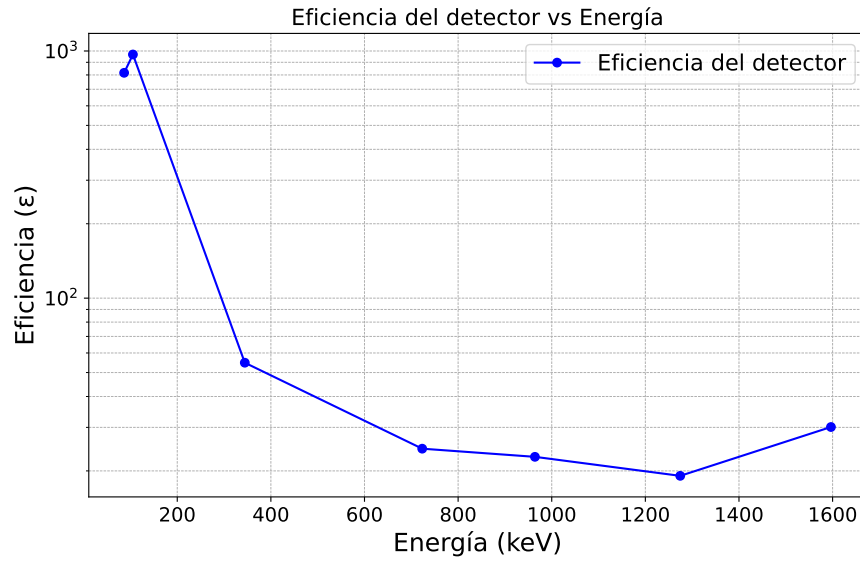


Figura 23: Gráfica de Eficiencia vs Energía.

transición, lo cual indica que existen otras dependencias que condicionan el comportamiento de la eficiencia además de la energía del pico medido. En este caso, se sugiere evaluar la dependencia con el parámetro b_γ .

2. Comparación Ge-NaI

A partir de la calibración dada de la sección previa, respecto los canales de los picos obtenidas en 17 se tiene el espectro general de los detectores comparando los picos más claros y distinguiendo entre las cualidades de estos.

2.1. Comparación ^{57}Co

Se compara la detección del NaI (véase fig.24 en café) según la calibración dada por el experimento previo de parámetros dados en la tabla 23 de los picos del isótopo ^{57}Co respecto la detección del Ge (véase fig. 24 en morado)

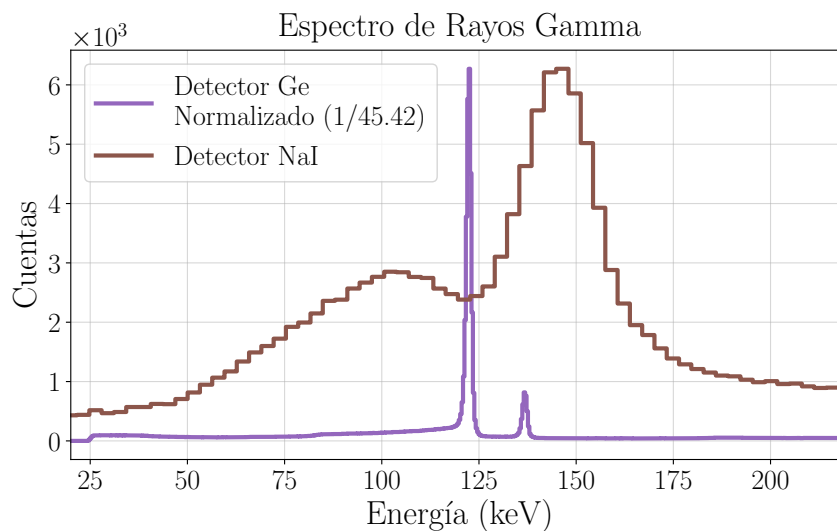


Figura 24: Espectro del isótopo ^{57}Co comparado respecto el detector Germanio (Ge) y el polimero (NaI) calibrados en Energía con factor de normalizado para el espectro del Ge.

Se distingue de la fig. 24 distintas características que atribuyen a las cualidades de cada detector: la calibración dada por el detector Ge es casi en absoluto precisa respecto a los valores teóricos suministrados [1], se mantiene con una definición clara en 122 keV y 136 keV esperados, mientras que la calibración del detector NaI flaquea tanto en precisión como en exactitud en el orden de las decenas de keV. Se atribuye al detector de NaI la alta lectura en el pico de menor energía de 136 keV, lo cual es enormemente apreciable al reconocer la alta eficiencia de este instrumento al generar un pico característico del elemento isotópico estudiado y no tanto del pico de escape, lo que podría permitir en prácticas de circunstancias que se requiera la alta eficiencia y reconocer este tipo de picos característicos precisos a utilizar el detector NaI.

a_0 (keV)	a_1 (keV/canal)
-40 ± 8	3.16 ± 0.03

Tabla 23: Parámetros de la calibración de energía del detector NaI.

2.2. Analista de Bordes Compton

El borde Compton es la energía máxima que puede transferirse a un electrón en un evento de dispersión Compton. Se calcula usando la ecuación:

$$E_C(\text{KeV}) = \frac{E_\gamma(\text{KeV})}{1 + \frac{E_\gamma(\text{KeV})}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.1)$$

Donde:

- E_γ es la energía del fotón incidente.
- $m_e c^2 = 511 \text{ keV}$ es la energía de reposo del electrón.
- θ es el ángulo de dispersión.

Asumiendo un angulo de 180°

$$E_C(\text{KeV}) = \frac{E_\gamma(\text{KeV})}{1 + \frac{2E_\gamma(\text{KeV})}{m_e c^2}} \quad (2.2)$$

De esta forma se se calcula los bordes Compton para valores de energía arbitrios de un foto pico, continuación se presentan los valores de los bordes Compton para las energías de los fotones en picos selectos de ^{60}Co y ^{22}Na en la tabla 24.

	Eenergia fotopicos (KeV)	Energia Bordes de Efecto Compton (KeV)
^{22}Na	1173	963.2
^{60}Co	1273	1060.2
^{60}Co	1333	1118.6

Tabla 24: Tabla de valores teóricos bordes de efecto Compton para energías selectas.

A continuación se muestra la representación gráfica 25 de los valores encontrados para los bordes Compton selectos sobre los espectros correspondientes

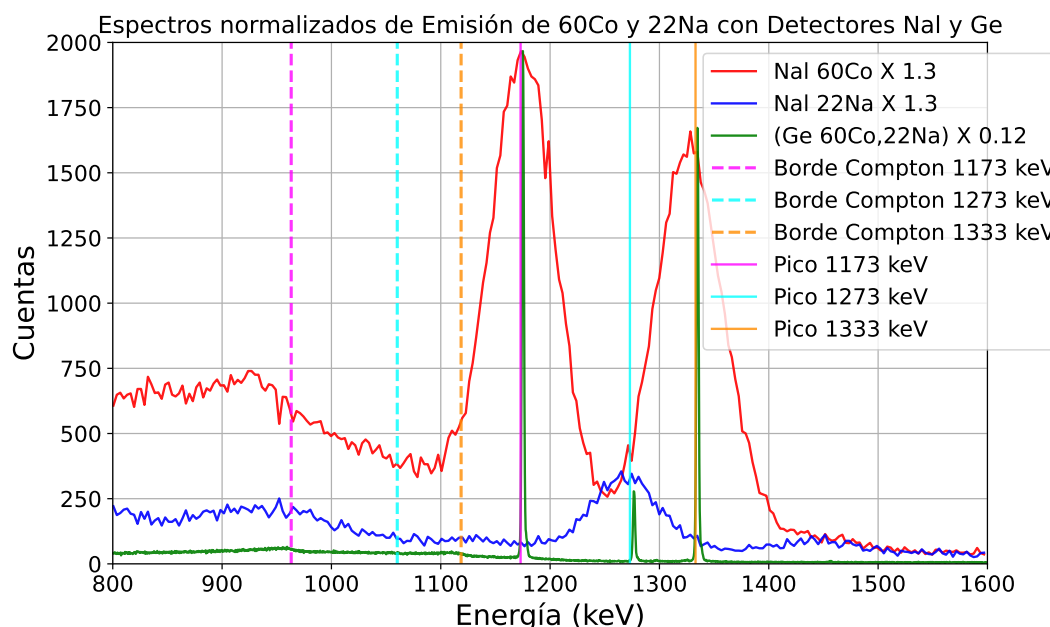


Figura 25: Comparación Espectros Normalizados de Emisión de ^{60}Co y ^{22}Na con Detectores NaI y Ge.

Aunque las posiciones de los foto picos seleccionados son aproximadamente coincidente y por tanto las posiciones teóricas de los los bordes de efecto Compton son comparables entre ambos detectores, la resolución limitada del detector de NaI impide que los efectos de los bordes Compton sean visibles para picos distintos al de 1173 keV. Esto se evidencia en la gráfica 26 de acercamiento siguiente, donde se puede analizar con mayor detalle el comportamiento de los espectros.

En esta nueva gráfica, se aprecia con claridad que el detector de Ge es capaz de mostrar de manera detallada los efectos de borde Compton en los tres picos seleccionados. Sin embargo, el pico correspondiente al ^{22}Na a 1273 keV no se visualiza de manera clara en el espectro adquirido con el detector de Ge.

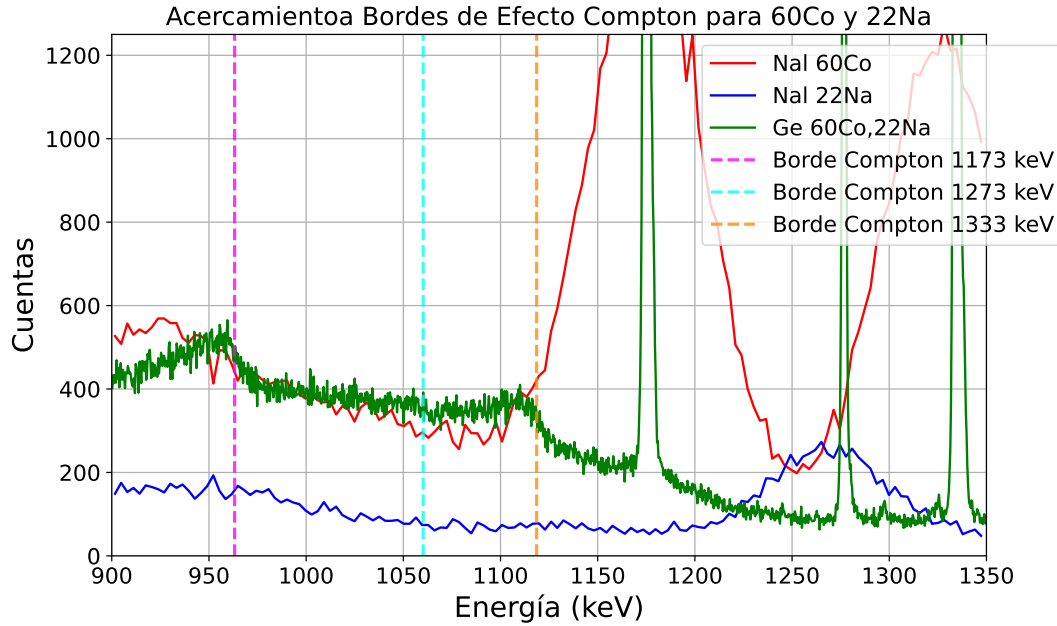


Figura 26: Acercamiento a Bordes de Efecto Compton para ^{60}Co y ^{22}Na

El análisis de los espectros adquiridos con ambos detectores permite identificar las ventajas del detector de Ge en la resolución de los efectos de borde Compton, en contraste con las limitaciones del detector de NaI. Esto resalta la importancia de la resolución energética en la detección y análisis de espectros gamma.

Referencias

- [1] F. Cristancho-Mejía, “Instrumentación nuclear. prácticas experimentales,” 1 2025.
- [2] M.-M. Bé, V. Chisté, C. Dulieu, E. Browne, C. Baglin, V. Chechev, N. Kuzmenko, R. Helmer, F. Kondev, D. MacMahon, and K. Lee, *Table of Radionuclides*, vol. 3 of *Monographie BIPM-5*. Pavillon de Breteuil, F-92310 Sèvres, France: Bureau International des Poids et Mesures, 2006.
- [3] V. Chechev and S. V.O., *Table of Radionuclides*. Laboratoire National Henri Becquerel, 2005.
- [4] V. Vanin, R. de Castro, and E. Browne, *Table of Radionuclides*. Laboratoire National Henri Becquerel, 2004.
- [5] V. Chechev and K. N.K., *Table of Radionuclides*. Laboratoire National Henri Becquerel, 2005.