

# Evaluación de la eficiencia relativa de detectores HPGe para su empleo en AANI basado en el método $K_0$

Pablo Mendoza<sup>1</sup> [pmendoza@ipen.gob.pe](mailto:pmendoza@ipen.gob.pe)

<sup>1</sup> Departamento de Química, Instituto Peruano de Energía Nuclear  
Lima 41, Perú

## Resumen

Se establece una metodología para evaluar la curva de eficiencia relativa para detectores HPGe a diferentes distancias, a partir de una geometría referencial mediante la aplicación del efecto de normalización del factor  $(E_p)/(E_x)$  involucrado en el cálculo de concentración por el método paramétrico del  $K_0$ .

## Abstract

A methodology is established to evaluate the curve of relative efficiency for detectors HPGe to different distances from a referential geometry by means of the application of normalization's effect of the factor  $(E_p) / (E_x)$  involved in the concentration's determination by the parametric method by the  $K_0$ .

## 1. Introducción

La determinación de la eficiencia en los detectores HPGe constituye una variable fundamental para el cálculo de concentración de los elementos de interés según el método  $K_0$ -INAA implementado desde el año 1995 en el laboratorio de análisis por activación neutrónica cuyo formulismo se expresa del modo siguiente:

$$\rho_i = \frac{T_{esp,x} K_{o,p} \epsilon_p}{T_{esp,p} K_{o,x} \epsilon_x} \left( \frac{F+Q_{o,p}(\alpha)}{F+Q_{o,x}(\alpha)} \right) \quad (1)$$

En donde la  $x$  y  $p$  denotan, respectivamente, muestra y comparador, y  $T_{esp}$  es la tasa específica de conteo, siendo  $\epsilon$  la eficiencia del detector para la energía medida,  $Q(\alpha)$  es la razón de la integral de resonancia y sección eficaz en función de  $\alpha$ ,  $K_0$  es el valor de la constante respectiva y  $F$  es la relación de flujo térmico y flujo epitérmico.

La determinación de la eficiencia implica establecer una función matemática en correlación directa a los picos de energía plena gamma la cual puede ser calculada por simulación matemática empleando el modelo de Monte Carlo (1) siempre y cuando se conozcan con exactitud las dimensiones del detector o mediante evaluación empírica considerando arreglos geométricos definidos

muestra-detector de mínima complejidad en cuanto a su realización pero restringida en su uso para geometrías diferentes.

Experimentalmente, se elige ésta última opción por las condiciones restrictivas de los procedimientos analíticos implementados en el laboratorio. Ello conlleva, además de definir una geometría de medición estándar, emplear envases de medición de diámetro y densidad similar a las fuentes de calibración minimizando los factores de corrección de absorción y atenuación involucrados en la detección gamma de importancia en el rango de energías menor a 300 keV.

En el presente trabajo se establece una metodología para elaborar curva de eficiencia relativa en detectores HPGe evaluando su aplicación para distintas geometrías de medición tomando en consideración el efecto de normalización del factor  $(E_p)/(E_x)$  con sodio como comparador en cada una de ellas.

Ello debido que la elaboración de curvas de eficiencias a geometrías cercanas implicaría emplear fuentes de calibración gamma no coincidentes y de un rango dinámico similar a la curva de referencia. Tal condición restringe la disponibilidad de fuentes y por ende la cantidad de pares coordenados necesarios para trazar una adecuada curva de eficiencia.

## 2. Experimental

El detector HPGe empleado tiene un 15% de eficiencia relativa con una resolución de 1.9

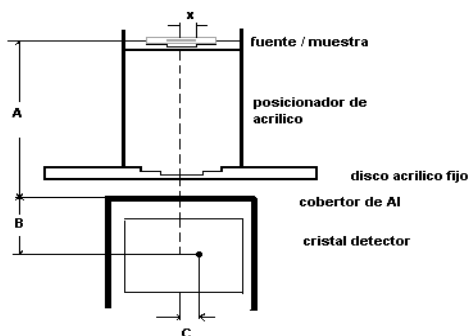
keV para el fotopico de 1332.5 keV marca Canberra modelo GC1518 con un cristal de 48 mm de diámetro y 40 mm de largo distanciado de la cobertura de aluminio de 1.5 mm de grosor por  $5.0 \pm 0.5$  mm.

La electrónica asociada incluye un amplificador Canberra modelo 2026 con una constante de tiempo de 4  $\mu$ s, una fuente de tensión Canberra modelo 3125 a 4000V positivo, analizador multiport II Canberra para la adquisición y almacenamiento de datos y el programa GENIE 2K para la evaluación espectral correspondiente.

Se emplean fuentes de calibración gamma de Canberra Industries trazables a estándares NIST con una incertidumbre estimada del 5% con un grosor de 3.2 mm y una zona activa de 9 mm cuyos datos se aprecian en la tabla 1.

Se preparan fuentes de calibración secundaria de  $^{56}\text{Mn}$  y  $^{24}\text{Na}$ , a partir de las soluciones estándares respectivas colocando el contenido en envases de polietileno de alta densidad de 10 mm de diámetro con 50 mg de celulosa como soporte. La solución agregada es retenida en el soporte y posteriormente evaporada mediante lámpara infrarroja. El envase es luego sellado térmicamente observándose que la capa formada no sobrepasa 1 mm de grosor.

Tanto las fuentes patrones de calibración como las no calibradas son colocadas en un portamuestra de acrílico a una distancia referencial de 217.7 mm como se muestra en la figura 1 con el fin de minimizar los efectos de  $\gamma$ - $\gamma$  coincidencia y el efecto de apilamiento de pulsos.



**Figura 1.** Geometría de medición empleada para muestra a 217.7mm.

El procedimiento de cálculo de la eficiencia sigue la secuencia siguiente:

Se calcula la eficiencia de los fotopicos de energía plena (tabla 1) de los emisores gamma de calibración mediante:

$$\varepsilon = \frac{C}{I_{\gamma} * A_0 * T} \quad (2)$$

Donde:

$I_{\gamma}$  = intensidad absoluta del pico de energía plena

$A_0$  = actividad del emisor gamma (Bq) a la fecha de medición

T = Tiempo vivo de conteo (s)

C = cuentas netas en pico de energía plena de interés corregido por factor de autoatenuación y efecto de  $\gamma\gamma$  coincidencia.

- Se realiza regresión lineal en términos de logaritmo natural a la función Energía vs. Eficiencia tomando los pares coordenados correspondientes a 661.6 keV, 834.5 keV y 1115.5 keV generados.
- Con la ecuación obtenida en el ítem anterior se calcula la eficiencia de los picos de 1810.8 KeV y 2754.5 keV correlacionando los valores de área, eficiencia e intensidad del pico de energía plena con los obtenidos para 846.6 keV y 1368.6 keV correspondientes a las fuentes secundarias no calibradas de  $^{56}\text{Mn}$  y  $^{24}\text{Na}$  respectivamente.
- Se ajusta los valores finalmente obtenidos de eficiencia y energía mediante polinomio de cuarto grado:

$$\ln \varepsilon_{ref} = c_1 + c_2 \ln \varepsilon + c_3 (\ln \varepsilon)^2 + c_4 (\ln \varepsilon)^3 + c_5 (\ln \varepsilon)^4 \quad (3)$$

Con los valores de eficiencia obtenidos de la ecuación 3 se calcula el factor de normalización  $(\varepsilon_{1368.6} / \varepsilon_x)_{x=i}$  donde i representa las energías de interés.

Para evaluar el empleo de dicho factor  $(\varepsilon_{1368.6} / \varepsilon_x)$  en mediciones a geometría "x" a la referencial se corrobora calculando la eficiencia "x" a partir de la eficiencia referencial (217.7mm) empleando el formulismo de establecido por Gunnik y Niday [2]:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{ref} \frac{(A+B)^2 + c^2}{(x+B)^2 + c^2} \quad (4)$$

Tomando en cuenta la figura 1 se tiene:

- X = 64.9 mm
- A = 217.7 mm
- B = penetración efectiva del fotón (EID) gamma en el detector
- C = radio de interacción efectiva
- E<sub>ref</sub> = eficiencia evaluada a 217.7mm

Se escoge la distancia 64.9 mm (sobre el disco de acrílico fijo) por ser la distancia de medición rutinaria para elementos de interés de periodo semidesintegración mayor a 1 día.

Se calcula el factor de normalización para la geometría evaluada y se compara relativamente con el obtenido en la geometría de referencia.

Para corroborar la exactitud de la metodología implementada se evalúa la presencia de Sm, Ce, Cr, y Sc en la muestra de referencia Ohio Red Clay tomando en cuenta el intervalo de sus picos de energía plena.

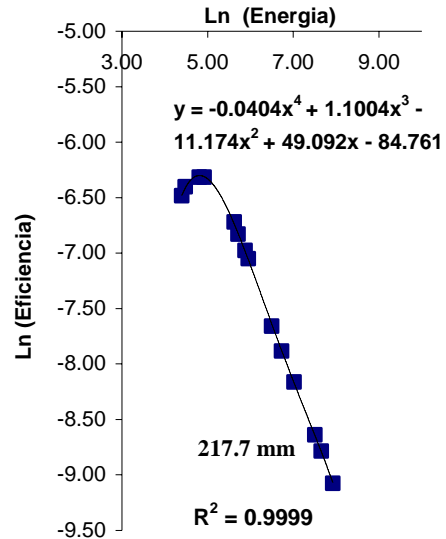
### 3. Resultados y Conclusiones

La curva de eficiencia obtenida se muestra en la grafica 1 con una alta correlación en tanto que la tabla 1 resume los datos involucrados en dicho cálculo.

**Tabla 1.** Parámetros empleados en el cálculo de la eficiencia en función de la energía para la geometría referencial de 217.7 mm.

Radioisótopo	Energía	I (%)	Ln (eficiencia)
Ba-133	81	0.328	-6.4833
Cd-109	88	0.037	-6.4027
Co-57	122.1	0.855	-6.3178
Co-57	136.5	0.106	-6.3153
Ba-133	276.4	0.073	-6.7203
Ba-133	302.8	0.186	-6.8293
Ba-133	356	0.623	-6.9772
Ba-133	383.9	0.088	-7.0503
Cs-137	661.6	0.85	-7.6596
Mn-54	834.8	1	-7.8838
Zn-65	1115.5	0.51	-8.1646
Mn-56*	1810.8	0.272	-8.6385
Mn-56*	2113.15	0.142	-8.7843
Na-24 *	2754.5	1	-9.0768

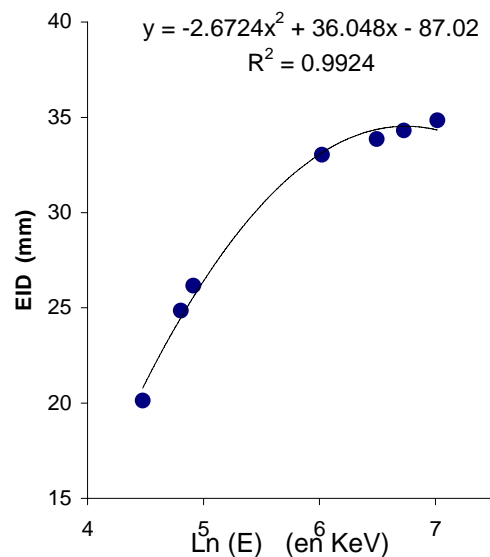
(\*) Fuentes secundarias sin calibrar



**Gráfica 1.** Variación de la eficiencia en función de la energía en detector GC1518 a 217.7 mm

El efecto de la interacción profunda efectiva (EID), [3], establece que para una fuente puntual colocada sobre el eje axial del detector varía inversamente al cuadrado de la distancia desde un punto dentro del detector y sobre su eje.

Dicho valor EID asignado como B en la figura 1, varía en función de la energía y se determina mediante la relación lineal entre la distancia de medición A y la raíz cuadrada de la eficiencia, [4], ajustada mediante polinomio logarítmico de segundo grado.

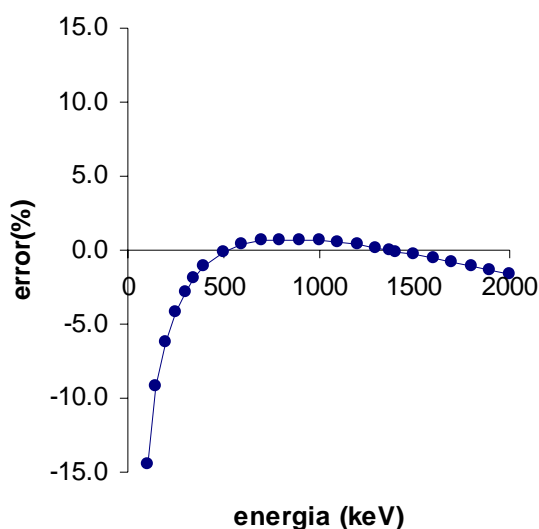


**Gráfica 2.** Variación de EID en función de la energía en detector GC1518.

Los valores de eficiencia para la geometría “X” calculados mediante la ecuación 4 se observan en la tabla 2, en tanto que el error relativo de comparar los factores de normalización ( $\epsilon_{1368.6} / \epsilon_x$ ) de la geometría “X” con la referencial se muestra en la grafica 3.

**Tabla 2.** Valores de eficiencia calculados para la geometría de 64.9 mm y factor de normalización ( $\epsilon_{1368.6}/\epsilon_x$ ) correspondiente.

Energía (KeV)	EID (mm)	Eficiencia 64.9 mm	$\epsilon_{1368.6}$ 64.9 mm	$\epsilon_x$ 217.7 mm
100	22.3	0.013128	0.107910	0.126113
150	26.5	0.012415	0.114114	0.125679
200	28.9	0.010353	0.136841	0.145835
250	30.5	0.008528	0.166119	0.173395
300	31.6	0.007115	0.199118	0.204924
400	33.0	0.005219	0.271471	0.274579
500	33.8	0.004069	0.348139	0.348798
700	34.4	0.002807	0.504612	0.501533
800	34.5	0.002434	0.582126	0.577926
1000	34.5	0.001931	0.733587	0.728819
1200	34.2	0.001610	0.879972	0.876878
1368.6	33.9	0.001417	1.000000	1.000000
1400	33.9	0.001386	1.022078	1.022818
1500	33.7	0.001297	1.091924	1.095355
1700	33.3	0.001152	1.230063	1.240361
1900	32.8	0.001036	1.367243	1.386325
2000	32.6	0.000987	1.435867	1.460043



**Gráfica 3.** Error relativo porcentual entre ( $\epsilon_{1368.6}/\epsilon_x$ ) calculado y referencial en función de la energía.

Se determina la concentración de Sm, Ce, Cr y Sc en la muestra de referencia por K<sub>0</sub>-AANI empleando el factor ( $\epsilon_{1368.6} / \epsilon_x$ ) calculado para la geometría de 64.9mm a partir del factor referencial de 217.7mm.

**Tabla 3.** Concentración promedio en mg/kg obtenido de cuatro replicas (n=4) expresándose la incertidumbre como coeficiente de variación (1σ).

Elemento	Energía (keV)	Valor certificado	Valor Calculado
Samario	103.2	8.0 ± 0.6	7.7 ± 0.2
Cerio	145	109.7 ± 6.5	109.8 ± 2.9
Cromo	320.1	90.7 ± 7.4	83.3 ± 3.0
Escandio	889	18.95 ± 0.30	17.3 ± 0.6

Los resultados obtenidos guardan concordancia con los valores certificados a excepción del escandio.

A partir de la grafica 3 se concluye que es posible emplear el factor ( $\epsilon_{1368.6} / \epsilon_x$ ) evaluado a 217.7mm para geometrías menores con un margen de error <3% a partir de 300 keV gracias a la dependencia lineal de la función Ln(energía)-Ln(eficiencia).

El procedimiento para elaborar la curva de eficiencia es relativamente fácil y sencillo cubriendo un rango adecuado de energía desde (0.1 MeV – 2.75 MeV).

#### 4. Bibliografía

- [1] L.Moen, J de Donder, Lin Xilei, F. De Corte, A. Simonits. Nuclear Instrumental Methods. 1981; 187:451.
- [2] R. Gunnink, J.B. Niday, Proc. ERDA Symposium on X- and Gamma-Ray Sources and Applications, Ann Arbor Science Publishers, Mich, 1979 , pp 55.
- [3] W. Tian, B. Ni. Journal Radioanalytical Chemistry. 1994; 179:119.
- [4] M.A. Bacchi, E.A.N. Fernandes. Journal Radioanalytical Chemistry. 2000; 245(1):209-215.