

Aplicación de un modelo de detector BEGe en MCNP6 como apoyo a la realización de medidas por espectrometría gamma en un laboratorio en caso de emergencia nuclear o radiactiva.

J. Ordóñez¹, S. Martorell^{1,3}, S. Gallardo², J. Ortiz³

¹Grupo de Medioambiente y Seguridad Industrial (MEDASEGI).

²Instituto Universitario de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM).

³Laboratorio de Radiactividad Ambiental.

Universitat Politècnica de València.

joorro1@etsii.upv.es

Resumen – Uno de los problemas al medir actividades altas como las de un escenario de emergencia es la posible saturación del detector o la obtención un tiempo muerto de medición demasiado alto como para dar resultados fiables. Esto llevaría a repetir la medida en diferentes condiciones aumentando el tiempo de respuesta y, por consiguiente, el riesgo de exposición de los trabajadores del laboratorio. La tasa de cuentas medidas por el detector se puede controlar variando la distancia de la muestra al detector, así como utilizando diferentes volúmenes de fuente. Se ha desarrollado un modelo de Monte Carlo de un detector BEGe para analizar la respuesta en eficiencia del sistema para varias geometrías de medición (distancias y volúmenes). Las curvas de eficiencia total para muchas de las configuraciones utilizadas en el laboratorio se obtienen utilizando el código MCNP6 para un rango de energía de entre 59.5 keV y 1836.0 keV. Las simulaciones han permitido estimar la emisión gamma admisible para diferentes volúmenes de fuente (en matriz de agua) y distancias de muestra a detector que evite la saturación del mismo. Los resultados conducen a lograr un compromiso entre la geometría, la distancia y el tiempo de medición para una determinada condición en situaciones de emergencia. Se proporcionan tres casos de aplicación para explicar cómo funciona el enfoque propuesto.

1. INTRODUCCIÓN

Las amenazas radiológicas debidas tanto a accidentes nucleares o radiológicos como a ataques radiactivos contra la sociedad y el medio ambiente se perciben cada vez más como una posibilidad real. Existe un amplio consenso en que la capacidad de identificar eficientemente tales amenazas exige una infraestructura sofisticada y específica que incluya personal especializado, laboratorios e instrumentación analítica avanzada [Croudace, 2016]. En general, el enfoque o metodología necesario para identificar eficientemente tales amenazas debe ser robusto, rápido, preciso y seguro. Robusto en el sentido de proporcionar siempre un resultado fiable, rápido en términos de proporcionar resultados en el menor tiempo posible, preciso en la caracterización de todos los radioisótopos relevantes dentro del material radiactivo y seguro en términos de reducir y controlar el riesgo de exposición a la radiación del personal de laboratorio.

El uso de métodos de simulación puede ser de gran ayuda para mejorar la identificación de amenazas radiológicas [Maucec et al., 2004, Fantínová y Fojtík, 2014, Fonseca et al., 2017]. En este contexto, el Laboratorio de Radiactividad Ambiental (LRA) de la Universitat Politècnica de València (UPV) está desarrollando procedimientos de espectrometría gamma mediante detectores de semiconductor para la caracterización de muestras de alta actividad combinando métodos experimentales y de simulación. Estos procedimientos se centran en el análisis de diferentes configuraciones de medida para optimizar la secuencia de medición. Para lograr resultados precisos, es imprescindible caracterizar detalladamente la respuesta en eficiencia del sistema y, en este aspecto, se requieren curvas de eficiencia para las posibles configuraciones de medición. Técnicas computacionales tales como el método de Monte Carlo representan una herramienta útil para complementar el procedimiento experimental de calibración en eficiencia [García-Talavera et al., 2000, Hurtado et al., 2004, Dababneh et al., 2014] pudiendo simular cualquier caso, obteniendo un

mapa de eficiencia que considera todas las combinaciones posibles de distancia entre la fuente - detector y volúmenes de fuente.

Este trabajo presenta una metodología o secuencia de medición a través de un modelo en MCNP6 de un detector BEGe como apoyo a la espectrometría gamma, que ofrecería beneficios prácticos y mejoras a la hora de proporcionar una respuesta rápida sin comprometer la seguridad laboral en el contexto de emergencias nucleares y radiactivas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Equipo experimental.

El montaje experimental está compuesto por un espectrómetro de radiación gamma con un detector BEGe-5030 (CANBERRA), calibrado para medir muestras de alta actividad, y un analizador multicanal de 8192 canales. Se han realizado mediciones experimentales para calibrar en eficiencia el detector y validar el modelo de Monte Carlo. El detector está calibrado para un recipiente cilíndrico con diferentes volúmenes de fuente, desde 5 ml hasta 50 ml. Se ha utilizado una fuente patrón multigamma conteniendo ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{88}Y , ^{65}Zn y ^{60}Co (de 59.54 keV a 1836.01 keV) para realizar las mediciones experimentales. En cada muestra, la fuente patrón se ha distribuido homogéneamente en una matriz de agua.

Una consideración importante en las mediciones experimentales es el tiempo muerto que, en estos casos en particular, presenta un valor de alrededor del 0,6%. Este parámetro se utilizará como referencia en el cribado presentado en este trabajo (sección 2.5).

2.2. Modelo Monte Carlo MCNP6.

El código MCNP6 [MCNP6TM Monte Carlo equipo, 2013] se ha utilizado para estudiar la respuesta en eficiencia del sistema. Se simulan diferentes modelos para cubrir todas las configuraciones de medición posibles de acuerdo con el cribado desarrollado en este trabajo. Por lo tanto, se modela una muestra (recipiente cilíndrico) con siete volúmenes de fuente: 5 ml, 10 ml, 15 ml, 20 ml, 30 ml, 40 ml y 50 ml. Todas las muestras se colocan desde la geometría *top* hasta una distancia de 20 cm por encima en pasos de 2.5 cm.

Se ha utilizado el *Tally F8* para fotones y electrones proporcionando la distribución en energía de los pulsos creados en la celda correspondiente al cristal activo de germanio. Los resultados se distribuyen en 8192 canales de 0 a 2040 keV simulando el multicanal utilizado en la configuración experimental y considerando la calibración en energía obtenida con el programa GENIE2000 [CANBERRA, 2009] a partir de las mediciones experimentales. El número de historias en cada simulación se ha establecido para lograr errores estadísticos inferiores al 1.5%.

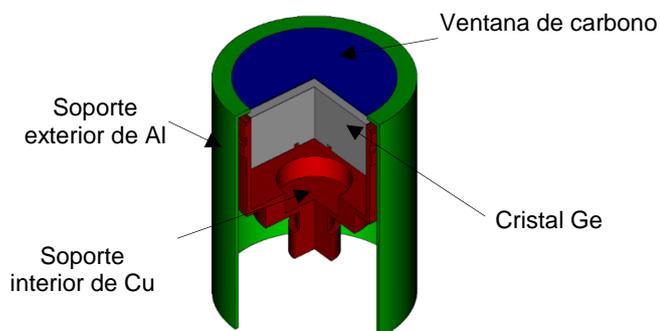


Figura 1. Modelo del detector BEGe

2.3. Curvas de Eficiencia Total.

Se han obtenido curvas de eficiencia total para diferentes combinaciones de volumen de fuente y distancias fuente - detector para caracterizar el comportamiento de la muestra bajo diferentes configuraciones de medición. Por lo tanto, se simulan 63 curvas de eficiencia. Todas las simulaciones se realizan considerando un rango de energía de 59 keV a 1836 keV. La Figura 2 muestra las curvas de eficiencia total para la muestra de 5 ml (T5ml). Como se esperaba, cuanto más cerca esté la muestra al detector, mayor será la eficiencia en todo el rango de energía. Existe una gran diferencia (~ 60%) entre la geometría *top* y la situada 2.5 cm por encima. El efecto de la distancia de la fuente al detector sobre la eficiencia disminuye con la distancia, siendo casi constante a partir de 10 cm (93%-97%).

Algo similar, pero menos acentuado, sucede con el volumen de la fuente (Figura 3). La eficiencia disminuye con el aumento del volumen de la fuente debido a que la distancia media entre la fuente y el detector aumenta con el volumen.

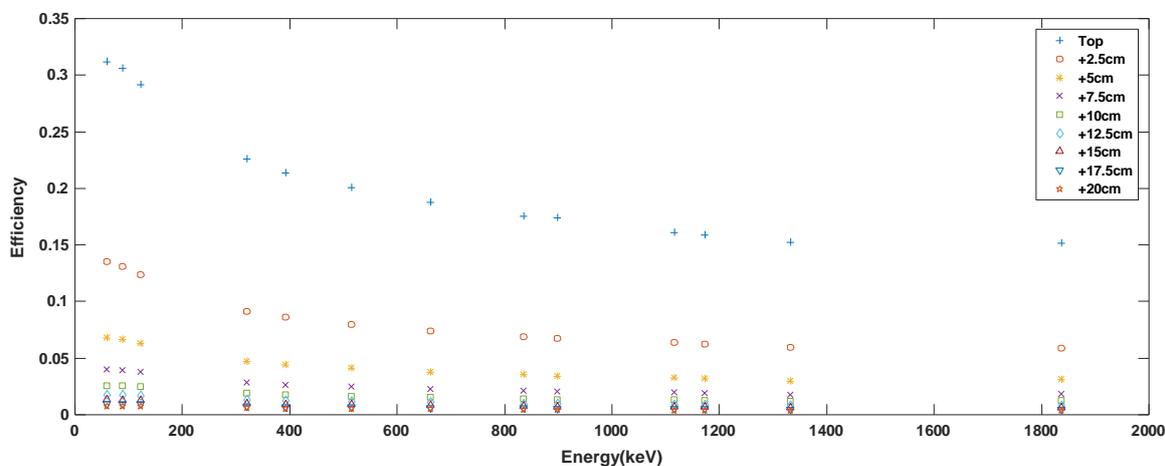


Figura 2. Eficiencia total para diferentes distancias fuente-detector; Volumen de 5ml

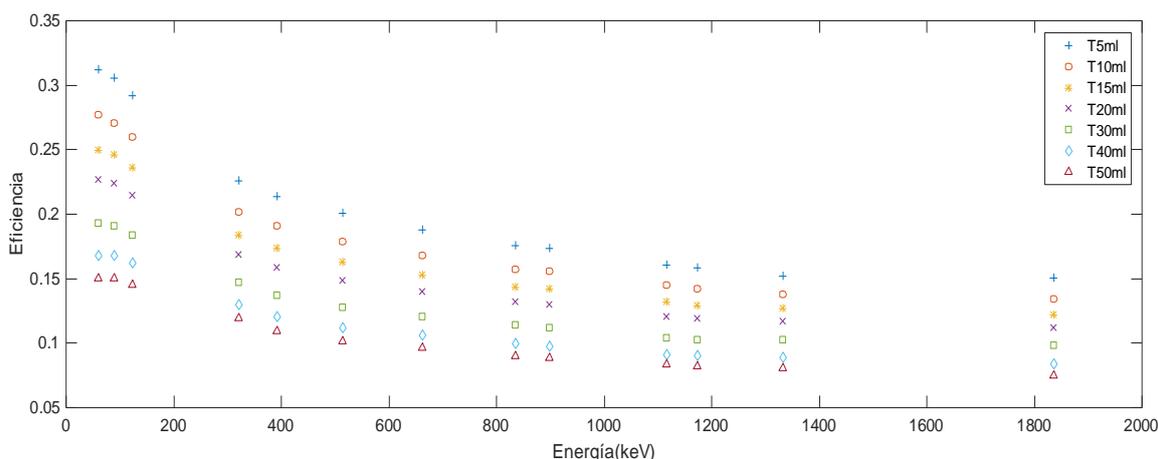


Figura 3. Eficiencia total para diferentes volúmenes de fuente situadas en geometría top

2.4. Emisión gamma máxima.

Tal y como se comentó en la sección 2.1, se ha establecido un tiempo muerto máximo de 0.6% en las calibraciones experimentales. La configuración volumen de muestra y distancia durante la secuencia de medición y cribado considerará este valor como parámetro de ajuste. Conociendo el tiempo de resolución del detector (4 μ s), es posible calcular la tasa de cuentas máxima (cps) que el sistema puede procesar para cumplir con este criterio (\sim 1500 cps). Las cps medidas se ven muy afectadas por la tasa de emisión gamma de la muestra y por la eficiencia total del sistema, que además depende de la configuración de medición, la energía de la emisión gamma y del detector en sí. En este contexto, se requieren simulaciones de Monte Carlo considerando los parámetros mencionados para caracterizar la respuesta en eficiencia total del sistema.

Conociendo el valor límite de 1500 cps, es posible determinar la emisión gamma admisible. La Tabla 1 muestra los valores máximos para la muestra T5ml en función de la distancia fuente - detector. La geometría *top* tiene las eficiencias totales más altas, como se ha visto en la sección 2.3, mostrando los valores límite más bajos que cumplirían con el criterio establecido. Por otro lado, este valor aumenta con la energía debido a la pérdida de eficiencia (Figura 2). Analizando los diferentes volúmenes de fuente en estudio, la Tabla 2 muestra resultados equivalentes, valores máximos permitidos más bajos para la T5ml debido a su mayor eficiencia total. Ambos análisis muestran también cómo el ^{241}Am sería el radionúclido más restrictivo con la energía de emisión gamma más baja (59.54 keV) y eficiencia más alta (Figura 2 y Figura 3). Comparando los valores para 59.54 keV en la Tabla 3, la tasa de emisión gamma máxima permitida para 50 ml es aproximadamente el doble que la de 5 ml debido a la pérdida de eficiencia con el aumento del volumen, pero la actividad en la muestra sería 10 veces mayor, comprometiendo el criterio del tiempo muerto.

Tabla 1. Tabla para el cribado inicial. Tasa de emisión gamma (γ /s) máxima emitida por la fuente para cumplir el criterio de tiempo muerto; Muestra: T5ml

E (keV)	Top	+2.5 cm	+5 cm	+7.5 cm	+10 cm	+12.5 cm	+15 cm	+17.5 cm	+20 cm
59.54	4.81E+03	1.11E+04	2.20E+04	3.76E+04	5.80E+04	8.34E+04	1.14E+05	1.51E+05	1.91E+05
88.04	4.91E+03	1.14E+04	2.26E+04	3.85E+04	5.93E+04	8.54E+04	1.16E+05	1.51E+05	1.91E+05
122.06	5.13E+03	1.21E+04	2.36E+04	3.99E+04	6.10E+04	8.67E+04	1.17E+05	1.52E+05	1.92E+05
320.08	6.62E+03	1.64E+04	3.18E+04	5.28E+04	7.97E+04	1.12E+05	1.52E+05	1.96E+05	2.45E+05
391.69	7.01E+03	1.74E+04	3.37E+04	5.62E+04	8.45E+04	1.20E+05	1.61E+05	2.09E+05	2.62E+05
513.99	7.45E+03	1.88E+04	3.64E+04	6.06E+04	9.15E+04	1.29E+05	1.72E+05	2.23E+05	2.77E+05
661.64	7.99E+03	2.02E+04	3.93E+04	6.54E+04	9.80E+04	1.38E+05	1.84E+05	2.37E+05	2.95E+05
834.83	8.53E+03	2.17E+04	4.23E+04	6.99E+04	1.06E+05	1.50E+05	2.01E+05	2.59E+05	3.27E+05
898.02	8.64E+03	2.23E+04	4.35E+04	7.28E+04	1.10E+05	1.55E+05	2.08E+05	2.69E+05	3.41E+05
1115.52	9.29E+03	2.35E+04	4.60E+04	7.63E+04	1.15E+05	1.61E+05	2.17E+05	2.81E+05	3.52E+05
1173.21	9.46E+03	2.41E+04	4.71E+04	7.86E+04	1.18E+05	1.63E+05	2.18E+05	2.85E+05	3.57E+05
1332.46	9.85E+03	2.53E+04	4.99E+04	8.36E+04	1.29E+05	1.80E+05	2.39E+05	3.06E+05	3.85E+05
1836.01	1.04E+04	2.68E+04	5.03E+04	8.46E+04	1.28E+05	1.84E+05	2.47E+05	3.20E+05	4.05E+05

Tabla 2. Tasa de emisión gamma (γ /s) máxima emitida por la fuente para cumplir el criterio de tiempo muerto; Posición: geometría top

E (keV)	5 ml	10 ml	15 ml	20 ml	30 ml	40 ml	50 ml
59.54	4.81E+03	5.42E+03	6.00E+03	6.60E+03	7.78E+03	8.92E+03	1.00E+04
88.04	4.91E+03	5.53E+03	6.11E+03	6.69E+03	7.84E+03	8.95E+03	9.97E+03
122.06	5.13E+03	5.77E+03	6.36E+03	6.97E+03	8.15E+03	9.28E+03	1.03E+04
320.08	6.62E+03	7.41E+03	8.14E+03	8.86E+03	1.02E+04	1.15E+04	1.27E+04
391.69	7.01E+03	7.85E+03	8.63E+03	9.42E+03	1.10E+04	1.24E+04	1.38E+04
513.99	7.45E+03	8.37E+03	9.22E+03	1.01E+04	1.17E+04	1.34E+04	1.48E+04
661.64	7.99E+03	8.94E+03	9.82E+03	1.07E+04	1.24E+04	1.41E+04	1.56E+04
834.83	8.53E+03	9.52E+03	1.04E+04	1.14E+04	1.32E+04	1.49E+04	1.67E+04
898.02	8.64E+03	9.61E+03	1.06E+04	1.15E+04	1.34E+04	1.53E+04	1.69E+04
1115.52	9.29E+03	1.04E+04	1.14E+04	1.24E+04	1.44E+04	1.64E+04	1.81E+04
1173.21	9.46E+03	1.06E+04	1.16E+04	1.26E+04	1.46E+04	1.65E+04	1.84E+04
1332.46	9.85E+03	1.09E+04	1.18E+04	1.28E+04	1.46E+04	1.69E+04	1.87E+04
1836.01	1.04E+04	1.16E+04	1.27E+04	1.38E+04	1.55E+04	1.81E+04	2.00E+04

2.4. Procedimiento de Cribado.

El enfoque presentado en este trabajo se basa en las recomendaciones de la USEPA [EPA, 2008a]. La Figura 4 resume la metodología explicada a continuación.

En la primera etapa, se envía una muestra de 1L al laboratorio sin información sobre los radionucleidos en la muestra ni su actividad. Se realiza una prueba inicial con un monitor de contaminación gamma para obtener la tasa de cuentas medidas (cps). Este monitor está calibrado para una geometría de muestra de 1L y para la energía del ^{241}Am (59.54 keV) y, por lo tanto, es posible obtener una aproximación de la emisión gamma de la fuente y su actividad. Este radionúclido representa el caso más restrictivo y se toma como referencia, como se ha visto en las secciones 2.3 y 2.4. Estos datos representan el punto de partida del cribado. En este paso, la muestra también se clasifica como un caso de emergencia o como rutinario según lo define la guía del USEPA [EPA, 2008a].

El siguiente paso es tomar una pequeña muestra de 5 ml (sin diluir) y medirla solo durante 10 minutos en el detector BEGe para realizar un primer cribado de emergencia. La actividad esperada en la muestra de 5 ml se puede determinar a partir de la muestra de 1L, ya que sería aproximadamente proporcional, considerando la auto absorción dentro de la matriz de agua. Antes de realizar esta medición preliminar, se elige la distancia óptima fuente - detector para cumplir con el criterio de tiempo muerto, como se explica en la sección 2.4, comparando la emisión gamma de la muestra con los valores de la Tabla 1 (^{241}Am). Podría darse la situación en la que la muestra contuviese una actividad tan elevada que no pudiera situarse lo suficientemente alta como para realizar la medición (limitaciones estructurales), en cuyo caso, la muestra se diluiría reduciendo así la actividad, y se comenzaría de nuevo. Una vez finalizado el cribado, se sabrá qué radionúclido proporciona la contribución principal a la emisión gamma de la fuente (informe preliminar).

Finalmente, se realiza una medición durante 1 hora para caracterizar completamente la muestra (informe final). En esta etapa el volumen de muestra se podría aumentar hasta 50 ml, incrementando así su actividad, y por tanto su emisión gamma (y las cps medidas), mejorando la identificación de otros radionúclidos de baja actividad. En este punto, se debe elegir una combinación óptima de volumen y distancia para optimizar las cps medidas sin sobrepasar el límite establecido para cumplir con el criterio de tiempo muerto. La emisión gamma que emitiría la nueva muestra, se compara con el máximo permitido para cada configuración (colección de tablas homólogas a la Tabla 2 para las diferentes distancias fuente-detector). Teniendo en cuenta que cuanto mayor sea la actividad de la muestra, mayor será la dosis recibida por los trabajadores, la configuración final debe tomarse teniendo en cuenta también los principios ALARA.

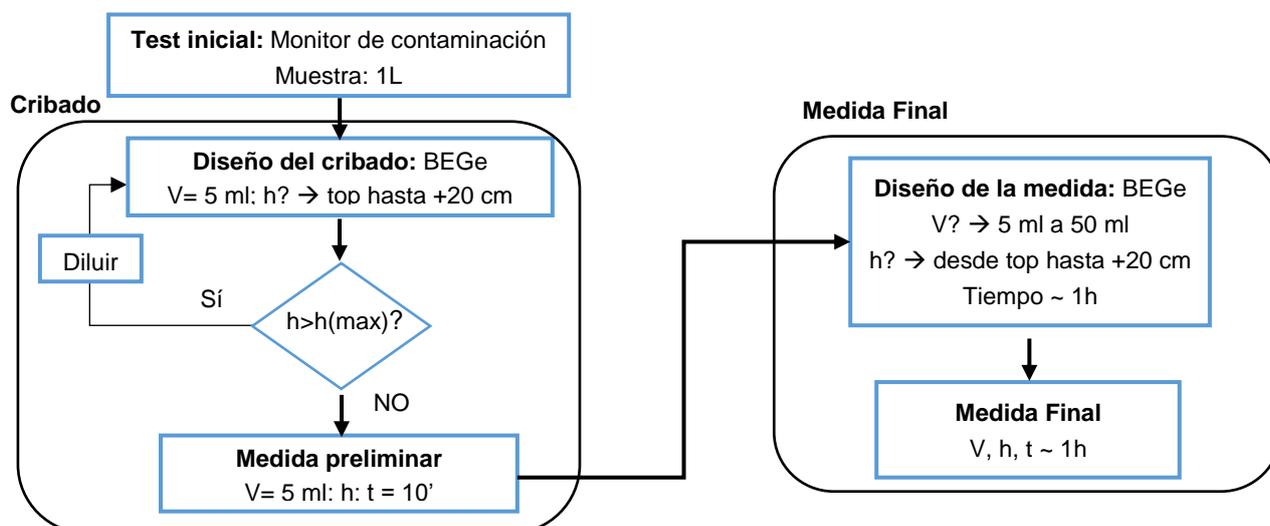


Figura 4: Secuencia de medición y cribado

3. CASOS DE APLICACIÓN

En esta sección se presentan tres casos hipotéticos diferentes para demostrar cómo funciona el enfoque propuesto. Todos ellos comienzan con la muestra de 5 ml sin ninguna información sobre los radionúclidos que contiene. En los primeros dos casos, el radionúclido principal en la muestra es diferente, ^{241}Am y ^{137}Cs , respectivamente. El tercero consiste en una combinación de ambos radionúclidos. Se obtienen los mismos resultados con el monitor de contaminación y la suposición inicial será de ^{241}Am para comenzar. Los radionúclidos reales en la muestra se conocerán después de la medición preliminar (cribado).

3.1. Caso 1 (^{241}Am)

A partir de la medición de la muestra de 1L con el monitor gamma, se determina que la muestra de 5ml emite 6000 γ/s . Para decidir la distancia en la que colocarla (cribado), este valor debe compararse con el máximo permitido para el ^{241}Am , utilizando la Tabla 1. La posición *top* tiene un límite de 4810 γ/s , inferior a las 6000 γ/s que emite la muestra. Sin embargo, es posible colocarla 2.5 cm más alta, con un nuevo límite de 11100 γ/s .

La medición se lleva a cabo durante 10 minutos a +2.5 cm y la prueba determina que el radionúclido principal presente en la muestra es de hecho ^{241}Am , obteniendo una actividad de 18.10 kBq (corregido por la eficiencia del ^{241}Am). Considerando la probabilidad de emisión gamma para la energía de 59.54 keV (35.9%), la fuente emitiría 6500 γ/s , ligeramente más alta que la predicha usando el monitor gamma inicial.

Después de la evaluación inicial, se debe realizar la medición final durante 1 hora. Para mejorar la detección de otros posibles radionúclidos con menor actividad, se podría requerir un volumen de fuente mayor. Para decidir la configuración óptima de volumen y distancia, se debe verificar la Tabla 3 comparando la emisión gamma de cada muestra con el máximo permitido. La Tabla 3 resume la máxima permitida para las configuraciones posibles. La segunda columna muestra la emisión gamma de cada muestra, aumentando consecuentemente con el volumen. Los valores verdes son combinaciones permitidas y los valores rojos son las no permitidas. Los valores en naranja representan combinaciones permitidas, pero no interesantes desde el punto de vista estadístico.

Tabla 3: Emisión gamma (γ/s) en cada muestra (col. 2) y la máxima permitida para cada configuración ^{241}Am .

Muestra	γ/s en la muestra	Top	+2.5cm	+5cm	+7.5cm	+10cm
T5ml	6.5E+03	4.81E+03	1.11E+04	2.20E+04	3.76E+04	5.80E+04
T10ml	1.3E+04	5.42E+03	1.23E+04	2.39E+04	4.05E+04	6.18E+04
T15ml	2.0E+04	6.00E+03	1.35E+04	2.58E+04	4.34E+04	6.57E+04
T20ml	2.6E+04	6.60E+03	1.46E+04	2.77E+04	4.61E+04	6.94E+04
T30ml	3.9E+04	7.78E+03	1.70E+04	3.16E+04	5.17E+04	7.71E+04
T40ml	5.2E+04	8.92E+03	1.92E+04	3.53E+04	5.73E+04	8.48E+04
T50ml	6.5E+04	1.00E+04	2.13E+04	3.90E+04	6.24E+04	9.21E+04

La mejor opción en términos de mejorar las estadísticas de medición será aquella cuya tasa de emisión gamma esté por debajo y más cerca de su límite. En este caso particular, la configuración T20ml colocada a 5 cm sobre la posición *top* maximiza este parámetro con 2.6E+04 γ/s , con un límite de 2.77E+04 γ/s . A medida que la actividad aumenta de acuerdo con el volumen, la solución final debe considerar también la exposición a dosis siguiendo los principios de ALARA.

3.2. Caso 2 (^{137}Cs)

Este caso comienza como el Caso 1, con 6000 γ/s en la muestra de 5 ml suponiendo ^{241}Am a partir de la lectura del monitor de contaminación gamma. Como se determinó en el caso 1, la muestra se coloca a 2.5 cm sobre la posición superior para la medición preliminar. La medición se lleva a cabo durante 10 minutos y el resultado determina que el radionúclido principal presente en la muestra ahora

es ^{137}Cs . La actividad de la muestra es de 7.18 kBq (corregida por la eficiencia del ^{137}Cs), lo que implica que la fuente emitiría 6100 γ/s (probabilidad del 85%).

Para la medición final, dado que el ^{137}Cs tiene una eficiencia menor que el ^{241}Am , es posible que en $h=0$ (posición *top*) se satisfaga el 0.6% de tiempo muerto. Para decidir la configuración final, se deben verificar las tablas homólogas a la Tabla 2 para las diferentes distancias fuente - detector en estudio. Las nuevas configuraciones posibles se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4: Emisión gamma (γ/s) en cada muestra (col. 2) y la máxima permitida para cada configuración (^{137}Cs).

Muestra	γ/s en la muestra	Top	+2.5cm	+5cm	+7.5cm
T5ml	6.10E+03	7.99E+03	2.02E+04	3.93E+04	6.54E+04
T10ml	1.22E+04	8.94E+03	2.18E+04	4.15E+04	6.82E+04
T15ml	1.83E+04	9.82E+03	2.33E+04	4.41E+04	7.13E+04
T20ml	2.44E+04	1.07E+04	2.48E+04	4.65E+04	7.42E+04
T30ml	3.66E+04	1.24E+04	2.80E+04	5.11E+04	8.02E+04
T40ml	4.88E+04	1.41E+04	3.11E+04	5.56E+04	8.62E+04
T50ml	6.10E+04	1.56E+04	3.38E+04	5.93E+04	9.11E+04

3.3. Caso 3 (^{241}Am y ^{137}Cs)

En el caso hipotético de que ambos radionúclidos, ^{241}Am y ^{137}Cs , estén presentes en la muestra, la configuración más conservadora sería la misma que si hubiera únicamente ^{241}Am (Tabla 3) debido a su mayor eficiencia total. Para una mejor estimación, el diseño final de la medida consistirá en calcular la contribución de cada radionúclido a la emisión gamma global, a continuación, las cps medidas por el detector debidas a cada radionúclido y, finalmente, la total.

Las cps totales no deben exceder el límite de 1500 cps. En este caso, la medida preliminar (medición de 10 minutos con la muestra T5ml) indica una emisión gamma de 6500 γ/s proveniente de ^{241}Am y ^{137}Cs . La Tabla 5 resume las mejores combinaciones para cinco contribuciones diferentes de cada radionúclido. Todas las configuraciones seleccionadas muestran un valor en cps muy cercano, pero por debajo del límite de 1500 cps.

Tabla 5: Mejores configuraciones de medida para cada contribución

^{137}Cs (% γ/s)	^{241}Am (% γ/s)	Altura	Volumen	cps
10	90	+5 cm	20 ml	1350
25	75	+7.5 cm	50 ml	1439
50	50	+5 cm	30 ml	1497
75	25	+2.5 cm	15 ml	1484
90	10	+5 cm	40 ml	1484

4. CONCLUSIONES.

En este trabajo se presenta una metodología y cribado para apoyar la espectrometría gamma que ofrecería beneficios prácticos y mejoras con el objetivo de dar una respuesta rápida, sin detrimento de la seguridad laboral, en el contexto de emergencias nucleares y radiactivas. El laboratorio de radiactividad ambiental (LRA) de la Universitat Politècnica de València ha desarrollado un procedimiento de espectrometría gamma mediante un detector BEGe respaldado con simulaciones en Monte Carlo (MCNP6) para caracterizar muestras de alta actividad.

Las simulaciones con MCNP6 han permitido estimar la actividad de muestra admisible para diferentes energías, volúmenes de fuente y distancias de muestra - detector para evitar la saturación del detector y cumplir con el criterio de tiempo muerto. Dependiendo de qué radionúclidos aporten la contribución principal a la actividad general de la muestra, la configuración óptima (volumen máximo

y distancia mínima) cambiará. La configuración óptima conduce a un compromiso entre dichos parámetros y el tiempo de medición, pero también debe considerar los principios del criterio ALARA.

La metodología presentada es aplicable a diferentes radionúclidos y emisiones gamma (dentro del rango de energía estudiado) para este detector BEGe, configurado para medir muestras de alta actividad. El desarrollo del cribado y de la secuencia de medición, basado en el uso de tablas derivadas de simulaciones en Monte Carlo, permite saber si la muestra necesita algún tratamiento previo, como dilución, y la configuración óptima para realizar las mediciones. Por lo tanto, la metodología y cribado propuestos permite reducir el tiempo de respuesta del laboratorio, así como el riesgo de contaminación y de exposición a la radiación para el personal del laboratorio.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen a la Cátedra CSN-UPV Vicente Serradell, así como al Laboratorio de Radiactividad Ambiental (Universitat Politècnica de València), por la financiación y los recursos dedicados a este trabajo de investigación en virtud de la subvención no. FPI-2015-S2-1576. Además, los autores agradecen a la Agencia Valenciana de Seguridad y Emergencias y a la Generalitat Valenciana por su apoyo en el "Convenio de colaboración entre la Agencia Valenciana de Seguridad y Respuesta a las Emergencias y la Universitat Politècnica de València para el Desarrollo del Plan de Vigilancia Radiológica en Emergencias" bajo la Subvención No. S7042000, 2018.

REFERENCIAS.

Canberra. (2009a). Genie 2000 Spectrometry Software Customization Tools. Canberra Industries, Merdin.

Croudace, I. W., Warwick, P. E., Reading, D. G., Russell, B. C. (2016). Recent contributions to the rapid screening of radionuclides in emergency responses and nuclear forensics. Trends Anal. Chem., 85 (part B), 120-129.

Dababneh, Sael, Al-Nemri, Ektimal, Sharaf, Jamal. (2014). Application of Geant4 in routine close geometry gamma spectroscopy for environmental samples. J. Environ. Radioact.134, 27-34.

Fantínová, K., Fojtík, P. (2014). Monte Carlo simulation of the BEGe detector response function for *in vivo* measurements of ²⁴¹Am in the skull. Radiat. Phys. Chem. 104, 345-350.

Fonseca, T.C.F., Mendes, B.M., Hunt, J.G. (2017). Simulation of internal contamination screening with dose rate meters. Radiat. Phys. Chem. 140, 112-115.

García-Talavera, M., Neder, H., Daza, M.J., Quintana, B., (2000). Towards a proper modeling of detector and source characteristics in Monte Carlo simulations. Appl. Radiat. Isot. 52, 777.

Hurtado, S., García-León, M., García-Tenorio, R. (2004). GEANT4 code for simulation of a germanium gamma-ray detector and its application to efficiency calibration. Nucl. Instr. and Meth. A 518, 764-774.

Maucec, M., de Meijer, R.J., Rigollet, C., Hendriks, P.H.G.M.(2004). Detection of radioactive particles offshore by γ -ray spectrometry Part I: Monte Carlo assessment of detection depth limits. Nucl. Instr. and Meth. A 525, 593-609.

Monte Carlo team, MCNP6TM – User's manual, Version 1.0, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634, May 2013.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2008a). Radiological Laboratory Sample Analysis Guide for Incidents of National Significance—Radionuclides in Water. Revision 0. Office of Air and Radiation, Washington, DC. EPA 402-R-07-007.