

Determinación de la dosis equivalente ambiental $H^*(10)$ en ciudades de gran altitud utilizando un centelleador de NaI (TI)

C. L. Nina Choque y H. M. Rivera Bretel*

Resumen

La tasa de dosis equivalente ambiental $H^*(10)$ se determinó en varias localidades del área metropolitana de las ciudades de La Paz y El Alto, en Bolivia. Se empleó un detector de centelleo de NaI (TI) para inferir la fluencia de rayos gamma, y éste se transformó en tasas de dosis por medio de los coeficientes apropiados. En este trabajo se desarrolla una metodología completa para la estimación de tasas de dosis asociadas a los rayos gamma emitidos en el suelo y la atmósfera, a partir de mediciones realizadas con el instrumento de centelleo. Se presenta la calibración de energía y resolución del aparato, seguida de la estimación de su respuesta y eficiencia mediante procedimientos de Monte Carlo. Por último, la definición de $H^*(10)$ es usado para determinar los coeficientes de conversión necesarios para transformar la fluencia de los rayos gamma en tasas de dosis. Con esta metodología, se estimaron tasas para $H^*(10)$ alrededor de 115 nSv/h, que se cree que son representativas de los campos de radiación terrestre encontrados en las tierras altas de Bolivia.

1. Introducción

Desde 2015, existe un plan nuclear a largo plazo en Bolivia, con el objetivo de iniciar un programa de investigación científica en física nuclear, y aplicar la tecnología nuclear en la agricultura, la producción de alimentos y la medicina [1]. Como parte de este plan, en el futuro se construirá un reactor de investigación, mientras que actualmente, se están construyendo otras tres instalaciones: una planta de irradiación destinada principalmente a la irradiación de alimentos con rayos gamma; un centro de medicina nuclear capaz de realizar exploraciones de imágenes médicas utilizando rayos X y tomografías por emisión de fotón único y emisión de positrones; una instalación de radioterapia ciclotrónica para el tratamiento del cáncer y la producción de isótopos radiactivos con fines médicos y de investigación. Toda esta infraestructura estará ubicada en la ciudad de El Alto, en una zona conocida como Parcopata. En este trabajo, son reportadas las mediciones de la radiactividad de fondo natural para la región. Todas las mediciones fueron hechas utilizando un detector de centelleo NaI (TI), con el objetivo de establecer líneas de referencia para estudios futuros.

En 1948, Robert Hofstadter descubrió que el yoduro de sodio dopado con talio producía una salida de luz inusualmente alta cuando se bombardeaba con partículas alfa y rayos gamma [2]. Desde entonces, el NaI (TI) ha sido un material de centelleo muy común para los detectores de radiación, principalmente debido a su amplia disponibilidad, bajo costo de producción y rendimiento lumínico relativamente alto. Además, la presencia de átomos de yoduro hace que los valores de fotofracción sean razonables para medir la energía de los rayos gamma, mientras que la salida de luz normalmente permite una resolución de energía de alrededor del 6% para fotones de 662 keV.

Se pueden utilizar detectores de centelleo basados en NaI (TI) para estimar la dosis equivalente asociada a los campos de radiación terrestre. Esto se hace calculando primero la fluencia de rayos gamma incidente en un instrumento y luego transformando la fluencia en dosis equivalente ambiental $H^*(10)$, por medio de los coeficientes apropiados. La Comisión Internacional en Protección Radiológica (ICRP) recomienda

$H^*(10)$ para el monitoreo del área porque se cree que esta cantidad proporciona un límite superior para la dosis efectiva.

Si bien se han realizado muchos estudios para determinar los niveles de radiación y dosis en todo el mundo, muy pocos se centran en la meseta andina. Por ejemplo, Christa et al. [3] han llevado a cabo una investigación para definir los niveles de fondo de rayos gamma en una región de Kerala, India, donde esperaban un alto nivel de radiación. Tomaron muestras del suelo de áreas de interés y cada muestra fue expuesta a un detector de NaI (TI) para realizar un análisis espectral de rayos gamma. Descubrieron que la concentración de radionucleidos en la arena varía considerablemente de un punto a otro, y que las tasas de dosis asociadas con los rayos gamma en la zona costera pueden ser ocho veces más altas que la radiación de fondo en la región. En otro estudio, Ramzaev et al. [4] describen la calibración de una mochila destinada a la medición de la tasa de dosis equivalente ambiental $H^*(10)$ asociada con rayos gamma en áreas contaminadas. Usando la mochila, estimaron la tasa de dosis equivalente ambiental, empleando un detector de centelleo de NaI (TI) como su dispositivo sensible. Las mediciones se realizaron en Bryansk, Rusia y Gomel, Bielorrusia; regiones que se vieron gravemente afectadas por el accidente de Chernobyl en 1986. Estudiaron la atenuación de fotones de 662 keV en el cuerpo de la persona que llevaba la mochila y encontraron una reducción del 22% en la tasa de dosis. En un estudio más reciente, Kranrod et al. [5] informan cómo equiparon un automóvil con un sistema de detección basado en un centelleador NaI (TI) para realizar medidas de gran superficie de rayos gamma producidos por fuentes naturales en Tailandia. Las tasas medias de dosis absorbidas que se encontraron en el este, el oeste y el sur de Tailandia se acercan al promedio ponderado por la población mundial.

Se sabe que la radiación gamma tiene una influencia directa sobre las células y su desarrollo, ya que se usa para matar células cancerosas en humanos y otros organismos vivos. Pero sus efectos no siempre son perjudiciales para las células, ya que niveles bajos de radiación pueden tener un impacto positivo en su proliferación, como muestra un estudio realizado por Planel et al. [6]. Quienes observaron los efectos de los rayos gamma en las poblaciones de protozoos y cianobacterias, encontraron que para dosis pequeñas (menos de 50 mGy/año) la tasa de crecimiento de la población aumentó para aquellas muestras que fueron irradiadas. Otro estudio, realizado por Lampe et al. [7], siguió la evolución de 500 generaciones de *Escherichia coli* (una bacteria que generalmente se encuentra en los intestinos de los humanos y algunos animales) bajo niveles normales de radiación de fondo en un laboratorio de superficie, el Laboratoire de Physique Corpusculaire en Clermont-Ferrand, Francia, y lo comparó con la evolución de 500 generaciones de la misma bacteria en un laboratorio subterráneo, el Laboratoire Souterrain de Modane en los Alpes franceses, que tiene una tasa de dosis aproximadamente ocho veces menor que el laboratorio de superficie. Se centraron en la capacidad de los organismos para sobrevivir y reproducirse, es decir, su condición física, y no encontraron diferencias significativas en la tasa de mejora de la condición física entre las poblaciones cultivadas en ambos laboratorios. Finalmente, Jargin [8] analiza los efectos que la radiación de dosis baja podría tener en los genes humanos, analizando estudios que relacionan algunas enfermedades en personas expuestas a niveles de radiación de fondo de dosis baja. Estos y otros estudios muestran la importancia de establecer una línea de base para la dosis en un ambiente debido a fuentes de radiación natural en el suelo y la atmósfera.

En este documento se presentan las mediciones y cálculos realizados para la determinación de la dosis ambiental equivalente $H^*(10)$ en la región norte del Altiplano Andino boliviano. Específicamente, se muestrearon tres distritos diferentes en el área metropolitana de las ciudades de La Paz y El Alto, a más de 3000 m sobre el nivel del mar. Todos los datos provienen de un detector de centelleo de NaI (TI) de

12,6 cm × 8,0 cm expuesto a campos de radiación terrestre. La calibración y resolución de energía, el cálculo de la respuesta y eficiencia del detector, la determinación del flujo de los rayos gamma a partir de los espectros de altura de pulso y el cálculo de los coeficientes de conversión empleados para obtener la dosis equivalente ambiental son discutidos.

Materiales y métodos

1.1 Medidas

El instrumento está compuesto por un centellador cilíndrico de NaI (TI) que tiene un diámetro de 12,6 cm y una altura de 8,0 cm. La base superior del centellador está acoplada a un fotomultiplicador de 5 pulgadas (PMT) que se utiliza para recolectar fotones de centelleo, mientras que su base inferior y el lateral están cubiertos por una capa reflectante, colocada para mejorar la eficiencia de la recolección. El PMT y el centellador residen dentro de un recipiente de aluminio (0,5 mm de espesor) que los aísla de la humedad y la luz externa.

Se utilizaron cuatro fuentes de rayos gamma radiactivos para realizar la calibración de energía del detector y determinar su resolución. Las fuentes fueron fabricadas por Spectrum Techniques como discos con un tamaño de 1.0 in × 0.125 in cada uno. Los datos experimentales se obtuvieron exponiendo el instrumento a cada una de estas fuentes, ubicadas a varias distancias de la cara inferior, alineadas con el eje del centellador. No se utilizó protección y los recuentos de fondo se restaron de todas las mediciones. La tabla 1 muestra la lista de fuentes junto con la actividad en el momento de la medición y la distancia al detector.

Varios efectos en el detector y el sistema de recopilación de datos pueden provocar que la relación entre la energía depositada y el número de canal en el analizador multicanal (MCA) se desvíe del comportamiento lineal esperado. Por ejemplo, el rendimiento de luz no proporcional en el centellador o una conversión de altura de pulso no lineal en el MCA pueden contribuir a la desviación. Por lo tanto, se asumió que la curva de calibración de energía era un polinomio de segundo grado.

$$E = a_0 + a_1C + a_2C^2 \quad (1)$$

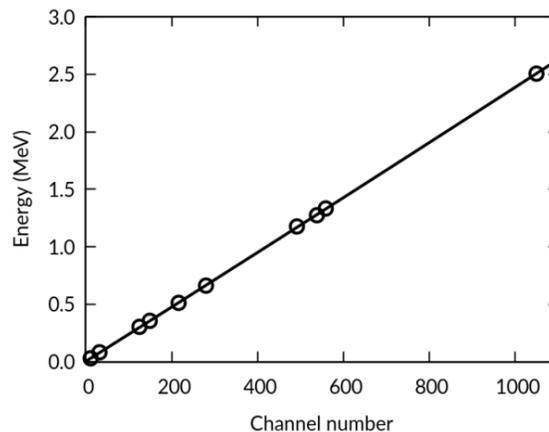


Figura 1: Curva de calibración de energía (línea continua) obtenida a partir de datos experimentales (círculos vacíos). La recta corresponde a un polinomio de segundo grado. El coeficiente de determinación del ajuste es $R^2 = 0.999982$.

donde E es la energía asociada con un pico y C es el canal MCA correspondiente. La figura 1 muestra los datos experimentales junto con la curva ajustada. Es evidente que un polinomio de segundo grado es un buen modelo para la relación entre estas dos variables.

La principal causa detrás de la mala resolución energética de los centelladores, en comparación con otros tipos de detectores, son las fluctuaciones estadísticas presentes durante la recolección de carga en el cátodo del PMT. Estas fluctuaciones surgen como resultado de las fluctuaciones de la producción de luz en el centellador y la producción de fotoelectrones en el propio PMT. La relación

$$FWHM = b_0 + b_1\sqrt{E} + b_2E + b_3E^2 \quad (2)$$

se postuló para relacionar el ancho total a la mitad del máximo (FWHM) de un pico centrado en la energía E , como una caracterización de la resolución energética del detector, en función de la energía. La curva resultante y los puntos de datos se muestran en la figura 2.

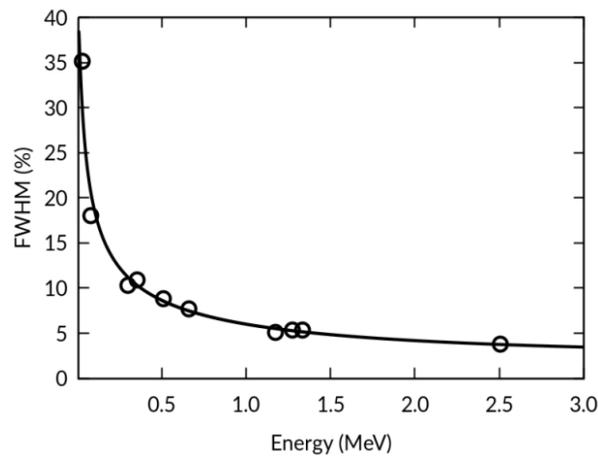


Figura 2. Resolución energética del detector en función de la energía. La línea corresponde a un polinomio en la raíz cuadrada de la energía, mientras que los círculos vacíos corresponden a medidas experimentales. El coeficiente de determinación del ajuste es $R^2 = 0.99022$.

2.2 Cálculo de Monte Carlo

Las funciones de respuesta de nuestro instrumento se calcularon mediante simulaciones de Monte Carlo, siguiendo el método de Berger y Seltzer [10]. Se desarrollaron códigos de simulación para el transporte de partículas y las interacciones, utilizando el kit de herramientas Geant4 [11], versión 10.6.0. Se tuvo en cuenta la geometría del detector, los materiales y la presencia del contenedor circundante y la capa reflectante. El centellador se definió como un cilindro de 12,6 cm × 8,0 cm, fabricado con un material de densidad 3,67 g/cm³, compuesto de sodio (15,3% de fracción de masa), yodo (84,5%) y talio (0,2% de fracción de masa). El centellador fue rodeado por una fina capa de alúmina (0,5 mm de espesor y densidad de 3.99 g/cm³), y ambos se encerraron dentro de una tapa cilíndrica de aluminio (0,5 mm de espesor y densidad de 2.70 g/cm³).

Las fuentes radiactivas se modelaron nuevamente mediante cilindros. La propia sustancia radiactiva (¹³⁷Cs, ¹³³Ba, ⁶⁰Co o ²²Na) se representó mediante un compuesto de peróxido de calcio (2,91 g/cm³), cuyo centro emitía radiación gamma. Su tamaño se fijó en 0.635 cm × 0.100 cm, este volumen se colocó dentro de un recipiente de plástico de tamaño 2,54 cm × 0,11 cm y densidad 0,90 g/cm³.

Los procesos físicos relevantes se introdujeron en el código de simulación. Estos incluyeron la dispersión de Compton, la producción de pares y el efecto fotoeléctrico de los rayos gamma. Se incluyeron ionización, dispersión, bremsstrahlung y aniquilación para electrones y positrones. Por último, también se incorporó la fluorescencia de rayos X.

La respuesta del detector para cada fuente se realizó simulando 250.000 eventos, cuyas energías se determinaron según el espectro característico de la fuente, y con distribuciones angulares isotrópicas en el punto de emisión. Para ahorrar tiempo de cálculo, las direcciones de emisión de los rayos gamma se restringieron para permanecer en el ángulo sólido abarcado por el instrumento, como se ve desde la fuente radiactiva. Los parámetros necesarios para el modelado realista de las fuentes se extrajeron de [12].

Los espectros de depósitos de energía obtenidos de las simulaciones se transformaron en funciones de respuesta aplicando un efecto de ensanchamiento gaussiano en cada medición. Después de realizar las simulaciones con el código Geant4, se agregó un término de perturbación aleatorio a la energía depositada en Edin el centellador, de tal manera que se obtenga una variante normal que sigue a $N(E_d, \sigma^2(E_d))$, donde la dependencia energética de la varianza se estableció de acuerdo con la ecuación (2). Para ello, se utilizó la conocida relación entre FWHM y la desviación estándar σ para una distribución normal.

$$FMWH = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma \quad (3)$$

Los resultados del depósito de energía se recogieron en un histograma que cubría el rango de energía apropiado para la fuente. Por lo tanto, el número de entradas en todos los intervalos se puede modelar utilizando la distribución multinomial y aproximarse mediante la distribución de Poisson para cualquier intervalo determinado. Por ejemplo, la incertidumbre asociada con la predicción de Monte Carlo para la altura del pico de 1332.5 keV de la fuente de ^{60}Co es cercana al 5.5% (intervalo de confianza del 99%), asumiendo que el número de entradas en el contenedor correspondiente es el parámetro de la distribución de Poisson, que sigue.

Para validar los resultados de los códigos de Monte Carlo, se hicieron comparaciones con las mediciones reales tomadas de las tres fuentes más activas en la tabla 1. Las figuras 3 a 5 muestran las predicciones de Monte Carlo y los datos experimentales. La actividad de las fuentes se estimó utilizando los recuentos producidos por el detector y una eficiencia de detección derivada de las simulaciones. Los resultados se muestran en la tabla 2.

La clave para la determinación del flujo de los rayos gamma a partir de los espectros medidos es la deconvolución de la distribución de energía. La relación entre el flujo ϕ y el espectro medido S es

$$S = M\phi \quad (4)$$

donde S es un vector de columna de $n \times 1$, M es una matriz de $n \times m$ y ϕ es un vector de columna de $m \times 1$. Lo que se observa realmente con un instrumento es S , mientras que ϕ permanece oculto. M contiene información sobre la eficiencia y respuesta del detector, estimada a partir de los resultados de las simulaciones de Monte Carlo, en nuestro caso. La determinación de ϕ a partir de la ecuación (4) es un problema de inversión, y para facilitar la resolución se eligió $m = n$, lo que hace que M sea una matriz cuadrada. Por lo tanto, el flujo de rayos gamma se obtiene como

$$\phi = M^{-1}S \quad (5)$$

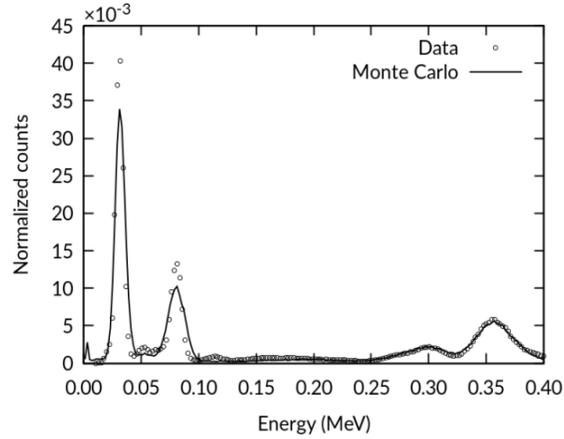


Figura 3: Espectros simulados (línea continua) y experimentales (círculos vacíos) para una fuente de Ba-133 ubicada cerca del fondo del detector.

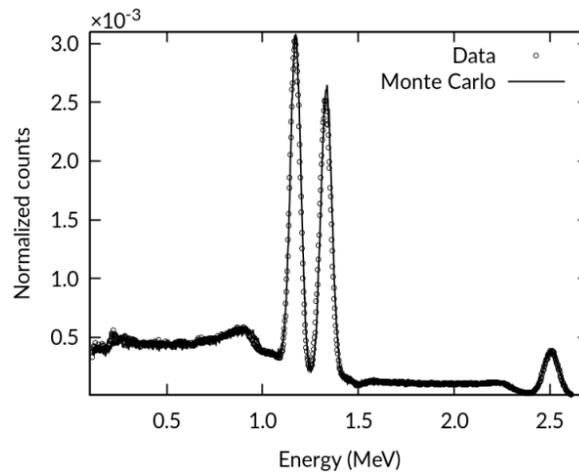


Figura 4: Espectros simulados (línea continua) y experimentales (círculos vacíos) para una fuente de Co-60 ubicada cerca del fondo del detector. La suma del pico a 2.50 MeV se reprodujo en el código de simulación sumando los resultados de los rayos gamma 1.17 MeV y 1.33 MeV obtenidos independientemente entre sí.

Para determinar M , se simuló la respuesta del instrumento a haces de rayos gamma monoenergéticos. Los haces se hicieron paralelos al eje del detector, y distribuida uniformemente sobre el área de su base inferior. Se cubrió el rango de energía de 20 keV a 3 MeV, en pasos de 74,5 keV, haciendo así la dimensión de todos los vectores 40×1 y 40×40 para la matriz de respuesta M .

Con la estimación del flujo, es posible calcular $H^*(10)$ empleando los coeficientes de conversión apropiados en un vector de columna v

$$H^*(10) = v^T \phi = v^T M^{-1} S \quad (6)$$

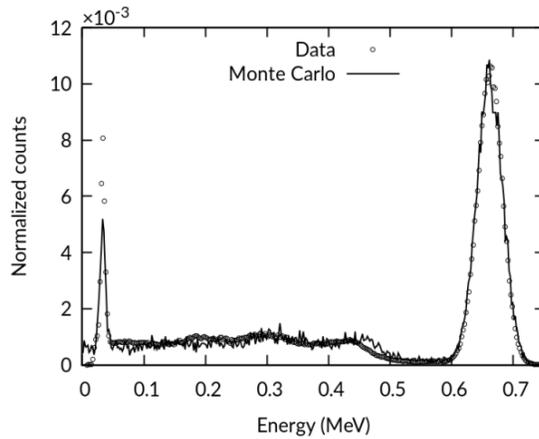


Figura 5: Espectros simulados (línea continua) y experimentales (círculos vacíos) para una fuente de Cs-137 ubicada cerca del fondo del detector.

$H^*(10)$ es la dosis ambiental equivalente (una cantidad escalar), asociada con el flujo de rayos gamma ϕ en su intervalo de energía correspondiente.

Los coeficientes de conversión que se utilizan como componentes de v se determinaron siguiendo la definición dada por la ICRP. $H^*(10)$ se define como “la dosis equivalente en un punto de un campo de radiación que sería producida por el campo correspondiente expandido y alineado en la esfera ICRU a una profundidad de 10 mm en el vector de radio opuesto a la dirección del campo alineado. La unidad de dosis equivalente ambiental es joule por kilogramo ($J\ kg^{-1}$) y su nombre especial es sievert (Sv)” [9]. Por lo tanto, se realizaron una serie de corridas de simulación con la esfera ICRU, irradiada con haces de rayos gamma paralelos, utilizando energías fijas por corrida. Se cubrió el mismo rango de energía de 20 keV a 3 MeV. La esfera ICRU es un objeto idealizado hecho de oxígeno (fracción de masa del 76,2%), carbono (11,1%), hidrógeno (10,1%) y nitrógeno (2,6%) con una densidad de $1\ g/cm^3$ [13].

La energía absorbida por un pequeño volumen 10 mm por debajo de la superficie de la esfera se registró para cada evento y luego se empleó para calcular la dosis equivalente asociada con la energía de los rayos gamma incidentes. Este pequeño volumen se colocó en el vector de radio que se opone al campo de radiación, como lo requiere la definición de $H^*(10)$. Se utilizó una técnica de reducción de la varianza para mejorar la precisión de nuestras estimaciones sin aumentar considerablemente el número de eventos simulados. Siguiendo el enfoque descrito en [14], los eventos se generaron con preferencia para aparecer cerca del centro de la esfera, de acuerdo a

$$r = Ru^2 \quad (7)$$

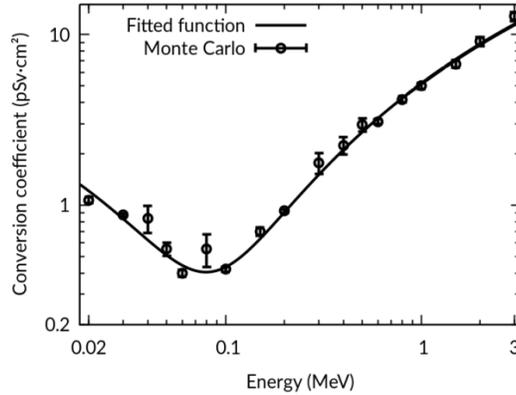


Figura 6: Coeficientes de conversión utilizados para determinar H^* (10) a partir de mediciones de fluencia de rayos gamma. Los coeficientes se han estimado mediante simulaciones de Monte Carlo de la esfera ICRU, irradiada con haces paralelos de rayos gamma monoenergéticos.

donde r es la coordenada radial del rayo gamma con respecto al centro de la esfera, R es el radio de la esfera y u es una variable aleatoria distribuida uniformemente en el intervalo $[0,1]$. Al analizar los depósitos de energía resultantes, es necesario ponderarlos usando w , donde

$$\omega = 4 \left(\frac{r}{R} \right)^{3/2} \quad (8)$$

para compensar el sesgo introducido en el componente radial de la distribución de rayos gamma. La Figura 6 muestra los coeficientes de conversión que se infirieron con esta técnica. La figura también muestra una función empírica ajustada a los datos.

2. Resultados y Discusiones

Se realizaron mediciones en tres distritos diferentes del área metropolitana de La Paz-El Alto: Mallasa, San Antonio y Zona Sur. Se empleó un detector de centelleo de NaI (TI) de 12,6 cm × 8,0 cm, se colocó a 40 cm sobre el suelo y se conectó a un MCA con 2048 canales. Los datos se tomaron usando 4 y 32 ganancias para el preamplificador, que luego se fusionaron de la línea usando el pico de aniquilación de una fuente de ^{22}Na . El tiempo de adquisición en cada ganancia fue de 1800 s, y el rango de energía cubierto para los rayos gamma con esta configuración abarcó de 20 keV a 3 MeV. Los espectros medidos en cada distrito se muestran en las figuras 7, 8 y 9.

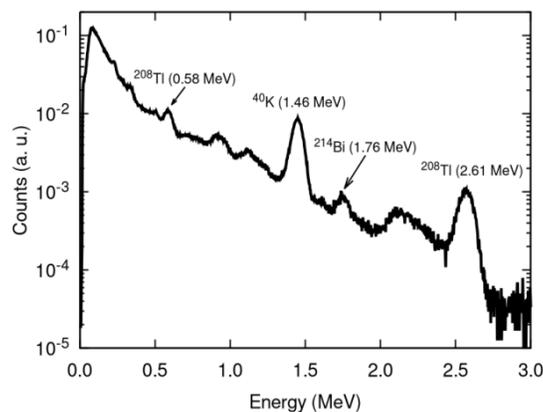


Figura 7: Los espectros de energía de los rayos gamma medidos con el instrumento en Mallasa.

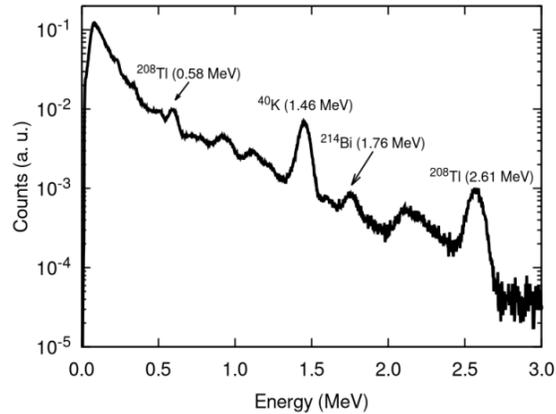


Figura 8: Los espectros de energía de los rayos gamma medidos con el instrumento en San Antonio.

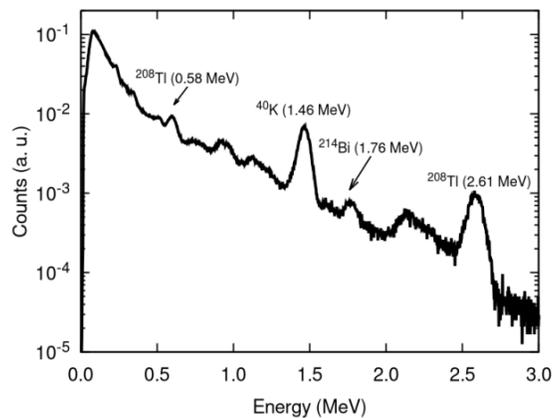


Figura 9: Los espectros de energía de los rayos gamma medidos con el instrumento en la Zona Sur.

La dosis ambiental equivalente $H^*(10)$ obtenida para cada lugar de muestreo se presenta en la tabla 3.

3. Conclusiones

Se describió la determinación de la dosis ambiental equivalente $H^*(10)$ asociada con los rayos gamma de fuentes naturales. Se presentó la calibración y resolución de energía de un detector de centelleo de NaI (TI) utilizado para inferir el flujo de rayos gamma incidente en ese aparato. La respuesta y la eficiencia del detector se evaluaron mediante simulaciones de Monte Carlo utilizando el juego de herramientas de Geant4, y los resultados se validaron comparando las predicciones realizadas con códigos de simulación, y con mediciones reales de fuentes radiactivas creadas por el hombre.

A continuación, se calcularon los coeficientes necesarios para la conversión de la fluidez de rayos gamma en dosis equivalente ambiental $H^*(10)$, mediante la definición dada por la CIPR. Finalmente, se estimaron las tasas de dosis equivalente ambiental para doce sitios de medición distribuidos en el área metropolitana de La Paz-El Alto.

Aunque se ha realizado una revisión de la literatura, no se han realizado mediciones previas de tasas de dosis equivalente ambiental para los rayos gamma en esta región.

Las estimaciones obtenidas para $H^*(10)$ no son peculiares, cuando se comparan con el promedio mundial reportado por Naciones Unidas [15]. Dado que las mediciones se tomaron en lugares de gran altitud (por encima de los 3000 m sobre el nivel del mar), la contribución de los rayos cósmicos a la dosis estimada debe ser mayor que en el resto del mundo. Además, otro factor aumenta aún más la contribución de los rayos cósmicos a las tasas de dosis. La presencia de la Anomalía del Atlántico Sur reduce la fuerza del

campo geomagnético para la totalidad del territorio boliviano, elevando así el flujo de rayos cósmicos y sus productos en la atmósfera a nivel del suelo. Pero incluso con una mayor contribución a las tasas de dosis del espacio exterior, los resultados son típicos en comparación con las mediciones realizadas en otros lugares.

En un futuro próximo, se espera diseñar un implemento de monitor radioactivo en tiempo real utilizando espectrometría de rayos gamma. La intención es rastrear la evolución temporal de las tasas de dosis equivalente ambiental $H^*(10)$ en esta región.

Referencias

- [1] (2015) Bolivia plans to build \$300m nuclear complex with research reactor, The Guardian, <https://www.theguardian.com/world/2015/oct/29/bolivia-nuclear-complex-reactor-russia-environment>.
- [2] Hofstadter, R. (1948) Alkali halide scintillation counters, *Phys. Rev.*, 74, 100-101.
- [3] Christa, E. P. et al. (2012) Radiation dose in the high background radiation area in Kerala, India, *Radiat. Prot. Dosim.*, 148(4), 482-486.
- [4] Ramzaev, V. et al. (2017) A backpack γ -spectrometer for measurements of ambient dose equivalent rate, $H^*(10)$, from ^{137}Cs and from naturally occurring radiation: The importance of operator related attenuation, *Radiat. Meas.*, 107, 14-22.
- [5] Kranrod, C. et al. (2020) Car-borne survey of natural background gamma radiation in western, eastern and southern Thailand *Radiat. Prot. Dosim.*, 188(2), 174-180.
- [6] Planel, H. et al. (1987) Influence on cell proliferation of background radiation or exposure to very low, chronic γ radiation *Health Phys.*, 52(5), 571-578.
- [7] Lampe, N. et al. (2019) Reducing the ionizing radiation background does not significantly affect the evolution of *Escherichia coli* populations over 500 generations. *Sci. Rep.*, 9(1), 1-6.
- [8] Jargin, S. V. (2014) On the genetic effects of low-dose radiation *J. Environ. Occup. Sci.*, 3(4), 199-203.
- [9] International Commission on Radiological Protection, 2007. The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP Publication 103.
- [10] Berger, M. J., Seltzer, S. M., (1972) Response functions for sodium iodide scintillation detectors, *Nucl. Instrum. Meth.*, 104, 317-332.
- [11] Agostinelli, S. et al. (2003) Geant4—a simulation toolkit, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, 506, 250-303.
- [12] International Atomic Energy Agency (2007), Update of x ray and gamma ray decay data standards for detector calibration and other applications. Volume 1: recommended decay data, high energy gamma ray standards and angular correlation coefficients.
- [13] International Commission on Radiation Units and Measurements (1985). Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources. ICRU Report 39.
- [14] R. Casanovas, E. Prieto, M. Salvadó, (2016) Calculation of the ambient dose equivalent $H^*(10)$ from gamma-ray spectra obtained with scintillation detectors. *Appl. Radiat. Isot.*, 118, 154-159.
- [15] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) (2000). Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources. E.00.IX.3, 1–654.