



# COMPARACIÓN DE LA TASA DE EQUIVALENTE DE DOSIS AMBIENTAL H\*(10) EVALUADA MEDIANTE SISTEMAS DE MEDICIÓN PORTÁTIL ANALÓGICO Y DIGITAL

## Comparison of the Ambient Dose Equivalent Rate H\*(10) Evaluated Using Analog and Digital Portable Measurement Systems

 Gilson Pucha Amancha\*

 Henry Mayorga Pérez

 Luis Mera Landeta

 Maribel Lema Londo

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Riobamba, Ecuador.

\* [gilsonpucha@gmail.com](mailto:gilsonpucha@gmail.com)

### RESUMEN

El objetivo de la investigación fue comparar la tasa de equivalente de dosis ambiental H\*(10), medida con dos detectores portátiles (análogo y digital) de NaI(Tl), para evaluar su concordancia, precisión y aplicabilidad. Las mediciones se realizaron en 189 lugares a 1 m del suelo en la provincia del Azuay en sitios no perturbados, lo más planos posible y alejados de carreteras o edificaciones. Los grupos de datos obtenidos con ambos sistemas de medida se trataron en unidades de  $\mu\text{Sv/h}$  para su análisis estadístico inferencial mediante el software R. La prueba de Shapiro-Wilk comprobó que los conjuntos de datos no presentaron una distribución normal. La prueba de Wilcoxon evidenció que no existía una diferencia estadística significativa ( $p > 0,05$ ) entre los resultados de ambos detectores, a pesar de que la sonda del detector analógico tiene un menor diámetro. Además, la prueba de Spearman mostró una correlación positiva extremadamente alta ( $\rho = 0,97$ ) entre las medidas comparadas. Se concluye que ambos sistemas de medición presentan un alto grado de concordancia, con resultados consistentes y precisos en la estimación de la tasa de equivalente de dosis ambiental, lo que los convierte en herramientas válidas para estudios de campo orientados al monitoreo radiológico.

**Palabras claves:** *Detector de Centelleo, Radiación Ionizante Natural, Dosis Equivalente, Shapiro-Wilk, Spearman.*

### ABSTRACT

The objective of this research was to compare the ambient dose equivalent rate H\*(10), measured with two portable NaI(Tl) detectors (one analog and one digital), to evaluate their agreement, precision, and applicability. Measurements were carried out at 189 locations in the province of Azuay, at a height of 1 m above the ground, preferably in undisturbed and relatively flat areas, and at a sufficient distance from roads or buildings. The two datasets obtained from both measurement systems were processed in  $\mu\text{Sv/h}$  units for inferential statistical analysis using R software. The Shapiro-Wilk test confirmed that neither dataset followed a normal distribution. The Wilcoxon test showed that there was no statistically significant difference ( $p > 0.05$ ) between the results of the two detectors, despite the smaller diameter of the analog detector's probe. Furthermore, the Spearman test revealed an extremely high positive correlation ( $\rho = 0.97$ ) between the compared measurements. It is concluded that both measurement systems exhibit a high degree of agreement, providing consistent and accurate estimates of the environmental dose equivalent rate, which makes them valid and applicable tools for field studies oriented toward radiological monitoring.

**Keywords:** *Scintillation Detector, Natural Ionizing Radiation, Equivalent Dose, Shapiro-Wilk, Spearman.*

## I. INTRODUCCIÓN

Estimar la dosis de radiación gamma ambiental en un entorno determinado permite identificar áreas donde los niveles de radiación pueden ser elevados por causas naturales o por actividades antropogénicas. Una medición precisa con equipos adecuados facilita la comprensión de los posibles efectos en la población y la implementación de medidas de control y regulación cuando sea necesario (1-3). En el ambiente, la radiación gamma proviene principalmente de la emisión del radioisótopo  $^{40}\text{K}$  y de los radionucleidos de las series de desintegración del  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$  presentes en el suelo (4,5). El material radioactivo contenido en el suelo genera un campo de radiación electromagnética en la interfaz suelo-aire debido a su baja Transferencia Lineal de Energía (TLE), la radiación gamma tiene un mayor alcance en el aire en comparación con las partículas alfa y beta, lo que resulta en una exposición externa al público (6), contribuyendo aproximadamente al 20% de la exposición total por fuentes naturales (7).

La medición de la radiación gamma es esencial en estudios geofísicos como la exploración de minerales, estudios hidrogeológicos, geotecnia, arqueología, entre otros, y en términos de protección radiológica ambiental, el monitoreo es un método preliminar para identificar Material Radiactivo de Origen Natural (NORM por sus siglas en inglés) en el suelo (8). Este último, es material que genera niveles de radiación ambiental significativamente mayores que los niveles de fondo típicos, los cuales pueden ser sometidos a control y regulación si sobrepasan los límites internacionales (9).

Existe una variedad de detectores de radiación gamma en el mercado, los cuales se seleccionan principalmente según la aplicación particular (10). Para elegir el detector apropiado, se deben evaluar varios factores, como la calidad de la radiación, la intensidad de la radiación a medir, la ubicación de la fuente y el tipo de información deseada, además de la eficiencia de detección de los radioisótopos de interés, que varía según el instrumento y su fabricante (11). En aplicaciones como el monitoreo de radiación gamma ambiental, se recurre generalmente a equipos portátiles que ofrecen resultados rápidos y fáciles de interpretar. Su propósito es facilitar la detección basada en la existencia de niveles de radiación que superen o no los límites nacionales o internacionales establecidos por los organismos de control (12).

Los detectores de centelleo, como el  $\text{NaI(Tl)}$ , son comúnmente empleados en la medición de radiación gamma ambiental debido a su bajo costo. Varios estudios (13-15) han utilizado este tipo de detectores, cuyos resultados se muestran y procesan directamente en medidores analógicos y digitales. Los medidores analógicos son ideales para un uso prolongado en salidas de campo, ya que ofrecen una respuesta rápida y sencilla; sin embargo, suelen carecer de capacidades avanzadas de registro y procesamiento (16). Por otro lado, los detectores digitales modernos son dispositivos flexibles para el monitoreo en diferentes territorios, son ligeros, resistentes y se adecuan perfectamente para estudios al aire libre, permitiendo almacenar datos de hasta 1000 puntos, efectuar promedios y cambiar unidades de medida, lo que amplía su utilidad en estudios de campo (17). Ambos tipos de medidores mantienen una exactitud de lectura de aproximadamente el 10% del valor real y permiten trabajar en un amplio rango de temperaturas, de  $-15^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ , lo que los hace idóneos para las diversas regiones del Ecuador.

En muchos países con recursos limitados, especialmente en contextos de monitoreo ambiental rutinario, se continúa utilizando detectores analógicos debido a su disponibilidad y bajo costo (18). Sin embargo, no siempre se ha evaluado con suficiente profundidad la comparabilidad de sus mediciones frente a las obtenidas por dispositivos digitales más avanzados. En este sentido, la aplicación de pruebas estadísticas permite determinar si existen diferencias significativas al comparar conjuntos de datos, así como evaluar la relación entre variables, incluso cuando esta no es lineal. Cada prueba aporta información relevante para estudios experimentales, comparativos o de validación de instrumentos. (19,20).

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para medir la tasa equivalente de dosis ambiental  $\text{H}^*(10)$  de radiación gamma, se utilizaron dos equipos: un medidor analógico (modelo 3, marca Ludlum) con una sonda de centelleo modelo 44-2 (21) del Laboratorio de Técnicas Nucleares de la Facultad de Ciencias, y un medidor digital (modelo 3003, marca Ludlum) con una sonda de centelleo modelo 44-10 (22) del Grupo de Energías Alternativas y Ambiente (GEAA).

La calibración de estos equipos es crucial, ya que puede influir directamente en la medición de la tasa de equivalente de dosis ambiental *in situ* (23,24). Una calibración adecuada garantiza la precisión y trazabilidad de los resultados, y contribuye a mantener una incertidumbre controlada, respaldada por la literatura científica y la metrología actual. El primer sistema de medida fue calibrado en la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN) el 10 de octubre

de 2021, mientras que el segundo cuenta con su calibración de fábrica emitida el 23 de junio de 2022. El factor de calibración de ambos sistemas de medida es 0,99. Las dos sondas presentan una respuesta dependiente de la energía, operan con una tensión de funcionamiento de 500 a 1200 V y trabajan en un rango de temperatura de -15 a 50 °C. La Tabla 1, detalla algunas de las especificaciones principales de las sondas empleadas.

Especificaciones de los detectores	Sonda modelo 44-2 utilizada con el medidor analógico modelo 3	Sonda modelo 44-10 utilizada con el medidor digital modelo 3003
Tipo de detector	Centelleador de NaI(Tl), 2,5 cm (1 in) de diámetro. x 2,5 cm (1 in) de espesor	Centelleador de NaI(Tl), 5,1 cm (2 in) de diámetro. x 5,1 cm (2 in) de espesor
Eficiencia (4π)	<sup>125</sup> I: 7% <sup>57</sup> Co: 10% <sup>137</sup> Cs: 3% <sup>60</sup> Co: 3%	<sup>125</sup> I: 4% <sup>57</sup> Co: 20% <sup>137</sup> Cs: 9% <sup>60</sup> Co: 15%
Sensibilidad típica ( <sup>137</sup> Cs gamma)	175 cpm por μR/h	900 cpm por μR/h
Rango de energía recomendado	20 keV a 1,5 MeV	60 keV a 2 MeV
Fondo típico (campo de 10 μR/h)	1800 cpm	9750 cpm
Tubo fotomultiplicador	2,86 cm (1,123 in) de diámetro, blindado magnéticamente	5,1 cm (2 in) de diámetro

Tabla 1. Especificaciones de las sondas utilizadas.

Para cumplir con el objetivo del presente estudio, se realizaron mediciones en 189 puntos de la provincia del Azuay (Figura 1) en septiembre de 2022. Se eligieron sitios no perturbados, lo más planos posibles y alejados de carreteras o edificaciones. Ambos sistemas de medición se colocaron sobre un soporte de madera a un altura de un metro del suelo, siguiendo la recomendación metodológica internacional que establece: “Para las mediciones de equivalente de dosis ambiental, normalmente se utiliza una altura de 1 m sobre el nivel del suelo” (25). En cada sitio, se efectuaron 10 mediciones de 1 minuto cada una, esto se realizó con fines estadísticos para obtener un valor promedio de cada sitio monitoreado.



Figura 1. Mapa de puntos de monitoreo en la provincia del Azuay

Las características del medidor analógico modelo 3 son el cambio manual de escala (0,1x, 1x, 10x y

100x) y una selección manual de la velocidad de respuesta (alta y baja). En el presente estudio, el equipo se operó generalmente en la escala de 1x, a excepción de un caso donde se cambió a la escala superior de 10x por el incremento en la tasa de conteo detectada. Todas las mediciones fueron registradas con la opción de velocidad de respuesta lenta, esto permitió reducir el error del observador al registrar los datos. Además, en cada sitio de medida se esperó la estabilización de la aguja del medidor analógico entre 10 a 30 segundos asegurar la lectura.

El sistema de medida 2, que incluía el medidor digital y el detector modelo 44-10, proporcionó directamente la tasa de equivalente de dosis ambiental H\*(10) en μSv/h, por tanto, se obtuvo el promedio de la tasa de equivalente de dosis ambiental H\*(10) para cada sitio (De<sub>2</sub>). El sistema de medida 1, compuesto por el medidor analógico y el detector modelo 44-2, arrojó valores en cuentas por minuto (cpm). En este caso, el promedio de la tasa de conteo (g) medida en cpm de cada sitio, fue convertido a tasa de equivalente de dosis ambiental H\*(10) (De<sub>1</sub>) en unidades de μSv/h con la siguiente ecuación:

donde,

$$De_1 = \frac{g}{S} * FE \quad (1)$$

$g$ , promedio de la tasa de conteo (cpm)

$s$ , sensibilidad típica del equipo (175 cpm /1 $\mu$ R/h)

$FC$ , factor de conversión (1  $\mu$ R/h = 0,0087  $\mu$ Sv/h)

Los promedios de la tasa de dosis equivalente ambiental  $H^*(10)$  de ambos grupos se analizaron utilizando el software R. Se realizó la estadística descriptiva e inferencial en el software, evaluando si los datos seguían una distribución normal mediante la prueba de Shapiro-Wilk, determinando si ambos conjuntos de datos eran estadísticamente equivalentes con la prueba de Wilcoxon y encontrando si los dos grupos de datos presentaban correlación con la prueba de Spearman (26). Esta combinación de análisis garantizó una evaluación integral de la relación

entre los dos sistemas de medida, incluso considerando que los datos no seguían una distribución normal.

### III. RESULTADOS

En la figura 2, se evidencian las 189 mediciones de tasa de equivalente de dosis ambiental ( $\mu$ Sv/h) distribuidas en 3 gráficas. La gráfica a) abarca mediciones desde el número 1 hasta aproximadamente el 65, la b) continúa la secuencia desde el 66 hasta el 130, y la c) finaliza su registro con las mediciones comprendidas desde el 131 hasta el 189. La tasa de equivalente de dosis ambiental medida por el detector analógico se representa con puntos azules y con puntos rojos el detector digital.

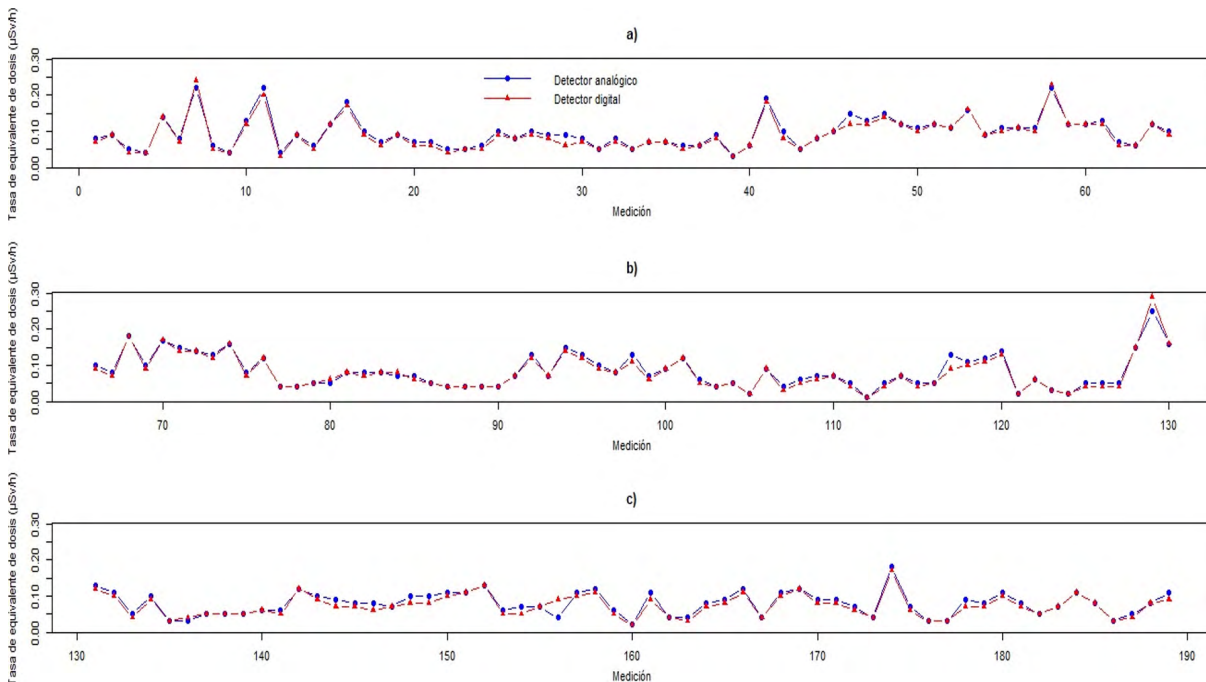


Figura 2. Optimización del desempeño laboral en empresas carroceras de Chimborazo: Claves de gestión del capital humano según una visión inferencial multivariante

En la Tabla 2, se presenta la estadística descriptiva y prueba de normalidad respectiva para los dos conjuntos de datos.

Estadística descriptiva	Sistema de medida 1 $De_1$ ( $\mu$ Sv/h)	Sistema de medida 2 $De_2$ ( $\mu$ Sv/h)
Mínimo	0,01	0,01
1er Cuartil.	0,05	0,05
Promedio	0,09	0,08
Mediana	0,08	0,07
3er Cuartil	0,11	0,10
Máximo	0,25	0,29

Desviación estándar	0,04	0,04
Curtosis	1,21	3,33
Asimetría	0,96	1,42
<b>Prueba de normalidad Shapiro-Wilk</b>		
W	0.94	0.90
P-valor	$4,96 \times 10^{-07}$	$6,23 \times 10^{-10}$

Tabla 2. Estadística descriptiva de la tasa de dosis equivalente ambiental  $H^*(10)$  de ambos sistemas de medida.

Los dos sistemas de medida registraron valores mínimos de 0,01  $\mu$ Sv/h. El promedio y la mediana entre ellos difieren en 0,01  $\mu$ Sv/h, y sus

desviaciones estándar son idénticas (0,04). La tasa de equivalente de dosis ambiental H\*(10) máxima del sistema de medida 2 (0,29 µSv/h) fue superior a la registrada por el sistema de medida 1 (0,25 µSv/h). Es importante mencionar que el valor máximo registrado en el presente estudio pertenece a una concesión de material de construcción de feldespatos ubicado en el cantón Pucará (coordenadas -3,243453, -79,446918) y la dosis efectiva anual calculada de 0,50 mSv/a se encuentra por debajo del límite de exposición al público de 1 mSv/a (25).

La prueba de Shapiro-Wilk se empleó para determinar la normalidad de los datos (27). Los p valores obtenidos para el sistema de medida 1 y el sistema de medida 2 fueron inferiores a 0,05, por tanto, se rechazó la hipótesis nula que siguen una distribución normal y se aceptó la hipótesis alternativa. Una vez confirmado que los datos no siguen una distribución normal, en la Tabla 3 se presentan los resultados de la prueba de Wilcoxon, un test no paramétrico que evalúa si la distribución de los dos grupos de datos difiere (28), es decir, si existe un desplazamiento en la ubicación de sus medianas. Adicionalmente, se muestran los resultados de la prueba de Spearman, la cual mide la fuerza y dirección de la relación monótona entre dos variables cuantitativas.

Estadística inferencial	
Prueba de Wilcoxon	
W	19401
P-valor	0,15
Prueba de Spearman	
R	31711
P-valor	2,2 x 10 <sup>-16</sup>
P	0,97

Tabla 3. Estadística inferencial de la tasa de equivalente de dosis ambiental H\*(10) de ambos sistemas de medida.

A un nivel de significancia del 5 % (p > 0,05), la prueba de Wilcoxon no mostró evidencia estadísticamente significativa que permitiera afirmar que los dos grupos tienen medianas diferentes. Esto sugiere que ambos grupos presentan distribuciones similares.

En cuanto a la prueba de Spearman (29), el p-valor resultó ser extremadamente inferior a 0,05, lo que llevó a aceptar la hipótesis alternativa. Por lo tanto, la correlación observada es estadísticamente significativa, lo que implica que la relación entre las variables no es producto

del azar. El valor de rho (ρ), cercano a la unidad, indica una correlación monótona fuertemente positiva entre ambas variables.

En la Figura 3, se muestra el diagrama de caja y bigotes de ambos grupos de datos. Se observa que sus distribuciones exhiben una gran similitud en forma y dispersión, y que sus medianas se encuentran muy próximas. El segundo grupo presenta una mayor dispersión en los valores atípicos positivos, aunque su dispersión intercuartílica es comparable.

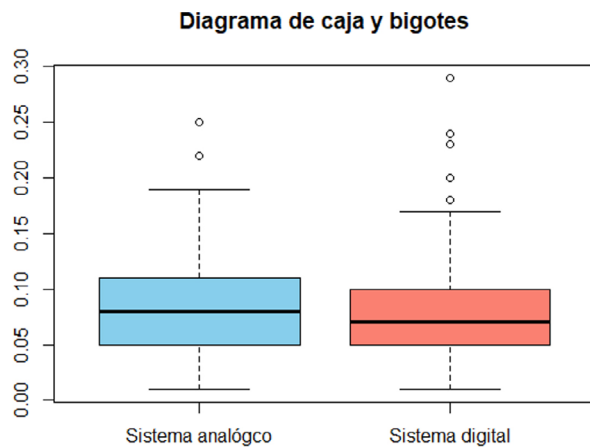


Figura 3. Diagrama de caja y bigotes de la tasa de equivalente de dosis ambiental H\*(10) obtenidos con los dos sistemas de medición.

#### IV. DISCUSIÓN

En la Figura 2 se observa que las mediciones de radiación de ambos instrumentos están en alta concordancia, aunque los puntos están prácticamente superpuestos en la mayoría de los sitios de medición donde la tasa de dosis es baja o moderada. Los puntos azules (detector analógico) son ligeramente más altos que los puntos rojos en los picos de intensidad de la radiación. Este fenómeno se puede atribuir a la constante de tiempo de los circuitos analógicos, que pueden integrar o sobrestimar ligeramente las fluctuaciones rápidas de la señal.

Los valores mínimos registrados por los sistemas de medida se atribuyen a la sensibilidad inherente de las sondas. Específicamente, la sonda modelo 44-2 presenta una sensibilidad típica de 175 cpm por µR/h, mientras que la sonda modelo 44-10 tiene una sensibilidad típica de 9750 cpm por µR/h.

El análisis estadístico comparativo de la tasa de equivalente de dosis ambiental H\*(10) entre

ambos sistemas de medición reveló hallazgos relevantes para la evaluación y validación instrumental en estudios de radiación ionizante natural. En primer lugar, la prueba de Wilcoxon de suma de rangos, con corrección de continuidad, no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los datos obtenidos por los dos sistemas ( $p = 0.1456$ ). Esto sugiere que ambos presentan distribuciones similares en cuanto a los valores medidos. Consecuentemente, desde una perspectiva no paramétrica, los sistemas pueden considerarse equivalentes en términos de su comportamiento mediano, lo que valida su uso indistinto en contextos de monitoreo radiológico ambiental.

De manera complementaria, el análisis de correlación por rangos de Spearman arrojó un coeficiente  $\rho = 0,9718$  con un p-valor  $< 2,2 \times 10^{-16}$ . Este resultado afirma una correlación positiva extremadamente fuerte y estadísticamente significativa entre los valores reportados por ambos sistemas. La alta concordancia respalda la consistencia interna de las mediciones y sugiere que ambos instrumentos responden de forma proporcional a las variaciones en los niveles de radiación del entorno. Este hallazgo es especialmente relevante, dado que las pruebas de Shapiro-Wilk habían indicado previamente que los datos no seguían una distribución normal.

La interpretación visual del diagrama de caja y bigotes refuerza estas conclusiones. La similitud en las medianas y los rangos intercuartílicos sugiere una composición estadística comparable entre ambos conjuntos de datos. Sin embargo, el sistema de medida 2 mostró una dispersión ligeramente mayor y una frecuencia más alta de valores atípicos en el extremo superior. Estos valores podrían estar relacionados con la eficiencia de detección del detector que depende del tamaño del área

activa, en este caso el sistema de medida 2 está conformado por la sonda que tiene un área activa más grande, de 5.1 cm y el rango de respuesta de energía que va desde 60 keV a 2 MeV.

Por lo mencionado anteriormente, estos resultados proporcionan evidencia sólida de la equivalencia funcional entre los dos sistemas de medición, validando su aplicabilidad en estudios de evaluación de la radiación gamma ambiental. Su alta correlación y comportamiento coherente los consolidan como herramientas confiables para proyectos de vigilancia radiológica, caracterización de sitios y control en entornos de exposición natural.

## V. CONCLUSIONES

A pesar de la evidente diferencia en sensibilidad entre las dos sondas (la 44-10 con 9750 cpm por  $\mu\text{R/h}$  y la 44-2 con 175 cpm por  $\mu\text{R/h}$ ), los resultados estadísticos indican que ambos sistemas tienden a mostrar una respuesta similar en la tasa de equivalente de dosis ambiental. La ausencia de diferencias significativas en la prueba de Wilcoxon y la fuerte correlación de Spearman son fundamentales para garantizar el uso confiable de estos sistemas en estudios de monitoreo de radiación gamma ambiental, siempre y cuando se mantenga la calibración adecuada de los equipos y se realice una verificación periódica.

Las variaciones observadas en la tasa de equivalente de dosis ambiental pueden explicarse por las distintas composiciones mineralógicas presentes en los suelos de la provincia del Azuay. En este contexto, el valor máximo registrado en el presente estudio corresponde a una concesión de material de construcción rica en feldespato, ubicada en el cantón Pucará (coordenadas -3,243453, -79,446918).

## VI. REFERENCIAS

1. Lewicka S, Piotrowska B, Łukaszek-Chmielewska A, Drzymala T. Assessment of natural radioactivity in cements used as building materials in Poland. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 2022 [citado 21 Ago 2025];19(18):11695. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph191811695>
2. Carpentieri C, Maiorana A, Ampollini M, Antignani S, Caprio M, Carelli V, et al. A large and feasible national survey representative of population exposure to outdoor gamma radiation in urban areas. *Front Public Health* [Internet]. 2024 [citado 21 Ago 2025];12:1388783. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1388783>

3. Huang YJ, Guo GY, He Y, Yang LT, Shan Z, Chen CF, et al. A comparative study of terrestrial gamma dose rate in air measured by thermoluminescent dosimeter, portable survey meter and HPGe gamma spectrometer. *J Environ Radioact* [Internet]. 2016 [citado 8 Ago 2025];164:13-18. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.06.020>
4. Salazar S, Castillo LA, Montes L. Evaluation of naturally occurring radioactive materials (NORM) in the soil, in a potential area for unconventional reservoirs in the Rancheria Sub-Basin. *Chemosphere* [Internet]. 2021 [citado 8 Ago 2025];283:131098. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131098>
5. Pucha G, Pérez M, Aguay D, Chávez E, Chávez N, Giroletti E, et al. Soil radioactivity in the highest volcanic region of Northern Andes. *J Environ Radioact* [Internet]. 2023 [citado 8 Ago 2025];262:107142. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107142>
6. Belyaeva O, Movsisyan N, Pyuskyulyan K, Sahakyan L, Tepanosyan G, Saghatelian A. Yerevan soil radioactivity: Radiological and geochemical assessment. *Chemosphere* [Internet]. 2020 [citado 8 Ago 2025];265:129173. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129173>
7. UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. Vol 1: Sources, Annex B, Exposures from natural radiation sources. New York: United Nations; 2020.
8. Alomari AH, Saleh MA, Hashim S, Alsayaheen A. Investigation of natural gamma radiation dose rate (GDR) levels and its relationship with soil type and underlying geological formations in Jordan. *J Afr Earth Sci* [Internet]. 2019 [citado 1 Ago 2025];155:32-42. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.04.006>
9. Larijani C, Pearce AK, Regan PH, Russell BC, Jerome SM, Crespo MT, et al. Reference materials produced for a European metrological research project focussing on measurements of NORM. *Appl Radiat Isot* [Internet]. 2017 [citado 25 Jul 2025];126:279-284. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.02.007>
10. Carchon R, Moeslinger M, Bourva L, Bass C, Zendel M. Gamma radiation detectors for safeguards applications. *Nucl Instrum Methods Phys Res A* [Internet]. 2007 [citado 20 Ago 2025];579(1):380-383. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.04.086>
11. Ferella F, Nisi S, Balata M, Grabmayr P, Laubenstein M, Schwingenheuer B, et al. Enriched high purity germanium detectors for the LEGEND-200 experiment: purification and characterization by quadrupole and high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). *Appl Radiat Isot* [Internet]. 2023 [citado 8 Ago 2025];200:110904. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110904>
12. IAEA. Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry. Safety Reports Series No. 34 [Internet]. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2003 [citado 15 Ene 2026]. Disponible en: <https://www.iaea.org/publications/6831/radiation-protection-and-the-management-of-radioactive-waste-in-the-oil-and-gas-industry>
13. Arnedo MA, Rubiano JG, Alonso H, Tejera A, González A, González J, et al. Mapping natural radioactivity of soils in the eastern Canary Islands. *J Environ Radioact* [Internet]. 2016 [citado 8 Ago 2025];166:242-258. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.07.010>
14. Lucchetti C, Briganti A, Castelluccio M, Galli G, Santilli S, Soligo M, et al. Integrating radon and thoron flux data with gamma radiation mapping in radon-prone areas. The case of volcanic outcrops in a highly-urbanized city (Roma, Italy). *J Environ Radioact* [Internet]. 2019 [citado 25 Jul 2025];202:41-50. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.02.004>
15. Sanusi MSM, Ramli AT, Gabdo HT, Garba NN, Heryanshah A, Wagiran H, et al. Isodose mapping of terrestrial gamma radiation dose rate of Selangor state, Kuala Lumpur and Putrajaya, Malaysia. *J Environ Radioact* [Internet]. 2014 [citado 25 Jul 2025];135:67-74. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.04.004>

16. Ludlum Measurements. Ludlum Model 3 Survey Meter: Manual [Internet]. Sweetwater (TX): Ludlum Measurements, Inc.; 2016.
17. Ludlum Measurements. Model 3003 and 3003i Multi-Detector Survey Meter / SCA: User's Manual [Internet]. Sweetwater (TX): Ludlum Measurements, Inc.; 2025.
18. Sadhu V, Zhao X, Pompili D. Energy-efficient analog sensing for large-scale and high-density persistent wireless monitoring. *IEEE Internet Things J* [Internet]. 2020 [citado 21 Ago 2025];7(8):6778-6786. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2984484>
19. Canellas R, Digumarthy S, Tabari A, Otrakji A, McDermott S, Flores EJ, et al. Radiation dose reduction in chest dual-energy computed tomography: Effect on image quality and diagnostic information. *Radiol Bras* [Internet]. 2018 [citado 11 Sep 2025];51(6):377-84. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/0100-3984.2017.0136>
20. Miller M, Voutchkov M. Evaluation of gamma activities of naturally occurring radioactive materials in uncontaminated surface soils of Jamaica. *J Radioanal Nucl Chem* [Internet]. 2014 [citado 11 Sep 2025];300(1):303-13. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3000-x>
21. Ludlum Measurements. Ludlum model 44-2 gamma scintillator [Manual]. Sweetwater (TX): Ludlum Measurements, Inc.; 2022.
22. Ludlum Measurements. Ludlum model 44-10 gamma scintillator [Manual]. Sweetwater (TX): Ludlum Measurements, Inc.; 2015.
23. Vukanac I, Đurašević M, Nikolić JK, Pantelić G, Rajačić M, Janković M, et al. Preparation and validation of laboratory radioactive standards for experimental calibration in gamma ray spectrometry. *Radiat Phys Chem* [Internet]. 2021 [citado 17 Ago 2025];183:1-7. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109407>
24. Martin L, Duval M, Arnold LJ. To what extent do field conditions affect gamma dose rate determination using portable gamma spectrometry. *Radiat Phys Chem* [Internet]. 2023 [citado 17 Ago 2025];216:1-13. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111365>
25. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3 (GSR Part 3). Vienna: IAEA; 2014.
26. Okoye K, Hosseini S. Test of Normality and Reliability of Data. En: *R Programming: Statistical Data Analysis in Research* [Internet]. Singapore: Springer Nature Singapore; 2024 [citado 25 Jul 2025]. p. 67-85. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-981-97-3385-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-97-3385-9_3)
27. Pedrosa I, Juarros-Basterretxea J, Robles-Fernández A, Basteiro J, García-Cueto E. Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas. *Univ Psychol* [Internet]. 2014 [citado 25 Jul 2025];14(1):245-254. Disponible en: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.upsy14-1.pbad>
28. Alberto R, Turcios S. Prueba de Wilcoxon-Mann-Whitney: mitos y realidades. *Rev Mex Endocrinol Metab Nutr* [Internet]. 2015 [citado 21 Ago 2025];2:18-21. Disponible en: <http://www.endocrinologia.org.mx>
29. Winter JCF, Gosling SD, Potter J. Comparing the pearson and spearman correlation coefficients across distributions and sample sizes: A tutorial using simulations and empirical data. *Psychol Methods* [Internet]. 2016 [citado 21 Ago 2025];21(3):273-290. Disponible en: <https://doi.org/10.1037/met0000079>