

Marianni Alejandra Rodriguez-Acasio

<https://doi.org/10.35381/i.p.v6i11.4147>

Evaluación de trazas nucleares de partículas alfa en muestras de cerámica tipo caico

Evaluation of nuclear trace alpha particles in kaico ceramic samples

Marianni Alejandra Rodriguez-Acasio
marianni.rodriquez@correo.unefm.edu.ve
Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Santa Ana de Coro, Falcón
Venezuela
<https://orcid.org/0009-0008-8712-5696>

Recepción: 10 de marzo 2024
Revisado: 15 de mayo 2024
Aprobación: 15 de junio 2024
Publicado: 01 de julio 2024

Marianni Alejandra Rodriguez-Acasio

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de las densidades de trazas nucleares producidas por la emisión alfa en muestras de cerámica tipo caico en el interior de la cámara de difusión. La investigación es de tipo descriptiva, de campo y no experimental. El muestreo fue no probabilístico e intencional con doce muestras de cerámica tipo caico de diversos modelos. Se aplicó un método integrado de detectores sólidos de trazas nucleares del tipo LR115, tratados químicamente para determinar, con la ayuda de un microscopio óptico, la cantidad de trazas impactadas en la película. Se obtuvo que los valores de densidad de trazas nucleares se encuentran entre 5.59Traz.cm^{-2} y 1.35Traz.cm^{-2} . Es por ello por lo que, es significativo estar al tanto de cuáles materiales de construcción podrían causar un aumento de la concentración de Radón en interiores, y de ser necesario limitar su uso.

Descriptores: Física nuclear; ingeniería; trazas nucleares. (Tesauro UNESCO).

ABSTRACT

The present research work aims to evaluate the effect of nuclear trace densities produced by alpha emission on samples of caico-type ceramics inside the diffusion chamber. The research is descriptive, field and non-experimental. The sampling was non-probabilistic and intentional with twelve samples of caico type ceramics of different models. An integrated method of solid detectors of nuclear traces of the LR115 type, chemically treated, was applied to determine, with the aid of an optical microscope, the quantity of traces impacted on the film. It was obtained that the nuclear trace density values are between 5.59Traz.cm^{-2} and 1.35Traz.cm^{-2} . Therefore, it is important to be aware of which building materials could cause an increase in indoor radon concentration, and if necessary limit their use.

Descriptors: Nuclear physics; engineering; nuclear traces. (UNESCO Thesaurus).

Marianni Alejandra Rodriguez-Acasio

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, ha habido una especial sensibilización hacia la inocuidad de los materiales empleados en la construcción de viviendas en Venezuela, con el fin de preservar un equilibrio energético y durabilidad de la obra civil. El problema de la radiación por emisión alfa, núcleos de Helio con poco poder de penetración y gran capacidad ionizante, producto del contenido de radio en los materiales de construcción, salió a la luz por primera vez a finales de los años setenta, luego que un informe del Instituto Nacional Sueco de la Protección Radiológica revelara la existencia de concentraciones elevadas de este radioisótopo en algunos edificios (Barrios y Falcón, 2019).

En este sentido, al hablar de radiación, las personas suelen asociarla a las actividades en centrales nucleares o a unidades de radiodiagnóstico en centros médicos. Aunque es razonable pensar de ese modo, es necesario señalar que este tipo de fuentes de radiación ionizante artificial es generado por pequeños aceleradores de partículas, que permiten excitar el núcleo del átomo y a su vez liberar electrones a través de la ionización. Al respecto Medina y Reyes (2002) indican que “se considera en promedio solo un 30% de la dosis de radiación recibida por la población, siendo las fuentes naturales las que aportan un mayor porcentaje sobre la emanación de radioisótopos en las viviendas” (p.36). Por ello se afirma que la radiación ionizante no es más que un tipo de energía liberada por los átomos en forma de ondas electromagnéticas o partículas.

En efecto, se afirma que los materiales de construcción son una fuente significativa de exposición a la radiación natural. Tanto así, que López et al. (2014) señalan que “el conocimiento de los parámetros radiológicos y la composición radiactiva de estos materiales es fundamental para realizar cálculos precisos de la dosis efectiva a la que está expuesta la población” (p. 44). De acuerdo con la idea antecesora, es evidente que se requieren un conjunto de conocimientos profundos acerca de las características radiológicas y la composición radiactiva de los materiales de construcción.

Marianni Alejandra Rodriguez-Acasio

De lo anterior se desprende que la tasa de dosis efectiva proveniente de materiales de construcción como el cemento, el ladrillo, la arcilla y las rocas graníticas pueden alcanzar valores considerables, situándose entre 20 y 190 nGy/h. Esta variabilidad se atribuye a la composición radiológica de dichos materiales y a las condiciones geológicas locales. Es relevante destacar que esta contribución puede representar hasta un cuarto de la dosis efectiva anual proveniente de fuentes naturales de radiación (Miró et al., 2010).

Además de los materiales aplicados a las estructuras de una construcción, materiales usados para la decoración de interiores de viviendas, como lo son los materiales cerámicos, específicamente el caico (objeto de análisis en esta investigación) pueden ser considerados como posibles fuentes de radiactividad en interiores de las mencionadas estructuras o edificaciones donde son empleados.

Por lo tanto, la presencia de sales de uranio en materiales cerámicos utilizados en la decoración interior puede aumentar significativamente la actividad específica de estos materiales, convirtiéndolos en una fuente adicional de radiación en ambientes cerrados. Es de hacer resaltar que el caico es un material de revestimiento para interiores y exteriores de piso o suelo, dependiendo de su instalación el diseño de cada obra; a saber: casas, villas, *townhouses*, centros comerciales, conjuntos residenciales y otras sin importar su ubicación o zona geográfica: campo, montaña o ciudad (Muñoz y Castillo, 2014).

Ahora bien, la arcilla, materia prima fundamental en la industria cerámica, incluyendo la fabricación de caico, puede presentar elevados contenidos de uranio-238. Este radionúclido, con una vida media de 4.500 millones de años, se desintegra emitiendo partículas alfa, dando lugar a la formación de torio-234 y, posteriormente, de radio. En los materiales de construcción se lleva a cabo “de manera permanente la emisión de una partícula alfa con características fundamentales como (dos protones y dos neutrones); la emisión de radiación tipo alfa ocurre generalmente en átomos de elementos, tales como el uranio y el torio” (Núñez, 2011, p. 59).

Marianni Alejandra Rodríguez-Acasio

Estos elementos antes mencionados, también emisoras de partículas alfa, que se adhieren a partículas de aerosoles, son inhaladas por los seres vivos, en concentraciones que si son mayores a los niveles recomendados, pueden resultar riesgosas en lugares poco ventilados o cerrados, incorporándolos a través de las vías respiratorias. Si un emisor alfa es inhalado, ingerido o entra en el organismo a través de la sangre puede ser muy nocivo, debido a que los tejidos vivos sensibles pueden estar expuestos a la radiación alfa.

Se debe enfatizar que, de acuerdo con Medina y Reyes (2002) "las partículas cargadas, al penetrar en un material, ionizan los átomos que encuentran a su paso, generando daños en la estructura cristalina. Estos daños se manifiestan como pequeñas huellas o "trazas" que son permanentes bajo condiciones normales" (p. 35). Así pues, se deduce que la densidad de estas trazas es proporcional a la cantidad de partículas que han atravesado el material, lo que permite estimar la concentración inicial de radionucleidos y, por tanto, la edad de la muestra.

Es por ello por lo que, los detectores que permiten observar las trazas o huellas que deja a su paso una partícula de origen nuclear son los llamados detectores de trazas. Entre estos destacan los detectores de trazas nucleares de estado sólido (*SSNTD, Solid Sensor Nuclear Track Detector*). Estos dispositivos detectan las partículas cargadas (alfas, iones, fragmentos de fisión, etc.). En este sentido, la cámara de difusión es un dispositivo único para la visualización de estas trazas, y la identificación de estas a partir de las diferencias en su longitud y espesor (densidad de ionización) (Manzaneda et al., 2018).

En Venezuela, concretamente en el Estado Falcón, es muy común el uso de cerámica tipo caico, ya sea como acabado en piso, caminerías, pasillos, salones, encimeras, paredes, fachadas y en tantas otras edificaciones. Sin embargo, no se toman en cuenta los criterios de control que permitan estar al tanto de la concentración de agentes radiactivos en los materiales utilizados al momento de ejecutar la construcción de una

Marianni Alejandra Rodríguez-Acasio

obra. Dado que se desconoce el efecto exacto de la cámara de difusión en las cerámicas tipo Caico, se propone como objetivo principal de esta investigación: Realizar un estudio detallado para cuantificar las alteraciones en las densidades de trazas nucleares producidas por partículas alfa.

MÉTODO

La diversidad de paradigmas investigativos refleja la complejidad de los fenómenos estudiados, de ahí que la selección de un diseño de investigación específico requiere el análisis detallado de la pregunta de investigación y las características del objeto de estudio (Ricoy, 2006). En tal sentido en este apartado se describen los siguientes aspectos: tipo y diseño de la investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos, técnicas de procedimiento y análisis de datos, así como el procedimiento desarrollado para dar cumplimiento a cabalidad a los objetivos del estudio. Por tanto, el tipo de investigación acorde al problema propuesto es de carácter descriptivo, “el cual consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento” (Arias, 2006, p. 26). Todo esto en consonancia con el objetivo de evaluar el efecto que se produce en el interior de la cámara de difusión a partir de muestras de cerámicas tipo caico en cuanto a sus densidades de trazas nucleares de partículas alfa.

De igual forma al analizar los criterios de la investigación podemos deducir que se apoyó en una investigación de campo, ya según Arias (2006) “consiste en la recolección de datos directamente de los sujetos investigados, o de la realidad donde ocurren los hechos (datos primarios), sin manipular o controlar variable alguna” (p. 31), es decir, el investigador obtiene la información pero no altera las condiciones existentes. De allí su carácter de investigación no experimental. Si bien la investigación de campo se fundamenta en una sólida base teórica, construida a partir de datos secundarios provenientes de fuentes bibliográficas, son los datos primarios, obtenidos directamente

Marianni Alejandra Rodriguez-Acasio

en el campo, los que proporcionan la evidencia empírica necesaria para responder a las preguntas de investigación y alcanzar los objetivos planteados.

El diseño de investigación del presente estudio es no experimental, asumiendo lo señalado Hernández et al. (2014) “es la que se realiza sin manipular deliberadamente variables” (p.184); y en la que solo se observan los fenómenos en su ambiente natural, para después analizarlos.

Con relación a la población objeto de estudio puede definirse como el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones, donde la totalidad del fenómeno a estudiar posee una característica común que se estudia y da origen a los datos de la misma y puede estar incluida en otra, denominada muestra; es decir, una población incluida en otra que refleja las características que definen la población de la cual fue extraída, indicando que es representativa (Arias et al., 2016). En este caso la población abarca a las 12 muestras de cerámicas tipo caico que se sometieron a análisis. Es por ello que se elaboraron 12 cámaras de difusión con el propósito de una simulación óptima de captura de la mayor parte de átomos, permitiendo así obtener las características del material al momento de determinar la concentración en la que se encuentran los radioisótopos presentes en las muestras.

En cuanto a las técnicas, estas son aquellas que conducen a la obtención de información, la cual debe ser guardada en un medio material de manera que los datos puedan ser recuperados, procesados, analizados e interpretados posteriormente. Por otro lado, los instrumentos de recolección de información son, en principio, cualquier recurso del cual se vale el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información. (Tamayo, 2003).

Vale subrayar que la radiación ionizante en general no es perceptible por los sentidos, es necesario valerse de instrumentos apropiados para detectar su presencia. Así mismo, su intensidad, su energía, o cualquier otra propiedad que ayude a evaluar sus efectos. Por lo que para la ejecución de este proyecto de investigación se utilizaron detectores LR-

Marianni Alejandra Rodriguez-Acasio

115 (celulosa nitrada), colocados dentro de una cámara de difusión (envases plásticos) para la detección de partículas α provenientes de la desintegración de la llamada serie del radio. (Figura1).

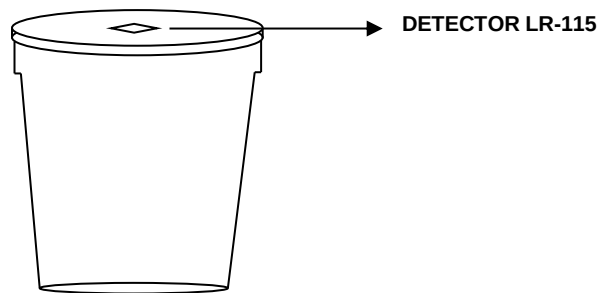


Figura 1. Cámara de Difusión.

Elaboración: Los autores.

Una vez descritos los elementos anteriores se traen a colación las fases empleadas para dar cumplimiento a los objetivos planteados:

Fase I: Caracterizar los parámetros dinámicos del contenido de Radio ^{226}Ra que se genera en la estructura molecular de las cerámicas tipo caico.

Se empleó un método integrado detectores de trazas dentro de cámaras de difusión a través de la recolección de partículas suspendidas en el interior de un envase para con dichas muestras realizar los estudios pertinentes.

Fase II: Establecer el desplazamiento de la emisión alfa del Radio ^{226}Ra en el interior de las cerámicas tipo caico.

El ^{226}Ra al desintegrarse genera ^{222}Rn (Radón) de manera natural desde el interior de la corteza terrestre específicamente en los diferentes volúmenes de rocas que ahí se encuentran, mediante procesos convectivo-difusivo los átomos de radón llevan a cabo un mecanismo de liberación de sus partículas alfa, las cuales se desprenden de estos materiales realizando un desplazamiento vertical hasta llegar a la superficie.

Marianni Alejandra Rodríguez-Acasio

Fase III: Determinar el flujo de trazas nucleares con respecto a la resistencia de adhesión a pisos y paredes en las viviendas de las cerámicas de caico.

Las muestras fueron llevadas al laboratorio de análisis químico para el proceso de revelado. Los detectores se retiraron de la cámara de difusión y se fijaron en un soporte metálico como un resorte para el grabado en una solución normal de NaOH.

Fase IV: Analizar el efecto en el interior de la cámara de difusión en muestras de cerámicas tipo caico en cuanto a sus densidades de trazas nucleares de partículas alfa. Para la Organización Internacional para la Estandarización, medir las emisiones de Radón en los edificios y residencias, es clave a fin de reducir los niveles de contaminación en ambientes cerrados y evitar el desarrollo de casos de cáncer pulmonar en los habitantes.

RESULTADOS

A continuación, se darán a conocer los resultados obtenidos en la investigación sobre el tratamiento y obtención de las muestras, considerando de manera importante el tiempo de exposición en la cual estuvieron sometidas las cámaras de difusión para llevar a cabo el cumplimiento de las fases de estudio.

La figura 1 y tabla 1 detallan la Ubicación de los Puntos de recolección de las muestras de Cerámica Tipo Caico en San Juan de los Cayos, Municipio Acosta.

Marianni Alejandra Rodriguez-Acasio

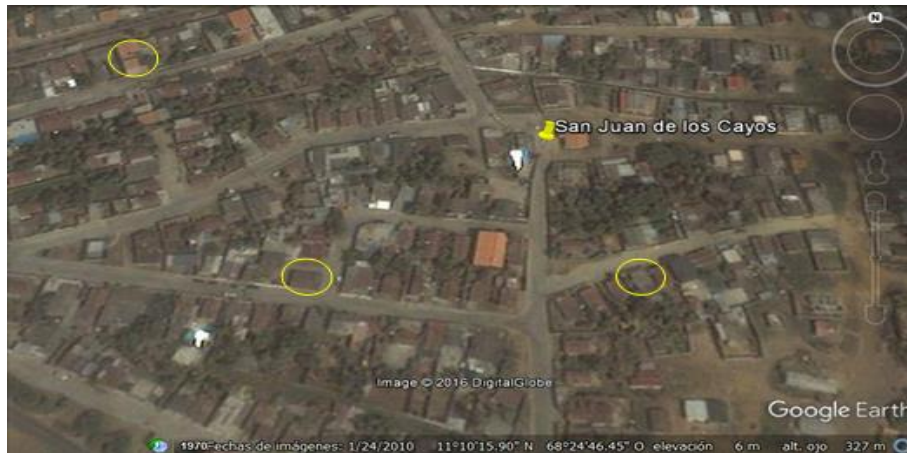


Figura 1. Ubicación de los Puntos de recolección de las muestras de Cerámica Tipo Caico en San Juan de los Cayos, Municipio Acosta.

Elaboración: Los autores.

Tabla 1.

Ubicación de los puntos de recolección de las muestras.

N° de muestra	Punto	Ubicación de la muestra (coordenadas)
1	1	11°10'14.95" N 68°24'48.76" O
2		
3		
4	2	11°10'19.94" N 68°24'52.22" O
5		
6		
7		
8		
9		
10	3	11°10'14.97" N 68°24'43.97" O
11		
12		

Elaboración: Los autores.

Marianni Alejandra Rodriguez-Acasio

A continuación, en la tabla 2, se presentan las alturas y masa de las muestras de cerámica tipo caico de acuerdo con las ubicaciones presentadas en la figura anterior. Además, se especifica la altura entre el detector y la muestra, la cual se expresa en milímetros y por último se ilustra el tipo de muestra a través de una imagen, todo esto con la finalidad de detallar la información de manera clara y precisa.

Tabla 2.
 Altura y masa de las muestras de cerámica tipo caico.

N° DE DETECTOR	ALTURA DE MUESTRA (MM)	MASA (GR)	ALTURA ENTRE EL DETECTOR Y LA MUESTRA	TIPO DE CERAMICA	MUESTRA
1	83.6	613.70	16.40	Caico Doble Cara 	
2	26.70	217.30	73.30	Caico Rectangular 	
3	35.00	292.70	65.00	Tablilla Blanca tipo Corcho 	
4	13.10	149.70	86.90	Tablilla Terra-gres 	

Marianni Alejandra Rodriguez-Acasio

N° DE DETECTOR	ALTURA DE MUESTRA (MM)	MASA (GR)	ALTURA ENTRE EL DETECTOR Y LA MUESTRA	TIPO DE CERAMICA	MUESTRA
5	34.40	257.20	65.60	Tablilla Blanca Lisa 	
6	34.10	227.90	65.90	Tablilla Rustica 	
7	52.30	448.40	47.70	Caico Tablilla 	
8	61.70	350.90	38.30	Caico Rustico 	
9	49.20	341.60	50.80	Caico Hexagonal 	
10	39.50	209.00	60.50	Caico Sencillo 	

Marianni Alejandra Rodríguez-Acasio

N° DE DETECTOR	ALTURA DE MUESTRA (MM)	MASA (GR)	ALTURA ENTRE EL DETECTOR Y LA MUESTRA	TIPO DE CERAMICA	MUESTRA
11	24.70	176.40	75.30	Tablilla 	
12	16.30	124.50	83.70	Tablilla Terra-gres 	

Elaboración: Los autores.

Cálculo de la densidad de Trazas

La densidad de trazas representa un parámetro dinámico de frontera que se establece para estudiar el comportamiento físico de las partículas alfa; este depende de la sensibilidad de la interacción de intercambio energético entre la partícula y el detector sólido.

En la tabla 3, se muestra la densidad de flujo de trazas generada por cada material expuesto al detector sólido LR-115 en un período de exposición de 20 días.

Marianni Alejandra Rodríguez-Acasio

Tabla 3.
 Cálculo de la densidad de trazas.

N° Detector	Σ Trazas (Traz)	Densidad de trazas (Traz.cm ⁻²)
DTN-1	1259	5.59
DTN-2	895	3.98
DTN-3	330	1.47
DTN-4	487	2.16
DTN-5	627	2.79
DTN-6	450	2.00
DTN-7	303	1.35
DTN-8	619	2.75
DTN-9	524	2.33
DTN-10	610	2.71
DTN-11	340	1.51
DTN-12	503	2.24

Elaboración: Los autores.

Se debe detallar que la densidad de trazas es como una huella digital que cambia constantemente y nos permite estudiar el movimiento y la energía de las partículas alfa al interactuar con un material específico. Por otra parte, se enfatiza que la capacidad de un detector para registrar las partículas alfa y mostrar cuántas hay depende directamente de su sensibilidad a la energía que estas partículas liberan al chocar con él.

Cabe resaltar que para los cálculos, a partir de la ecuación 1 correspondiente a los valores de la tabla 1 se tomó en consideración un campo óptico de 150 y un área del detector de 1.5 cm².

$$\rho = \frac{\Sigma Traz}{A_{LR-115} * n^{\circ}_{optic.}} \quad [1]$$

Determinación de la actividad de escape del gas Radón y Torón.

Marianni Alejandra Rodriguez-Acasio

Al momento de liberarse un átomo de radio, este fluye del medio para generar una actividad radiactiva natural. El mecanismo de liberación del flujo de átomos de radio de los granos del material se establece tomando en consideración la densidad y el tiempo de exposición. En el interior de la cámara los átomos de radio se desintegran formando Radón y Torón. Cabe resaltar que dentro de la cámara de Fick ocurre un intercambio atómico entre las hijas que se generan del elemento padre que es el radio. En la tabla 4 se muestra la actividad de escape del Gas Radón y Torón para cada una de las muestras de Cerámica tipo Caico.

Tabla 4.
Cálculo de la actividad de escape del gas radón y torón.

N° detector	Actividad de escape del gas radón y torón	
	²²² Rn (Bq.m ⁻³)	²²⁰ Rn (Bq.m ⁻³)
DTN-1	19	2.8
DTN-2	14	1.9
DTN-3	5	7
DTN-4	7.7	1.1
DTN-5	9.9	1.4
DTN-6	7	1.0
DTN-7	5	7
DTN-8	9	1.4
DTN-9	8	1.2
DTN-10	9	1.4
DTN-11	5	8
DTN-12	8	1.1

Elaboración: Los autores.

Marianni Alejandra Rodríguez-Acasio

Si bien la densidad y el tiempo de exposición son factores importantes que influyen en la liberación de radio, otros factores como la temperatura, la naturaleza del material y la presencia de defectos cristalinos también juegan un papel crucial. Además, el proceso de intercambio atómico dentro de la cámara de Fick es un fenómeno complejo que involucra múltiples mecanismos, incluyendo la difusión, la recombinación y la adsorción. La actividad de una muestra radiactiva es el número medio de transformaciones nucleares espontáneas que se producen en la muestra en la unidad de tiempo.

Se tomó un factor de sensibilidad de $0.245 \text{ Traz. cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} / \text{Bq. m}^{-3}$ y $0.115 \text{ Traz. cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} / \text{Bq. m}^{-3}$ Para el cálculo de la actividad de escape de radón y torón respectivamente, a través de la ecuación 2 y la ecuación 3.

$$A_{222\text{Rn}} = \frac{\rho}{T_e \cdot K_{222\text{Rn}}} \quad [2]$$

$$A_{220\text{Rn}} = \frac{\rho}{T_e \cdot K_{220\text{Rn}}} \quad [3]$$

Determinación del factor de equilibrio para mitigar la exhalación del ^{222}Rn y ^{220}Rn en interior de viviendas

El radón está sujeto a una permanente desintegración que da lugar a los llamados descendientes (progenie) del radón. Los descendientes tienen una vida corta y se desintegran hasta dar lugar a un isótopo de plomo de vida larga. El factor de equilibrio establece las condiciones geodinámicas de las partículas alfa para generar sus hijas radioactivas en el interior de la cámara de difusión producto del intercambio de potencial con el flujo que se genera de manera caótica.

Este factor no es más que la relación entre la concentración de descendientes del radón equivalente en equilibrio y la concentración de gas radón y se emplea para describir la razón entre el radón y sus descendientes. Se ha calculado el factor de equilibrio para mitigar la exhalación del ^{222}Rn y ^{220}Rn en interior de viviendas expresado en la tabla 5 a partir de las Ecuaciones 4 y 5.

Marianni Alejandra Rodriguez-Acasio

$$F_{eq222Rn} = \frac{E_{PAEC\ 222Rn}}{5.57 \cdot 10^{-9} \cdot A_{222Rn}} \quad [4]$$

$$F_{eq222Rn} = \frac{E_{PAEC\ 220Rn}}{5.57 \cdot 10^{-9} \cdot A_{220Rn}} \quad [5]$$

E_{PAEC} -Energía potencial alfa de las partículas (1Bq): La concentración de energía potencial alfa de una mezcla de hijos de vida corta del radón, en aire, es la suma de las energías potencial alfa de estos átomos presentes en la unidad de volumen de aire.

Tabla 5.

Cálculo del factor de equilibrio para mitigar la exhalación del ^{222}Rn y ^{220}Rn en el interior de viviendas.

N° detector	Factor de equilibrio para mitigar la exhalación de ^{222}Rn y ^{220}Rn	
	^{222}Rn (MBq.m ⁻³)	^{220}Rn (MBq.m ⁻³)
DTN-1	944	641
DTN-2	1282	944
DTN-3	3590	2564
DTN-4	233	1632
DTN-5	181	1282
DTN-6	2564	1795
DTN-7	3590	2564
DTN-8	1994	1282
DTN-9	2244	1496
DTN-10	1994	1282
DTN-11	3590	2244
DTN-12	2244	1632

Elaboración: Los autores.

Cálculo de la exhalación del ^{222}Rn y ^{220}Rn en pisos y paredes

Los materiales de construcción de paredes, techos y pisos de una vivienda generalmente contienen los mismos radionúclidos naturales que los que forman la corteza terrestre (rocas y suelos). La presencia de radio en los materiales de construcción ocasiona un flujo de radón (exhalación) que contribuye en proporciones diversas, a la concentración total del mismo en el interior de las edificaciones (Muciño, 2009). En líneas generales, el material de construcción no es homogéneo, sino que puede tener espacios llenos de aire

Marianni Alejandra Rodriguez-Acasio

(poros), hay que considerar además del transporte por difusión, los movimientos convectivos en el aire atrapado en los huecos existentes.

El radón por ser un gas emigra desde sus lugares de origen a través de esos espacios vacíos, donde puede alcanzar concentraciones relativamente altas. En esa migración termina por llegar a la superficie terrestre, y escaparse a la atmósfera circundante donde se dispersa (Ruiz y Reyna, 2005).

Con frecuencia, cuando mayor es la concentración de ^{226}Ra , mayor es el flujo de Radón. Sin embargo, el contenido de ^{226}Ra no basta por sí mismo para predecir la contribución de un material dado a la concentración de radón en la atmósfera de una edificación, debido a que, por una parte, la exhalación por unidad de concentración de ^{226}Ra puede variar en más de un orden de magnitud, de uno a otro material con igual concentración de ^{226}Ra .

En la tabla 6, se muestran los valores de exhalación de Radón y Torón en pisos y paredes calculados a través de la ecuación 6 y 7, respectivamente.

$$E_{222\text{Rn}} = \frac{A_{222\text{Rn}} * V * \lambda_{222\text{Rn}}}{A \left[T + \frac{1}{\lambda_{222\text{Rn}}} (e^{-\lambda T} - 1) \right]} \quad [6]$$

V =Volumen envase o cámara de difusión ($13.73 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$)

A =Área de la tapa de la cámara ($6.25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$)

$\lambda_{222\text{Rn}} = 2.0984 \cdot 10^{-6} \text{ S}^{-1}$

$T = 3.82 \text{ días}$

$$E_{220\text{Rn}} = \frac{A_{220\text{Rn}} * V * \lambda_{220\text{Rn}}}{A \left[T + \frac{1}{\lambda_{220\text{Rn}}} (e^{-\lambda T} - 1) \right]} \quad (7)$$

V =Volumen envase o cámara de difusión ($13.73 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$)

A =Área de la tapa de la cámara ($6.25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$)

$\lambda_{222\text{Rn}} = 1.242 \cdot 10^{-2} \text{ S}^{-1}$

$T = 55 \text{ seg}$

Marianni Alejandra Rodriguez-Acasio

Estos resultados muestran resultados interesantes en cuanto a la cantidad de disipación de energía potencial alfa capaz de interactuar con las progenies del radón y torón que se producen desde las cerámicas a partir del medio intergranular atómico de las piezas que se estudiaron para esta investigación.

Tabla 6.

Calculo de la exhalación del ^{222}Rn y ^{220}Rn en pisos y paredes.

N° Detector	EXHALACION DE ^{222}Rn Y ^{220}Rn	
	^{222}Rn (mBq.m ⁻³)	^{220}Rn (mBq.m ⁻³)
DTN-1	5.72	50.4
DTN-2	4.21	15.7
DTN-3	1.51	12.6
DTN-4	23.18	19.8
DTN-5	29.80	25.2
DTN-6	2.11	18.0
DTN-7	1.51	12.6
DTN-8	2.71	23.2
DTN-9	2.41	21.6
DTN-10	0.00414	15.7
DTN-11	1.51	14.4
DTN-12	2.41	19.8

Elaboración: Los autores.

Es importante señalar que los cálculos que se especifican de emanación y exhalación son fundamentales, ya que se evidencia el comportamiento físico de la estructura molecular de los diferentes agregados que se emplearon para la fabricación de las cerámicas, por su grado de emanación que presentó al momento de estar sometido a la cámara de difusión alfa. Mientras que, en un período de 30 días, las partículas alfa a través de un mecanismo de transporte de liberación por retroceso de su momentum, se desplazan desde su fuente hasta la superficie para exhalar e interactuar con las progenies que se producen debido a la semi-desintegración radioactiva de los isotopos presentes en las muestras de cerámicas estudiadas.

Marianni Alejandra Rodríguez-Acasio

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la densidad de trazas nucleares es un parámetro sensible para evaluar la exposición de las muestras cerámicas a la radiación alfa. Sin embargo, se requieren estudios adicionales para investigar el efecto de otros factores, como la composición mineralógica de las muestras y las condiciones ambientales, en la formación y estabilidad de las trazas. Estos resultados abren nuevas perspectivas para la aplicación de esta técnica en el estudio de materiales arqueológicos y geológicos. Por tanto, el análisis de las trazas nucleares en las muestras cerámicas ha permitido cuantificar la actividad del radón como trazador energético. La muestra Caico doble Cara (N.º 1) presentó la mayor densidad de trazas, indicando una mayor exposición a la radiación alfa. Estos resultados sugieren que la densidad de trazas es un parámetro eficaz para evaluar la intensidad y distribución de la radiación en este tipo de muestras.

El estudio ha demostrado que la actividad radioactiva natural proveniente de los materiales de construcción evaluados, en particular las cerámicas tipo Caico, no excede los niveles considerados seguros para la salud. Los valores de exhalación de radón y torón obtenidos se encuentran dentro de los rangos esperados para materiales de construcción y no representan un peligro para la población expuesta.

FINANCIAMIENTO

No monetario.

AGRADECIMIENTO

A todos los actores sociales involucrados en el desarrollo de la investigación.

Marianni Alejandra Rodríguez-Acasio

REFERENCIAS CONSULTADAS

- Árias, F. (2012). El Proyecto de Investigación. [The Research Project]. Caracas, Venezuela: Editorial Episteme. <https://acortar.link/rOrlWA>
- Arias, J., Villasís, M., y Miranda, M. (2016). El protocolo de investigación III: la población de estudio. [Research protocol III: the study population]. *Revista Alergia México*, 63(2), 201-206. <https://n9.cl/ajkbs>
- Barrios, N., y Falcón, N. (2019). Nota técnica: análisis exploratorio de la actividad radiactiva en las Galeras de El Baúl (Estado Cojedes–Venezuela). [Tech note: exploratory analysis of the radioactive activity in the El Baúl Massif (Cojedes State-Venezuela)]. *Revista INGENIERÍA UC*, 26(2), 233-238. <https://n9.cl/djz0k5>
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2014). Metodología de la Investigación [Investigation Methodology] (6ta. ed.). México: McGraw-Hill. <https://n9.cl/t6q8vh>
- López, D., Tarifa, L., y Machado, I. (2014). Evaluación de la calidad en la construcción de viviendas en Matanzas [Quality evaluation in housing construction in Matanzas]. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 8(2), 1-50. <https://n9.cl/8na6d>
- Manzaneda, A., Calle, C., y Monasterios., M. (2018). Construcción de una cámara de niebla de difusión para la identificación de diferentes partículas cósmicas. [Construction of a diffusion cloud chamber for the identification of different cosmic particles]. *Revista Boliviana de Física*, 32(32), 25-28. <https://n9.cl/jtu44>
- Medina, S., y Reyes, P. (2002). Radiaciones ionizantes y efectos sobre la materia. [Ionizing radiation and effects on matter. New Granada Science and Engineering]. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, (12), 31-39. <https://n9.cl/shyfp>
- Miró, C., Ávila, J., García, M., y Pastor, J. (2010). Riesgos Debido a la Radiactividad Natural de Pizarras de Construcción. [Risks Due to Natural Radioactivity of Construction Slates]. *Información tecnológica*, 21(1), 9-16. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642010000100003>
- Muciño, A., (2009). Concreto Nanotecnológico. [Nanotechnological Concrete]. *Razón y Palabra*, (68). <https://n9.cl/ioytcn>

Marianni Alejandra Rodriguez-Acasio

- Muñoz, E., y Castillo, M. (2014). Luminiscencia Ópticamente Estimulada aplicada a sedimentos fluviales: Un enfoque basado en la interpretación de las señales luminosas. [Optically Stimulated Luminescence applied to river sediments: An approach based on the interpretation of light signals]. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 225-233. <https://n9.cl/c3p5ul>
- Núñez, R. (2011). La radioactividad ambiental [Environmental radioactivity]. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 2(2), 50-61. <https://n9.cl/k8vrg>
- Ricoy, C. (2006). Contribución sobre los paradigmas de investigación. [Contribution on research paradigms] *Educação. Revista do Centro de Educação*, 31(1), 11-22. <https://n9.cl/9cu2h>
- Ruiz, N., y Reyna, M. (2005). Detección de gas radón (Rn) intradomiciliario en 25 hogares de Mexicali, BC usando pruebas cortas. [Detection of indoor radon (Rn) gas in 25 homes in Mexicali, BC using short tests] *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, XXVI(2), 86-91. <https://n9.cl/743xn>
- Tamayo, M. (2003). El proceso de la investigación científica. [The process of scientific investigation]. (4ta Ed.). México: Limusa. <https://n9.cl/nlrqb>