

# Radiación natural dentro de la Cueva del Tigre de Yaguará, Huila, Colombia

*Natural radiation inside Cueva del Tigre, Yaguará, Huila, Colombia*

Sonia Salazar<sup>1,4</sup>, Arturo Argüelles<sup>2,4</sup>, Gustavo Garzón<sup>3,4</sup>, Luisa Fernanda Meza<sup>3</sup>

Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, 4, 16-30, 2020  
**Recibido:** 3 de febrero de 2020  
**Aceptado:** 27 de junio de 2020  
**Publicado en línea:** 14 de octubre de 2020  
**Doi:** <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.4.2020.560>



Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento 4.0.

**Citación:** S. Salazar, A. Argüelles, G. Garzón y L. F. Meza, “Radiación natural dentro de la cueva del Tigre de Yaguará, Huila, Colombia”, *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.º 4, pp. 16-30, 2020. <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.4.2020.560>

## Resumen

Se investigó el grado de exposición a la radiación natural al cual se someten los turistas y guías turísticos durante su tiempo de permanencia dentro de la cueva del Tigre del municipio de Yaguará, en el departamento del Huila. Fueron estimadas las dosis efectivas anuales para probables escenarios de visitas esporádicas a la cueva y para casos de permanencia de cien horas anuales dentro de una galería central, y se observó que exposiciones superiores a cien horas anuales pueden superar potencialmente los límites recomendados por la normativa nacional e internacional. Se adelantaron extensos trabajos de campo en octubre de 2017 y febrero de 2018, considerando en detalle, primero, algunos aspectos morfológicos que definen las posibilidades de ventilación subterránea; segundo, aspectos microclimáticos, como la humedad relativa y las temperaturas del aire interno, que son afectadas por propiedades del subsuelo, como la porosidad, la permeabilidad y el fallamiento geológico activo, y tercero, los niveles de gas radón y su estado de equilibrio con sus isótopos descendientes de corta vida, generadores de partículas alfa, y principales responsables de las dosis efectivas de radiación ionizante.

**Palabras clave:** Radón, cueva, Huila, radiactividad, turismo.

## Abstract

In the present work, the degree to which tourists and tour guides are subjected to exposure to natural radiation during their time within Cueva del Tigre in the municipality of Yaguará and the department of Huila was investigated. Extensive field work was performed in October 2017

<sup>1</sup> Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, MinCiencias, Bogotá, Colombia.

<sup>2</sup> Universidad Santiago de Cali, sede de Pampa Linda, Cali, Colombia.

<sup>3</sup> Servicio Geológico Colombiano, Dirección Técnica de Laboratorios, Cali y Popayán, Colombia.

<sup>4</sup> Centro de Aplicaciones Físicoquímicas en el Entorno, Grupo de Investigación FISQUIM, Cali, Colombia.

Email de correspondencia: [ggarzon@sgc.gov.co](mailto:ggarzon@sgc.gov.co)

and February 2018 to examine in detail numerous considerations: first, certain morphological aspects that define the possibilities for underground ventilation; second, microclimatic aspects such as relative humidity and indoor air temperatures, which are affected by subsoil properties such as porosity, permeability and active geological faulting; and third, levels of radon gas and its state of equilibrium with its short-lived descendants, which are generators of alpha particles and are therefore mainly responsible for the effective doses of ionizing radiation. Annual doses were estimated for probable scenarios of sporadic visits to the cave and longer stays within the cave. It was observed that stays of more than 100 hours per year in a central gallery could potentially exceed the limits recommended by national and international regulations.

**Keywords:** Radon, cave, Huila, radioactivity, tourism.

*El veneno está en la dosis.* Hipócrates (460-371 a.C.)

*La dosis hace al veneno o al remedio.* Paracelso (1493-1541)

## 1. Introducción

**E**n el planeta Tierra estamos constantemente expuestos al fenómeno natural de la radiación energética o propagación natural de las ondas electromagnéticas y de las partículas subatómicas a través de medios acuosos o aéreos. En ambientes subterráneos, las exposiciones más comunes son la radiación térmica transmitida por el flujo de fluidos a través de zonas fracturadas de las rocas, y la radiación ionizante producida por los materiales radiactivos constituyentes de los minerales en las rocas o transportados por el flujo de fluidos subterráneos.

Para investigar la radiación térmica subterránea, las principales variables que deben considerarse son los factores estructurales, morfológicos, la humedad relativa y las temperaturas, mientras que para investigar la radiación ionizante, el principal factor es el nivel de gas radón y su estado de equilibrio radiactivo con sus descendientes naturales de corta duración.

El elemento químico radón (*Rn*) es un gas monoatómico noble, sin color, ni olor ni sabor. Su radio atómico es menor que el del elemento químico xenón (*Xe*), debido a la influencia del nivel electrónico  $4f^{14}$  de los lantánidos. El radón es un gas poco soluble en el agua, que se absorbe muy bien en la superficie del carbón activado y en la sílica gel. Tiene tres isótopos naturales inestables: el radón ( $^{222}_{86}\text{Rn}$ ), el torón ( $^{220}_{86}\text{Rn}$ ) y el actinón ( $^{219}_{86}\text{Rn}$ ), que se desintegran por mecanismo *alfa*, con vidas medias de 3,82 d, 55,6 s y 3,96 s (tabla 1), en

las series de decaimiento del  $^{238}_{92}\text{U}$ ,  $^{232}_{90}\text{Th}$  y  $^{235}_{92}\text{U}$ , respectivamente [1].

Los isótopos  $^{222}_{86}\text{Rn}$ ,  $^{220}_{86}\text{Rn}$  y  $^{219}_{86}\text{Rn}$ , al igual que todos los productos de las series de decaimiento del  $^{238}_{92}\text{U}$ ,  $^{232}_{90}\text{Th}$  y  $^{235}_{92}\text{U}$ , están contenidos en variadas proporciones en la mayoría de las mineralizaciones y rocas, y por tanto están ampliamente distribuidos en toda la corteza terrestre. Por su mayor contenido en la naturaleza con respecto al  $^{220}_{86}\text{Rn}$  y  $^{219}_{86}\text{Rn}$ , el  $^{222}_{86}\text{Rn}$  es ampliamente utilizado en la prospección del  $^{238}_{92}\text{U}$  [2], y también sirve de trazador de flujos atmosféricos [3] y es una herramienta científica empleada como precursora de eventos geodinámicos, incluidos los eventos sísmicos de naturaleza tectónica [4]. Como muchos materiales terrestres, el  $^{222}_{86}\text{Rn}$  presenta propiedades horméticas [5], de acuerdo con las cuales, dependiendo de las dosis de asimilación en el cuerpo humano, puede tener efectos adversos o medicinales. Algunas propiedades radiactivas de los isótopos descendientes de corta duración del radón (*Rn*) se muestran en la tabla 2.

Se conocen reportes de su efecto cancerígeno, sobre todo cuando la exposición a altos niveles se realiza por períodos medidos en años [6]. El efecto adverso mejor documentado es el cáncer de pulmón, que ha sido detalladamente estudiado en mineros que laboran en ambientes subterráneos, casos en que se ha demostrado que el período de latencia o intervalo de tiempo entre el estímulo y la respuesta ha sido, como mínimo, de cinco años [7], [8]. Sin embargo, entre los efectos positivos del  $^{222}_{86}\text{Rn}$  se cita su uso medicinal, y como tal es empleado en Europa y Asia desde

tiempos remotos, en el tratamiento de enfermedades articulares y respiratorias [9].

Se presenta una detallada descripción subterránea de la cueva del Tigre, con discusiones de fenómenos de transferencia de calor y niveles promediados del isótopo gaseoso  $^{222}_{86}Rn$  en cada galería. Al final se presenta un panorama de dosis efectivas de radiación ionizante para probables escenarios de tiempo de permanencia dentro de la cueva.

Tabla 1. Propiedades radiactivas de los isótopos naturales del radón ( $Rn$ ) [1]

Isótopo	Desde	Hasta	Vida media	Energía (MeV)	Serie
$^{222}_{86}Rn$	$^{222}_{88}Ra$	$^{218}_{84}Po$	3,82 días	5,49	$^{238}_{92}U$
$^{220}_{86}Rn$	$^{224}_{88}Ra$	$^{216}_{84}Po$	55,6 segundos	6,28	$^{232}_{90}Th$
$^{218}_{86}Rn$	$^{223}_{88}Ra$	$^{215}_{84}Po$	3,96 segundos	6,82	$^{235}_{92}U$

Tabla 2. Cadena de decaimiento radiactivo del radón (simplificada) [1]

Isótopo	Vida media	Mecanismo	Energía (MeV)
$^{222}_{86}Rn$	3,82 días	Alfa	5,49
$^{218}_{84}Po$	3,11 minutos	Alfa	6,12
$^{214}_{82}Pb$	26,8 minutos	Beta	1,02
$^{214}_{83}Bi$	19,9 minutos	Beta	3,27
$^{214}_{84}Po$	0,16 milisegundos	Alfa	7,83

$^{222}_{86}Rn \xrightarrow{\alpha} ^{218}_{84}Po \xrightarrow{\alpha} ^{214}_{82}Pb \xrightarrow{\beta} ^{214}_{83}Bi \xrightarrow{\beta} ^{214}_{84}Po$

## 2. Regulaciones del radón

Una vez demostrados los efectos negativos que la exposición permanente en términos de años a altas dosis de  $^{222}_{86}Rn$  tiene en la salud humana, y conocida la vulnerabilidad de muchos ciudadanos dentro de sus viviendas y sitios de trabajo, y especialmente de los mineros en sus lugares de trabajo, diversas agencias de protección de la salud pública y ministerios de salud han gestionado la adopción de regulaciones nacionales, que no siempre coinciden de país a país.

En EE. UU., por intermedio de la Agencia de Protección Medioambiental (EPA) [10], fueron establecidos niveles máximos de  $148 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  de radón en viviendas, escuelas y lugares de trabajo. En Europa, la Directiva 2013/59/Euratom, al igual que la Organización Mundial de la Salud (OMS), establecieron un límite de  $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ , tanto para viviendas como para lugares de trabajo [11].

En Colombia, el Ministerio de Minas y Energía expidió la Resolución 18-1434 en 2002, mediante la cual se estableció “una dosis anual efectiva que no debe exceder  $20 \text{ mSv} \cdot \text{a}^{-1}$  como promedio de cinco años consecutivos para los trabajadores ocupacionalmente expuestos y  $1,0 \text{ mSv} \cdot \text{a}^{-1}$  para el público” [12], valores que corresponden a los límites recomenda-

dos por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) [13]. Si bien es claro que los turistas están incluidos en la categoría de público, se debe demostrar el cumplimiento de ese límite. Por el contrario, no hay claridad normativa sobre la categorización de los guías turísticos que frecuentan las cavernas o que pudieran quedar atrapados por largos períodos.

## 3. Área de estudio

La cueva del Tigre ( $02^{\circ} 44' 26'' \text{ N}$ ,  $-75^{\circ} 28' 59'' \text{ W}$ , 814 m. s. n. m.) está localizada en la vereda Upar, a 10 km del casco urbano del municipio de Yaguará, muy cerca del embalse de Betania (figura 1). La zona en donde se encuentra la cueva del Tigre ha sido estudiada previamente por su importancia arqueológica, pues allí fue hallado el Mosasaurio de Yaguará o *Yaguarasaurus columbianus* [14], y por su importancia hidrocarburífera, que motivó que allí se llevara a cabo el programa sísmico Upar 3D 2012 de Ecopetrol [15]. La cueva del Tigre está en línea recta de Neiva, a 31 km de distancia; de Popayán, a 128 km, y de Cali, a 140 km. Desde el casco urbano de Yaguará se debe viajar hasta la vereda Upar, perteneciente al mismo municipio [16].

El municipio de Yaguará se encuentra localizado sobre los valles del río Yaguará y el río Magdalena, en la parte central del departamento del Huila, en la vertiente oriental de la cordillera Central, con una temperatura promedio de  $30^{\circ} \text{C}$  y una precipitación promedio anual de 1.642 mm, por lo que se clasifica como un clima cálido seco [17].

El municipio de Yaguará tiene características geológicas y geomorfológicas correspondientes a planicies aluviales con un relieve de pendientes relativamente fuertes que cruzan drenajes desarrollados en su mayoría sobre rocas del Cretáceo, conformado por la Formación Caballos que está compuesta en su miembro Inferior por arenitas cuarzosas, intercaladas con lodolitas, shales y láminas de arenitas más finas. El miembro Medio es una unidad lodosa compuesta por lodolitas intercaladas con caliza lítica fosilífera. El miembro Superior se caracteriza por presentar capas de arenitas líticas y calcáreas generalmente glauconíticas, con una buena cantidad de fósiles de amonitas, bivalvos y gastrópodos. El miembro Superior se correlaciona en la zona con la Formación Villeta [18]. A medida que la fracción de grano fino aumenta, también lo hace el contenido de  $^{238}_{92}U$ , dada la afinidad que tiene este elemento químico con los minerales arcillosos [19]. Por esto, en las ro-

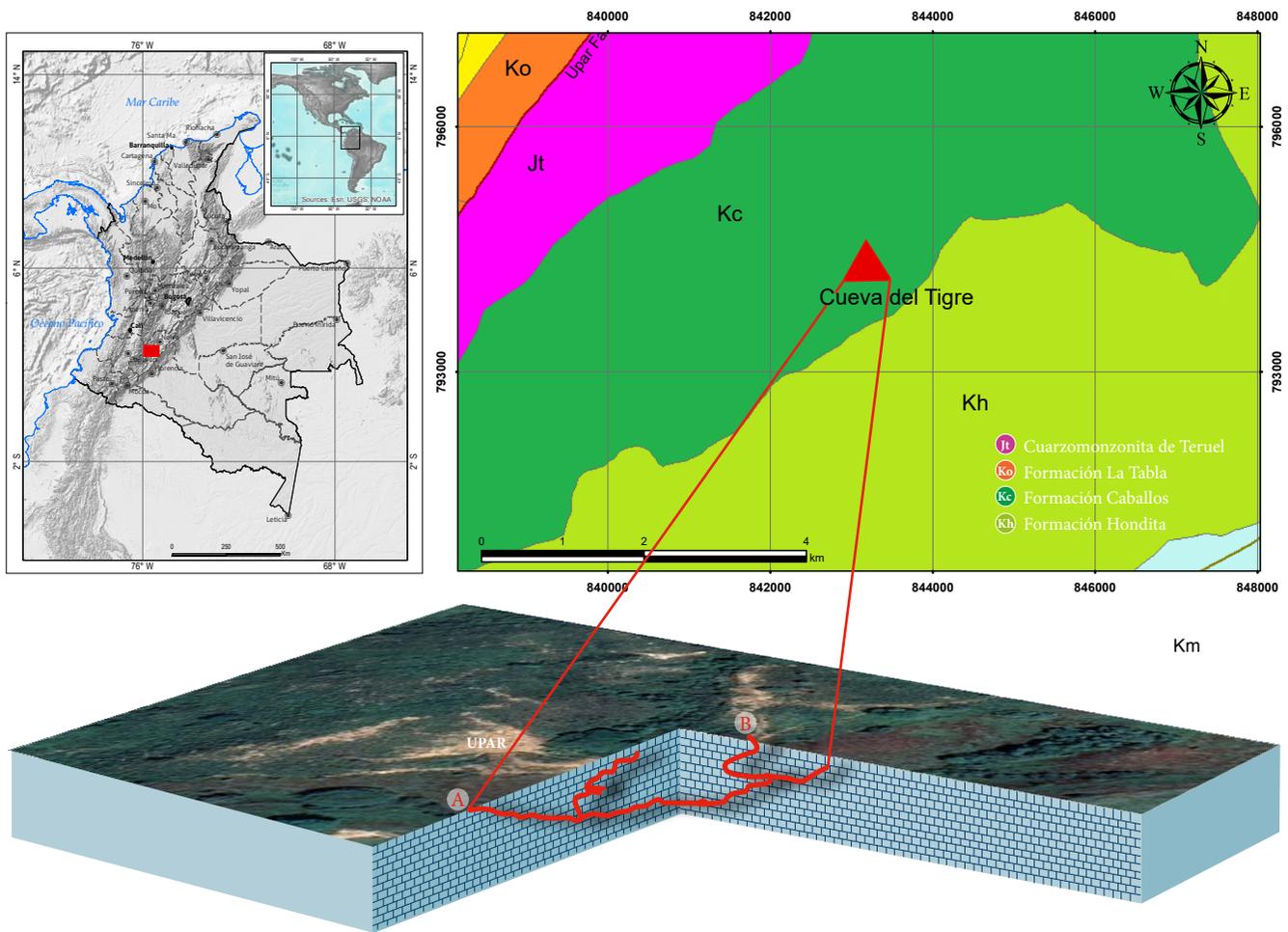


Figura 1. Localización y proyección de la cueva del Tigre, de Yaguará

cas de grano fino, como las lodolitas y shales de la Formación Caballos, se genera gas  $^{222}_{86}\text{Rn}$  por la desintegración radiactiva del  $^{238}_{92}\text{U}$  contenido en estas rocas. Esta unidad la encontramos enfrentando la quebrada Chichayaco, las haciendas El Tigre, las Nubes, Gramalito y las Brisas, la zona noroccidental del municipio de Yaguará, en las veredas Letrán, Viso y Upar, en límites con el municipio de Palermo, hacia la Cuchilla de Upar, zona donde se encuentra la cueva del Tigre (figura 1).

#### 4. Metodología

Dentro de la cueva del Tigre de Yaguará se realizaron mediciones morfológicas con un sistema láser Bauker, modelo NLT80, 635 nm, que tiene una cobertura de medición de entre 0,05 y 80 m, y una potencia máxima de 1,0 mW. Se utilizó también un medidor de luz Sunche modelo HS1010. Para evaluar zonas con variados gradientes de presión atmosférica se empleó un anemómetro R2 modelo GM816. Las temperaturas y hu-

medades en las galerías y en los corredores de la cueva del Tigre fueron medidas con un termómetro/higrómetro Protmet, modelo MS6508. Para el posicionamiento geográfico se utilizó un sistema de navegación GlobalSat-GPS-BU-353-S4 versión móvil, con 4.800 baudios.

Las mediciones del gas radón  $^{222}_{86}\text{Rn}$  en cavernas requieren siempre la superación de retos físicos y técnicos relacionados con los riesgos mecánicos, la humedad, las temperaturas, el difícil acceso, la oscuridad y, en particular, la imposibilidad de disponer de fuentes eléctricas para los instrumentos. Por estas razones se utilizaron sistemas EPERM® (Electret Passive Environmental Radon Monitors) [20], [21] o cámaras de ionización con electreto. El sistema EPERM® se compone de tres elementos: 1) un disco de teflón Du-Pont cargado electrostáticamente, llamado *electreto*, que colecta iones en su superficie (figura 2a); 2) una cámara de polipropileno (figura 2b) conductora de electricidad, dentro de la cual un electreto puede ser descargado, y 3) un medidor del potencial de superficie del electreto.



Figura 2. a) Electretos ST.



b) Cámara S en modos abierto y cerrado

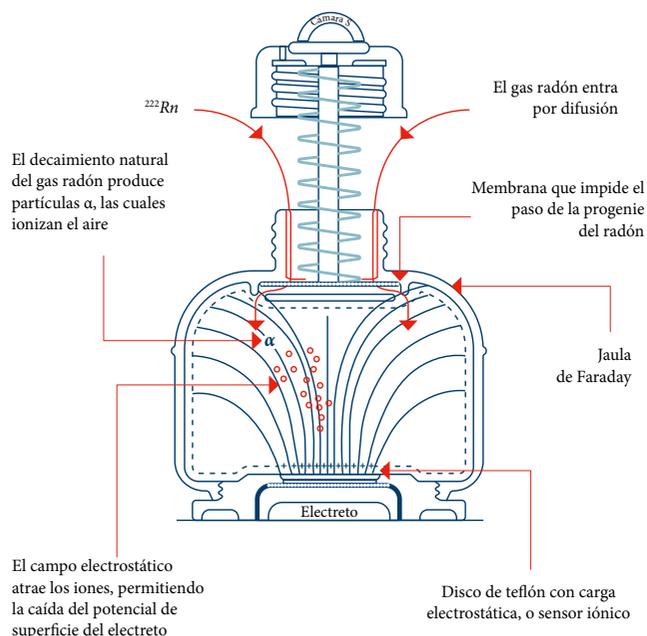


Figura 3. Procesos dentro del sistema EPERM® para la cuantificación del gas radón por conteo de partículas  $\alpha$  [22]

El EPERM® es un sistema integrador de monitoreo de radón pasivo que se usa ampliamente en más de treinta países y está catalogado como el dispositivo más utilizado en los Estados Unidos en mediciones de radón a corto y largo plazo. Solo el gas radón, y no los productos de descomposición del radón (figura 3), se difunde a través de la entrada filtrada en el volumen sensible de la cámara de ionización hasta que la concentración del radón dentro de la cámara sea la misma que la concentración del entorno. La radiación emitida por la descomposición del radón (y los productos de descomposición formados a partir del radón dentro de la cámara de ionización) ionizará el aire.

El electreto cargado positivamente atrae los iones negativos generados por la radiación en la cámara de ionización, lo cual resulta en una disminución neta del potencial electrostático del electreto. Los iones positivos son atraídos hacia la pared de la cámara de ionización por el campo electrostático dentro de la jaula de Faraday, donde se disipan. El material conductor utilizado en la construcción de la cámara juega un papel muy importante en la generación de cargas negativas en las paredes de la cámara (figura 3). La caída del potencial electrostático del electreto (expresado en voltios), es proporcional a la concentración del radón y al período de exposición. A la jaula de Faraday solo ingresa el gas radón  $^{222}_{86}\text{Rn}$ , produciendo partículas  $\alpha$  en su decaimiento natural, que, por su efecto ionizante dentro de la cámara, son detectadas mediante la caída del potencial electrostático del electreto en el período de tiempo del análisis [22].

Los electretos ST (*short-term*) son construidos con politetrafluoroetileno, con un disco de alta sensibilidad de teflón Du-Pont con carga eléctrica cuasipermanente. La carga del electreto crea un fuerte campo electrostático capaz de coleccionar iones de carga contraria. La cantidad de carga contenida en un electreto se caracteriza por su potencial de superficie, su diámetro y espesor. La cámara S (estándar de 210 ml) está construida con un polímero conductor de la electricidad, lo cual le permite minimizar la respuesta a la radiación gamma natural. Con un scintilómetro Saphymo modelo SPP2-NF con detector de NaI(Tl) y energía máxima de 30 keV, fue medida la radiación gamma ambiental.

Los procesos que tienen lugar durante las mediciones son: desintegración del gas  $^{222}_{86}\text{Rn}$  por mecanismo  $\alpha$ ; formación de descendientes  $^{218}_{84}\text{Po}$ ,  $^{214}_{82}\text{Pb}$ ,  $^{214}_{83}\text{Bi}$  y  $^{214}_{84}\text{Po}$ ; adición de los isótopos  $^{218}_{84}\text{Po}$ ,  $^{214}_{82}\text{Pb}$ ,  $^{214}_{83}\text{Bi}$  y  $^{214}_{84}\text{Po}$  para formar aeroso-

les; generación de iones  $O_2^+$ ; electrificación de superficies; deposición de descendientes sobre superficies (*plate-out*) y filtración a través de membranas selectivas.

En la cueva del Tigre se ejecutaron mediciones piloto de dos días y mediciones integrales de quince días, utilizando sistemas EPERM® con combinaciones cámara+electreto en veintinueve lugares en las cinco galerías, así como en los siete corredores (figura 4). Cada electreto, con su respectivo código y su potencial inicial, fue instalado a alturas por donde respiran los visitantes y a 0,5 m de distancia de las paredes, cuando la morfología interna lo permitió, al término de lo cual se desinstalaron las estaciones y se midieron los potenciales finales de cada uno de los electretos. Siguiendo la metodología del sistema EPERM® de cámaras ionizantes [20], [21], se calculó inicialmente el factor de calibración  $FC$  para la configuración más eficaz, de acuerdo con la expresión (1):

$$FC = A + B \left[ \left( \frac{V_i + V_f}{2} \right) \right] \quad (1)$$

donde  $V_i$  y  $V_f$  son los potenciales inicial y final de los electretos, expresados en voltios; las constantes  $A$  y  $B$  dependen de la configuración cámara + electreto y son establecidas en condiciones de laboratorio, atendiendo estándares internacionales, pues el  $FC$  se define como la caída de potencial de superficie cuando una específica configuración ha sido expuesta en laboratorio durante un día en un ambiente de referencia de  $37 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  (37 desintegraciones por segundo) de  $^{222}_{86}\text{Rn}$ .

En las mediciones realizadas en la cueva del Tigre de Yaguará, la constante  $A = 1,6978$  y  $B = 5,742 \cdot 10^{-4}$ .

Una vez establecido el  $FC$ , fueron calculadas las concentraciones activas del isótopo  $^{222}_{86}\text{Rn}$  mediante la expresión (2):

$$[^{222}_{86}\text{Rn}] = \frac{V_i - V_f}{FC \cdot TA} - DG \quad (2)$$

donde  $TA$  es el tiempo de análisis, o tiempo de exposición de los sensores en el sitio de medición;

$DG$  son las dosis de radiación gamma ambiental, donde  $1 [\text{mR} \cdot \text{h}^{-1}] = 3,219 [\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}]$ .

Teniendo en cuenta que a mayores alturas sobre el nivel del mar se reduce el número de moléculas por unidad de volumen de aire, se procedió a calcular el factor de corrección por altura  $FA$  para cada dato, puesto que a menor volumen,

menor capacidad de ionización, utilizando la expresión (3) resultante de experimentaciones en laboratorio con estándares internacionales:

$$FA = 1,97 \cdot 10^{-4} m + 0,79 \quad (3)$$

Como en todo método de medición, existen probables fuentes de error, con los electretos del sistema EPERM® es siempre importante trabajar en el rango de potenciales entre 200 y 750 V, pues periódicamente solo en este rango se recibe la certificación metroológica internacional. Es importante considerar un error máximo del 3%, relacionado con posibles imperfecciones geométricas de los electretos y las cámaras EPERM®, relacionadas con su producción en serie, y posibles errores en la lectura de los potenciales inicial y final de los electretos [22].

Entre los factores ambientales que pueden afectar la calidad de la medición del isótopo  $^{222}_{86}\text{Rn}$  mediante cualquier método científico, se destacan las variaciones de la temperatura ambiental, la humedad relativa, la presencia de iones, cualquier campo eléctrico externo, material particulado y la radiación gamma en el aire. La construcción de los componentes del sistema EPERM® con material polímero electroconductor permite minimizar todos los factores arriba citados.

La dosis efectiva anual para una persona es la suma de las dosis efectivas obtenidas en un año a partir de la exposición externa y la dosis efectiva comprometida de los radionucleidos incorporados en ese año. Se calcularon las dosis efectivas de radiación ionizante  $E$  a las que se exponen los turistas y los guías dentro de la cueva, de acuerdo con los protocolos recomendados por la Comisión Internacional para la Protección Radiológica (ICRP) [12], fundamentados en la expresión (4):

$$E = C_{Rn} \cdot F_{er} \cdot t \cdot k \quad (4)$$

Siendo  $E$  las dosis efectivas anuales de radiación ionizante [ $\text{mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ ];  $C_{Rn}$ , la concentración activa del gas  $^{222}_{86}\text{Rn}$  [ $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ];  $F_{er}$ , el factor de equilibrio radiactivo;  $t$ , el tiempo de exposición a la radiación ionizante [ $\text{h} \cdot \text{a}^{-1}$ ];  $k$ , el factor de conversión de unidades de [ $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ] a [ $\text{mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ ], igual a  $9,0 \cdot 10^{-6}$ .

El equilibrio radiactivo  $F_{er}$  del  $^{222}_{86}\text{Rn}$  se alcanza cuando la producción de este gas iguala a su desintegración. Formal-

mente el factor de equilibrio radiactivo del  $^{222}_{86}\text{Rn}$  se define [23], [24] de acuerdo con la expresión (5):

$$F_{er} = \frac{EE^{222}_{86}\text{Rn}}{[^{222}_{86}\text{Rn}]} \quad (5)$$

donde

$$EE^{222}_{86}\text{Rn} = w [^{218}_{84}\text{Po}] + x [^{214}_{82}\text{Pb}] + y [^{214}_{83}\text{Bi}] + z [^{214}_{84}\text{Po}]$$

siendo

$EE^{222}_{86}\text{Rn}$  la concentración equivalente del  $^{222}_{86}\text{Rn}$  en equilibrio,

$[^{222}_{86}\text{Rn}]$  la concentración activa del  $^{222}_{86}\text{Rn}$  en  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ,

$$w = 0,1046 \text{ [25]},$$

$$x = 0,5159 \text{ [25]},$$

$$y = 0,3795 \text{ [25]},$$

$[^{218}_{84}\text{Po}]$  la concentración activa del  $^{218}_{84}\text{Po}$  en  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ,

$[^{214}_{82}\text{Pb}]$  la concentración activa del  $^{214}_{82}\text{Pb}$  en  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ,

$[^{214}_{83}\text{Bi}]$  la concentración activa del  $^{214}_{83}\text{Bi}$  en  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  y

$[^{214}_{84}\text{Po}]$  la concentración activa del  $^{214}_{84}\text{Po}$  en  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ .

En interiores como las cuevas, el factor de equilibrio radiactivo  $F_{er}$  es función del intercambio del aire interno y externo. El valor medio del factor de equilibrio radiactivo  $F_{er}$  para interiores ha sido establecido entre 0,50, para bajo intercambio de aire con el exterior, y 0,33 para alto intercambio de aire con el exterior [24].

El tiempo de exposición  $t$  se define como el período durante el cual la persona ha inhalado el aire que contiene los productos de la desintegración del  $^{222}_{86}\text{Rn}$  o isótopos  $^{218}_{84}\text{Po}$ ,  $^{214}_{84}\text{Po}$ ,  $^{214}_{82}\text{Pb}$ ,  $^{214}_{83}\text{Bi}$  (sobre todo los de polonio).

## 5. Resultados y discusiones

En la tabla 3 se muestran los datos promediados obtenidos en las campañas ejecutadas en 2017 y 2018, de los niveles de gas radón y las principales variables microclimáticas en la cueva del Tigre ( $\bar{X}$  son valores promedios). La primera columna indica la numeración de cada uno de los veintinueve sitios de medición (figuras 5 y 6).

### 5.1. Estructura interna de la cueva del Tigre

Con base en los datos de distancias, azimut e inclinaciones tomados durante los recorridos en el interior de la cueva del Tigre, se elaboró un modelo gráfico representado en la figura 4. Allí se observa que la cueva del Tigre tiene tres principales galerías (G1, G2 y G3), con volúmenes entre 400 y 500  $\text{m}^3$ , además de dos galerías más pequeñas (G4 y G5). La entrada sur (A) inicia con la galería G1, que tiene cerca de 12 m de ancho, con una altura irregular promedio de 1,6 m, y penetra cerca de 20 m. La galería G2 tiene forma de glorieta, y es el sector más utilizado en actividades turísticas, en calidad de cámara de meditación, quizá por ser la zona más seca y confinada de la cueva. Las galerías más profundas son G3 y G4, con cotas cercanas a -20 m. La galería G5 es la más pequeña, y constituye el túnel que conecta la entrada norte de la cueva del Tigre. Hay siete corredores (C1-C7) que comunican las cinco galerías (G1-G5), que tienen desarrollos entre 20 y 80 m de longitud, con irregulares alturas, en algunas de las cuales, como en el corredor C4, hay un sector estrecho con alturas cercanas a 0,5 m. El desarrollo total de la cueva del Tigre supera los 300 m.

### 5.2. Radiación térmica dentro de la cueva del Tigre

Las temperaturas medidas en la cueva del Tigre estuvieron en un rango de 21,4 a 32,5 °C, mientras que en el exterior de la cueva, la temperatura era de alrededor de 33,0 °C. En cada galería, las temperaturas presentaron variaciones de sitio a sitio, relacionadas con los gradientes térmicos que se generan en el interior, y también con las probables incertidumbres instrumentales. En la figura 5 se muestran en colores los promedios de todas las temperaturas registradas en las veintinueve estaciones de medición.

El ambiente interno de la cueva del Tigre comprende dos sectores: uno seco, con humedad relativa promedio de 59,1%, y uno húmedo, con humedad relativa promedio de 76,1%. El calor se transfiere por interacción de las partículas en movimiento desde el aire externo, donde el ambiente mantiene temperaturas más altas. El calor también se transfiere por el subsuelo, mediante fluidos que superan las fracturas del sistema de fallas existentes en la región, sobre todo hacia las galerías G2, G3 y G4 de la cueva, como lo indican las flechas rojas de la figura 5.

Tabla 3. Datos de las mediciones en veintinueve estaciones dentro de la cueva del Tigre, de Yaguará

N.º	Humedad		Temperatura en aire		<sup>222</sup> Rn en aire		
	(%)	(°C)	(K)	$\bar{X}$ (K)	(pCi·l <sup>-1</sup> )	(Bq·m <sup>-3</sup> )	$\bar{X}$ (Bq·m <sup>-3</sup> )
1	45,7±0,5	32,2±0,3	303,4±3,0		1,0±0,1	37±1	
2	46,0±0,5	32,0±0,3	303,2±3,0	303,1	1,0±0,1	37±1	222
3	49,3±0,5	31,9±0,3	303,1±3,0	(±3,0)	3,8±0,1	139±4	(±7)
4	49,6±0,5	31,8±0,3	303,0±3,0		17,8±0,5	660±20	
5	57,7±0,6	28,0±0,3	299,2±3,0		543,8±16,3	20.119±604	
6	57,7±0,6	28,0±0,3	299,2±3,0		543,7±16,3	20.118±604	
7	57,6±0,6	28,5±0,3	299,5±3,0	299,2	543,0±16,3	20.093±603	20.128
8	57,7±0,6	28,0±0,3	299,2±3,0	(±3,0)	545,6±16,4	20.187±606	(±604)
9	57,7±0,6	28,0±0,3	299,2±3,0		544,0±16,3	20.129±604	
10	58,0±0,6	27,9±0,3	299,1±3,0		543,8±16,3	20.121±604	
11	88,9±0,9	22,3±0,2	293,5±3,0		69,0±2,1	2.555±76	
12	89,8±0,9	21,4±0,2	292,6±3,0	293,2	13,2±0,4	857±26	1.258
13	88,9±0,9	22,3±0,2	293,5±3,0	(±3,0)	9,8±0,3	361±11	(±38)
14	64,2±0,6	24,1±0,2	295,3±3,0		1,0±0,1	37±1	
15	64,1±0,6	24,4±0,2	295,6±3,0		1,0±0,1	37±1	
16	64,2±0,6	25,8±0,3	297,0±3,0	297,1	1,0±0,1	37±1	
17	64,3±0,6	26,8±0,3	298,0±3,0	(±3,0)	1,0±0,1	37±1	
18	64,2±0,6	27,3±0,3	298,5±3,0		1,0±0,1	37±1	
19	64,2±0,6	27,8±0,3	298,7±3,0		1,0±0,1	37±1	
20	64,3±0,6	27,2±0,3	298,4±3,0		1,0±0,1	37±1	
21	64,3±0,6	27,2±0,3	298,4±3,0	299,1	1,0±0,1	37±1	37
22	57,8±0,6	28,0±0,3	299,2±3,0	(±3,0)	1,0±0,1	37±1	(±1)
23	53,4±0,5	29,5±0,3	300,7±3,0		1,0±0,1	37±1	
24	49,0±0,5	31,3±0,3	302,5±3,0		1,0±0,1	37±1	
25	49,3±0,5	31,8±0,3	303,0±3,0		1,0±0,1	37±1	
26	49,2±0,5	31,9±0,3	303,1±3,0	303,1	1,0±0,1	37±1	
27	46,5±0,5	32,1±0,3	303,3±3,0	(±3,0)	1,0±0,1	37±1	
28	46,1±0,5	32,2±0,3	303,4±3,0		1,0±0,1	37±1	
29	45,3±0,4	32,5±0,3	303,7±3,0		1,0±0,1	37±1	

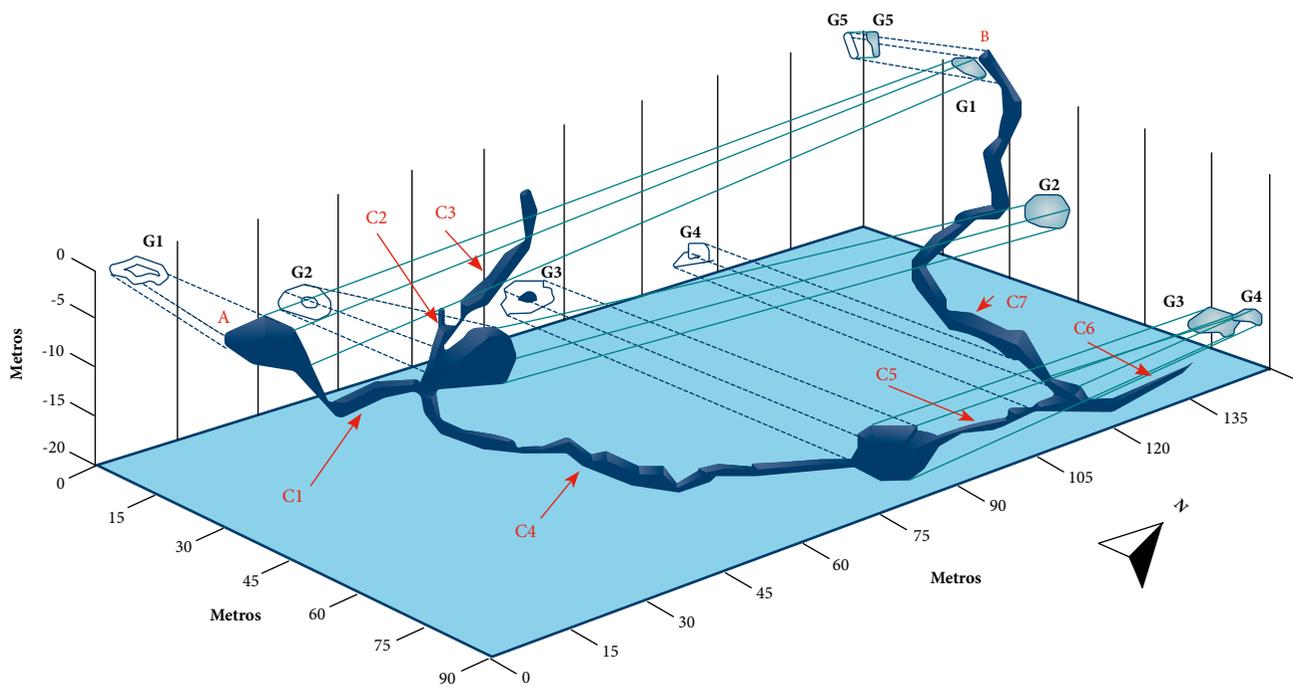


Figura 4. Proyección 3D de la cueva del Tigre

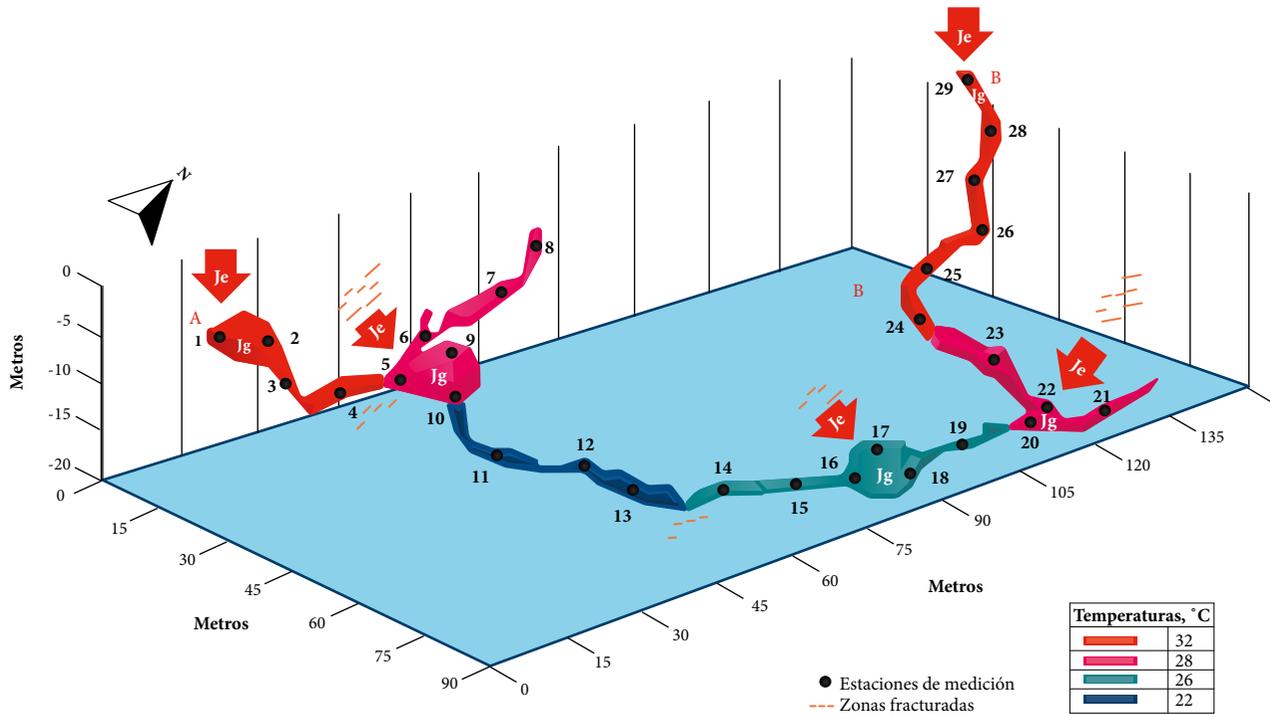


Figura 5. Temperaturas medias por galería en la cueva del Tigre

Desde un punto de vista termodinámico, dentro de la cueva del Tigre hay calor transferido a través de las fracturas del sistema endocárstico circundante, por procesos que desarrollan trabajo mecánico mediante el desgaste de fuentes de energía libre, que producen entropía. La circulación del aire interno de la cueva es impulsada por el gradiente térmico, que es función de las condiciones de transferencia de calor, de la gravedad terrestre y de la profundidad. El intercambio de calor dentro de la cueva se produce por la circulación de gases o aguas subterráneas a través de las fracturas de las rocas, que incide en la variación de su entropía.

Entre el exterior de la cueva del Tigre y las galerías con diferentes temperaturas  $T_e$  y  $T_g$ , comunicados a través de las entradas y las zonas fracturadas del sistema endocárstico, el flujo de calor  $J$  ocurre de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, desde el exterior, que es más caliente, hacia las galerías. En esta cueva, la tasa de producción de entropía interna  $\sigma$  se ajusta a la expresión (6):

$$\sigma = \left( \frac{J_e}{T_e} - \frac{J_g}{T_g} \right) \geq 0 \tag{6}$$

donde  $J_e$  es el flujo de calor desde el exterior más caliente;  $J_g$  es el flujo de entrada de calor en cada galería;  $T_e$  es la temperatura del exterior más caliente;  $T_g$  es la temperatura de cada galería.

La cueva del Tigre está localizada en una zona de alta actividad sísmica y neotectónica, según lo indica el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia [26].

La producción de entropía o un cambio de la entropía específica  $dS$  de un volumen de aire seco con temperatura  $T$  en la cueva del Tigre se expresa así:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \tag{7}$$

donde  $\delta Q$ , en la primera ley de la termodinámica, es relacionada con la conservación de la energía, dado que la energía no puede ser transformada 100% en trabajo útil  $\delta W$ , pues siempre en condiciones reales habrá pérdida de energía en forma de calor, o sea,

$$dU = \delta W + \delta Q \tag{8}$$

El análisis de la dinámica del calor se puede realizar mediante el estudio del perfil de las temperaturas de un cuerpo. Este análisis se obtiene al solucionar la ecuación del calor, que generalmente se escribe como la expresión (9):

$$\frac{\partial}{\partial t} T(\vec{r}, t) = d\nabla^2 T(\vec{r}, t) \tag{9}$$

donde  $T(\vec{r}, t)$  es la temperatura observada en el punto del espacio  $\vec{r}$  en el instante de tiempo  $t$  y  $d$  es la difusividad térmica. Esta ecuación indica que la velocidad a la cual el calor se desplaza en una muestra depende de la diferencia de temperaturas en la misma y de su material. Si la difusividad térmica es alta, el calor se transfiere más fácilmente que en el caso de un valor menor de  $d$ .

En el caso particular de la interface lito-tropósfera, hay cambios de materiales, y esto debe ser considerado en la ecuación, ya que la difusividad térmica varía espacialmente. Matemáticamente esto se expresa de la forma  $d \equiv d(\vec{r})$ . Esto modifica la ecuación del calor, quedando como se expresa en (10):

$$\frac{\partial}{\partial t} T(\vec{r}, t) = \vec{\nabla} \cdot [d(\vec{r}, t) \vec{\nabla} T(\vec{r}, t)] \quad (10)$$

Esta ecuación, aunque mucho más compleja, permite considerar interfaces entre materiales tales como el aire, cuya difusividad térmica es  $d_{air} \approx 1,9 \times 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$ , y el carbonato de calcio con  $d_{CaCO_3} \approx 1,5 \times 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ .

En la figura 6 se muestran simulaciones 2D en la cueva del Tigre con el aire cálido y el interior frío en forma de imágenes tomadas de un video especialmente editado con este propósito [27], donde a) muestra la condición inicial dada a una temperatura uniforme igual a la temperatura del borde rocoso; b) indica el borde del aire exterior con una temperatura constante de 31 °C; c) muestra que la difusión del calor es mucho más rápida por el aire que a través del carbonato de calcio, donde ocurre resistencia al cambio de temperatura, y d) muestra que el borde rocoso en el interior de la cueva siempre está a 22 °C.

Para las simulaciones 2D de la cueva del Tigre inicialmente se empleó el plano de la cueva en tonos de gris, asignando al aire el color blanco y a la roca el color negro. Posteriormente se hizo una convolución con la función gaussiana bidimensional más angosta, lo cual permitió suavizar las interfaces entre los dos materiales y, al mismo tiempo, evitó divergencias numéricas. Luego se creó una malla de  $500 \times 350$  celdas sobre la cual se discretizó la ecuación de difusión con coeficiente de difusividad térmica dependiente del espacio.

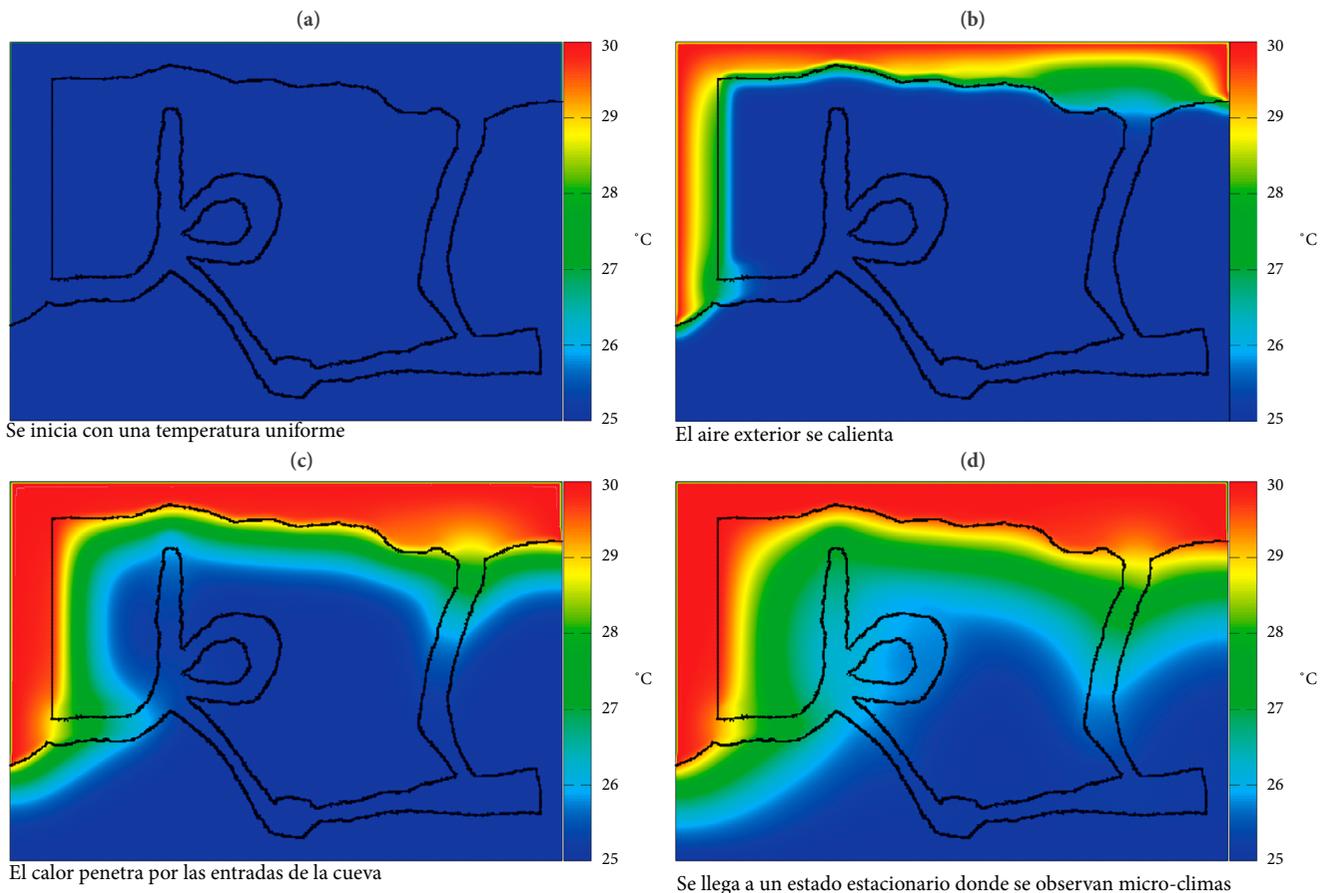


Figura 6. Simulaciones 2D en la cueva del Tigre

Mediante el método de diferencias finitas se asignaron los tonos de gris linealmente a valores entre los coeficientes medios de difusividad térmica del aire y el carbonato de calcio. Tomando una condición inicial uniforme y un paso de integración pequeño, se calculó la dinámica del sistema mediante el método de Euler, que para este tipo de ecuaciones, con las condiciones impuestas, es muy estable, eficiente y suficientemente preciso [28].

En general, en los ambientes subterráneos como las cavernas, cuevas y zonas de explotación minera subterránea conocidas como *minas*, hay galerías donde se realiza intercambio de calor, y se encuentran algunos lugares donde hay aislamiento relativo o confinamiento térmico, como es el caso de la galería G2 de la cueva del Tigre, que cumple con las mejores condiciones de mayor equilibrio termodinámico.

### 5.3. Radiación ionizante dentro de la cueva del Tigre

Por su parte, el equilibrio radiactivo del isótopo padre  $^{222}_{86}\text{Rn}$  y sus isótopos descendientes  $^{218}_{84}\text{Po}$ ,  $^{214}_{82}\text{Pb}$ ,  $^{214}_{83}\text{Bi}$  y  $^{214}_{84}\text{Po}$  se establece cuando la actividad total es la actividad de un paso multiplicada por el número de pasos, lo cual se establece en cerca de cuatro horas desde la desintegración natural del isótopo padre en condiciones confinadas.

Para evaluar el grado de confinamiento o baja transferencia de calor y de masa en un ambiente subterráneo, el gas  $^{222}_{86}\text{Rn}$  es utilizado como un efectivo trazador atmosférico. Por esta razón, se cuantificaron las concentraciones activas del  $^{222}_{86}\text{Rn}$  dentro de la cueva del Tigre.

En la figura 7 se observa que en el sector sur, por la entrada A, la galería G1 y el corredor C1 (color celeste con los puntos 1-4) conservaron niveles promedio de  $222 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  de  $^{222}_{86}\text{Rn}$ . La galería G2 y los corredores C2, C3 (zona roja con mediciones 5-10) constituyen el área con mayores concentraciones de gas  $^{222}_{86}\text{Rn}$  de la cueva del Tigre, con valores promediados en  $20.128 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ , que indican mayor confinamiento y mejores condiciones para el establecimiento temprano del equilibrio radiactivo. El corredor C4 mostró dos subcorredores: uno cercano a la galería G2 (color rosado con los puntos 11-13), con niveles de gas  $^{222}_{86}\text{Rn}$  promediados en  $1.258 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ , y otro cercano a la galería G3 (color azul con los puntos 14-16), con valores diluidos de gas  $^{222}_{86}\text{Rn}$ . El sector norte, comprendido por las galerías G3, G4 y G5 y los corredores C5, C6 y C7 (color azul con los puntos 14-29), mostraron niveles mínimos de  $^{222}_{86}\text{Rn}$ , que indican mayores

regímenes de vientos, que diluyen o transportan fácilmente al gas  $^{222}_{86}\text{Rn}$ .

En la figura 7 se observa que los sectores sur (color celeste) y norte (color azul) de la cueva del Tigre tienen niveles de  $^{222}_{86}\text{Rn}$  relativamente bajos, lo cual podría ser explicado por el efecto diluyente de los regímenes de vientos en su interior. El mecanismo de ventilación a través de las entradas A y B de los sectores sur y norte puede ser explicado a partir del principio de Torricelli, considerando la existencia de fracturamiento de rocas en las cotas más bajas, dada la relativa alta actividad tectónica de la zona. El principio de Torricelli para explicar la dinámica de los fluidos en general, y del aire en particular, exige la existencia de mayores temperaturas en el exterior, lo cual se cumple en la cueva del Tigre, en comparación con las temperaturas interiores, donde el aire relativamente más denso dentro de la cueva se ve obligado a salir por las zonas fracturadas de las rocas en su parte inferior, lo cual se representa en forma de flechas. De acuerdo con el principio de Torricelli (alumno de Galileo), el efecto de la gravedad terrestre multiplicado por la altura (en el caso de la cueva del Tigre, es la gravedad terrestre  $g$  por la profundidad  $h$  de la fractura interior) genera la dinámica aérea en los sectores sur y norte (de colores celeste y azul) de la cueva.

Aplicar la expresión matemática propuesta por Torricelli para calcular la velocidad del viento  $v$  dentro de la cueva del Tigre

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (11)$$

no resultaría muy apropiado en este caso, dado que en la cueva del Tigre, a diferencia del modelo planteado por Torricelli, el fluido no cumple las condiciones ideales, ya que este fluido, que choca con los bordes rocosos de la cueva, produce rozamientos y turbulencias. También el aire interno de estos dos sectores de la cueva del Tigre forma aerosoles con las partículas en suspensión allí presentes, lo que aumenta la viscosidad del medio, y, como se indicó en la sección anterior, en esta zona se realizan procesos irreversibles no adiabáticos, pues los fenómenos de transferencia de calor son evidentes, según los datos reportados en la tabla 3. Por todo esto, y como un estimativo, las velocidades del viento en los sectores celeste y azul de la cueva del Tigre podrían calcularse adicionando un factor que afecte la velocidad en una sexta parte. De esta manera, y considerando profundidades en el sector celeste de 5 m, y en el sector azul de 14 m

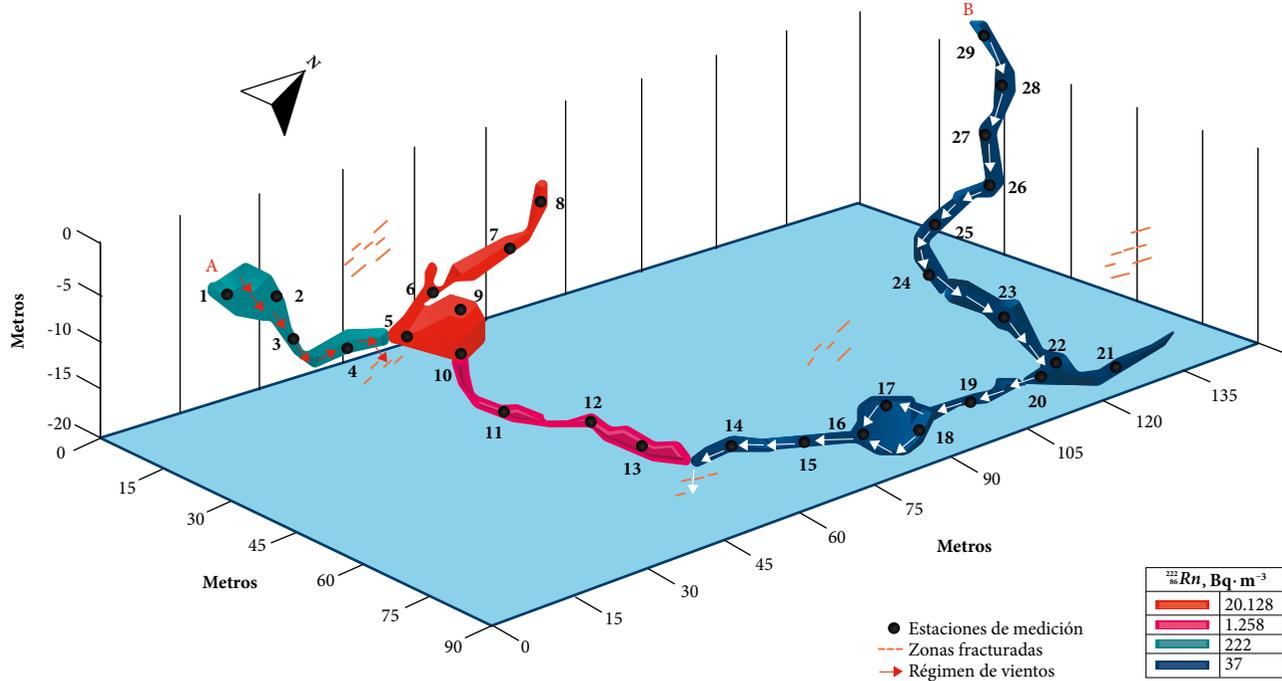


Figura 7. Niveles promedio de  $^{222}\text{Rn}$  en la cueva del Tigre

(véase la figura 4), obtendríamos velocidades del aire interno de 1,6 y 2,8  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , y flujos de  $^{222}\text{Rn}$  de 366 y 104  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectivamente.

Por su parte, en los sectores centrales (colores rojo y rosado), que corresponde a la zona de explotación turística, se concentran los mayores niveles de gas  $^{222}\text{Rn}$ , pues además de tener un ambiente seco, es un sistema confinado con características adiabáticas. El recorrido turístico se realiza normalmente a través de la apertura A hasta la galería G2, donde están los sitios de medición 9 y 10. El corredor C4 (color rosado) no lo frecuentan los turistas debido a su relativa estrechez. Este corredor mostró niveles de gas  $^{222}\text{Rn}$  promedios de 1.258  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ , propios de zonas con alguna actividad tectónica, donde el gas  $^{222}\text{Rn}$  es transportado por el aire que circula dentro de las fallas geológicas activas, por gradiente de presión ajustado a la ley de Darcy. Esta condición es un indicativo que potencia el corredor C4 como sitio para instalar estaciones isotópicas que sirvan de herramienta para monitorear la actividad sismotectónica en la búsqueda de precursores de eventos sísmicos.

El sector demarcado con color rojo se comenta al final, pues representa el objetivo central del presente trabajo, dados sus relativos altos niveles de gas radón  $^{222}\text{Rn}$ , su baja humedad relativa, su particular temperatura interna y su alto nivel de confinamiento, que hacen de él el sitio con mejores

condiciones para establecer el equilibrio termodinámico y radiactivo. Alto confinamiento equivale a bajo intercambio de aire con el exterior, y por eso el valor del factor de equilibrio radiactivo  $F_{er}$  de la galería G2 (rojo) y el corredor C4 (rosado) se estableció igual a 0,5 [24].

En la tabla 4 se consideró el hipotético caso de un turista que visite la cueva del Tigre de Yaguará, en cinco ocasiones al año y permanezca dentro de la galería G2 por dos horas. Esa persona estará recibiendo dosis efectivas de radiación ionizante  $E$  iguales a 0,9  $\text{mSv} \cdot \text{a}^{-1}$  por inhalar los isótopos  $^{218}_{84}\text{Po}$ ,  $^{214}_{84}\text{Po}$ ,  $^{214}_{82}\text{Pb}$ ,  $^{214}_{83}\text{Bi}$  presentes en el aire interno (y en especial los del polonio). Estas dosis personales están por debajo de los límites superiores recomendados por la ICRP en su documento 103 [13]. El ejemplo fue tomado considerando una relativa alta frecuencia de visitas de un turista a la cueva del Tigre, y el resultado no llega al límite superior recomendado internacionalmente.

Por otro lado, se realizó el estimativo para el caso de un guía turístico, quien por razones laborales debe frecuentar la misma galería G2. Considerando exposiciones de cien horas anuales, en este caso se observa en la tabla 2 que estará expuesto a dosis efectivas  $E$  máximas de 9,0  $\text{mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ . Este valor supera la recomendación para el público dada por el organismo internacional ICRP, de 1,0  $\text{mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ , y está por debajo de la norma colombiana emitida para labores mineras, de

20,0 mSv·a<sup>-1</sup>. Hasta la fecha no existe una norma específica de límite de exposición a radiación ionizante en condiciones subterráneas para guías turísticos en cavernas y cuevas.

En general, el tema relacionado con la exposición a radiación ionizante debe ser abordado con normativas más precisas en territorio colombiano, acompañadas de investigaciones sobre dosis y respuesta en pacientes (estudios epidemiológicos concretos). Se considera que el gas radón es el principal responsable de los efectos cancerígenos en el planeta, después del consumo de tabaco [10], [11]. Desde 1995, en Colombia se vienen realizando investigaciones del comportamiento del gas radón en volcanes activos [29] y en fallas geológicas [30]. Se elaboró el primer mapa de radón en la ciudad de Manizales en el año 2002 [31]. Mediciones de gas radón en ambientes subterráneos son muy escasas en Colombia, y su implementación requiere programas de monitoreo a largo plazo. Con esta información se podrían iniciar líneas de investigación en las que se puedan empezar a correlacionar los niveles de radón con los efectos positivos o negativos en la salud humana. Para esto se requiere la necesaria articulación de grupos e instituciones de investigación en salud, en biología molecular, en ciencias nucleares, en geociencias y en fisicoquímica.

Tabla 4. Cálculos de las dosis efectivas de radiación ionizante por progenie del <sup>222</sup>Rn

Público	Sector	C <sub>Rn</sub> [Bq·m <sup>-3</sup> ]	F <sub>er</sub>	t [h·a <sup>-1</sup> ]	E [mSv·a <sup>-1</sup> ]
Turista	Rojo	20.128	0,5	10	0,9
	Rosado	1.258			0,057
Guía	Rojo	20.128	0,5	100	9,0
	Rosado	1.258			0,57

## 6. Conclusiones

Se investigaron fenómenos de radiación térmica y radiación ionizante dentro de la cueva del Tigre del municipio de Yaguará con el propósito de generar nuevo conocimiento relacionado con la exposición a la cual se somete el público que visita esta cueva del departamento del Huila. El interior de la cueva del Tigre fue representado en 3D y se modeló el flujo de la radiación térmica en 2D. Fueron calculados los flujos del aire en los sectores sur y norte, responsables de la dilución del radón cerca de las entradas A y B. Se determinó que la galería G2 cumple con las mejores condiciones de equilibrio termodinámico y mayor aislamiento térmico.

Con base en los niveles de radón medidos en la parte central de la cueva del Tigre se estimaron las dosis efectivas

anuales para casos de personas que la visitan esporádicamente y personas que laboran en calidad de guías. Se encontró que un turista que visita la cueva en cinco ocasiones por un máximo de dos horas de recorrido y permanencia en la galería confinada recibe una exposición por debajo de los límites recomendados para el público por la Comisión Internacional de Protección Radiológica. En cambio, los guías que permanecen por períodos superiores a cien horas anuales soportan una exposición a la radiación ionizante que supera los límites recomendados. El caso crítico sería el de una persona que por accidente quedara confinada en la cueva por varios días.

Como valor agregado a los objetivos del presente trabajo adelantado en la cueva del Tigre, del municipio de Yaguará, se destacó la importancia que podría tener el corredor C4 para que se adelanten estudios específicos de desgasificación subterránea, con el objeto de buscar precursores sísmicos de carácter tectónico.

## En memoria

Sea la oportunidad para recordar a nuestra investigadora Viviana Burbano (q.e.p.d.), quien coparticipó en la primera comisión a la cueva del Tigre y aparece en la referencia [16].

## Agradecimientos

El presente trabajo fue financiado con presupuesto del Proyecto Institucional 1000660, fase I, Fisicoquímica del Interior de la Tierra, Dirección Técnica de Laboratorios del SGC, Sistema General de Regalías, y con recursos propios del Grupo de Investigación FISQUIM del Centro de Aplicaciones Fisicoquímicas en el Entorno. Un especial agradecimiento a los anónimos evaluadores pares y al equipo editorial de la revista IAN-SGC.

## Referencias

- [1] A. A. Cigna, "Radon in caves", *International Journal of Speleology*, vol. 34, n.ºs 1-2, pp. 81-109, 2005. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.34.1.1>
- [2] H. S. Virk, "Radon studies for uranium exploration, environment health hazards and earthquake prediction", *Research & Reviews: Journal of Space Science & Technology*, vol. 7, n.º 2, pp. 11-20, 2018. <https://doi.org/10.37591/v7i2.1161>
- [3] H. Aoshima y Y. Hashiguchi, J. Moriizumi, K. Yoshioka, Y. S. Kim, T. Lida, "A study of atmospheric radon trans-

- port as a tracer of pollutants over the Japan Sea”, *Radioactivity in the Environment*, vol. 7, pp. 567-572, 2005. [https://doi.org/10.1016/S1569-4860\(04\)07068-8](https://doi.org/10.1016/S1569-4860(04)07068-8)
- [4] A. Riggio y M. Santulin, “Earthquake forecasting: A review of radon as a seismic precursor”, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, vol. 56, n.º 2, pp. 95-114, 2015, <https://doi.org/10.4430/bgta0148>
- [5] M. Nikolaishvili, S. Omiadze, T. Shishniashvili, D. Zurabashvili y G. Parulava, “Complex study of medicinal properties of radon in mineral water of Tskaltubo and oral cavity mineralization recovery in patients with periodontitis”, *Georgian Medical News*, vol. 282, pp. 39-43, 2018.
- [6] R. W. Field, D. J. Steck, B. J. Smith, C. P. Brus, E. L. Fisher, J. S. Neuberger, C. E. Platz, R. A. Robinson, R. F. Woolson y C. F. Lynch, “Residential radon gas exposure and lung cancer: The Iowa radon lung cancer”, *American Journal of Epidemiology*, vol. 151, n.º 11, pp. 1091-1102, 2000. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a010153>
- [7] J. H. Lubin, J. D. Boice y C. Edling, *Radon and lung cancer risk: A joint analysis of 11 underground miner studies*, vol. 94. Washington: US Department of Health and Human Services, National Institutes of Health, 1994, p. 3644.
- [8] A. M. Zarnke, S. Tharmalingam, D. R. Boreham y A. L. Brooks, “BEIR IV radon: The rest of the story”, *Chemico-Biological Interactions*, vol. 301, pp. 81-87, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2018.11.012>
- [9] T. A. Przylibski, *Radon: A radioactive therapeutic element*, Special Publications, vol. 451. London: Geological Society, 2016, pp. 209-236. <https://doi.org/10.1144/SP451.7>
- [10] US-EPA Environments Division, *A citizen’s guide to radon: The guide to protecting yourself and your family from radon*. US-EPA, Washington, DC, 6609L, 2004. <https://www.epa.gov/radon/citizens-guide-radon-guide-protecting-yourself-and-your-family-radon>
- [11] OMS, *Manual de la Organización Mundial de la Salud sobre el radón en interiores: Una perspectiva de salud pública*. Proyecto Internacional del Radón de la OMS, Ginebra, Suiza, 118 pp., 2015. [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671\\_spa.pdf;jsessionid=F68AB0F7B2BAB84F7DCE1FD8F3B-156CE?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671_spa.pdf;jsessionid=F68AB0F7B2BAB84F7DCE1FD8F3B-156CE?sequence=1)
- [12] Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia, Resolución 18-1434, 2002. [https://docs.supersa-lud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R\\_MME\\_181434\\_2002.pdf](https://docs.supersa-lud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MME_181434_2002.pdf)
- [13] ICRP, *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP*, vol. 37, n.º 2-4, , 2007. <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>
- [14] M. E. Páramo, “Yaguarasaurus columbianus (*Reptilia mosasauridae*), a primitive mosasaur from the Toronian (Upper Cretaceous) of Colombia”, *Historical Biology*, vol. 14, n.º 1-2, pp. 121-131, 2000. <https://doi.org/10.1080/10292380009380560>
- [15] D. H. Escobar y A. Camacho, *Informe de arqueología, Programa Sísmico Upar 3D*, Ecopetrol, 2013, <https://doi.org/10.13140/rg.2.1.1727.4088>
- [16] G. Garzón, “Comisión de Campo Fisquim cueva El Tigre”, 5 diciembre, 2017. <https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=mXgEqE6OMGM>
- [17] Yaguará-EOT, *Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Yaguará, Huila*, Concejo Municipal, Acuerdo n.º 44 de 2013. <http://www.yaguara-huila.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionControl/Formato%20de%20Regal%C3%ADas%202013.pdf>
- [18] C. Morales, J. C. Caicedo, F. Velandia y A. Núñez, *Geología de la plancha 345, Campoalegre*, escala 1:100.000, memoria explicativa, Ingeominas, 2001, <https://doi.org/10.13140/2.1.3373.0885>
- [19] M. Dentith y S. T. Mudge, *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*, University Printing House, Cambridge, United Kingdom, 2014.
- [20] P. Kotrappa y D. Steck, “Electret ion chamber-based passive radon-thoron discriminative monitors”, *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 141, n.º 4, pp. 386-389, 2010, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq231>
- [21] G. Garzón, *Radón: Manual teórico y práctico*, Ingeominas, Colombia, 2009, <https://doi.org/10.13140/2.1.1932.4800>
- [22] P. Kotrappa, “Application of NIST <sup>222</sup>Rn emanation standards for calibrating <sup>222</sup>Rn monitors”, *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 55, n.º 3, pp. 211-218, 1994. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a082395>
- [23] W. Jacobi, “Activity and potential alpha-energy of <sup>222</sup>radon and <sup>220</sup>radon-daughters in different air atmospheres”, *Health Physics*, vol. 22, pp. 441-450, 1972.
- [24] A. Swedjemark, “Recent swedish research on radon”, en *EML indoor radon workshop 1982*, Environmental

- Measurements Laboratory, U. S. Department of Energy, N. Y., pp. 52-57, 1982.
- [25] J. Planinic y Z. Faj, "The equilibrium factor between radon and its daughters". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. 278, n.º 2, pp. 550-552, 1989. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(89\)90878-4](https://doi.org/10.1016/0168-9002(89)90878-4)
- [26] M. Arcila, J. García, J. Montejó, J. Eraso, J. Valcárcel, M. Mora, D. Viganò, M. Pagani y F. Díaz, *Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano y Fundación Global Earthquake Model, 2020. <https://doi.org/10.32685/9789585279469>
- [27] A. Argüelles, "Cueva del Tigre", 1 de diciembre, 2017. <https://www.youtube.com/watch?v=Y8AwE0j-xPE&feature=youtu.be>
- [28] M. Dehghan, "Fully implicit finite differences methods for two-dimensional diffusion with a non-local boundary condition", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 106, n.º 2, pp. 255-269, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0377-0427\(99\)00065-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0427(99)00065-5).
- [29] M. Heiligmann, J. Stix, G. Williams-Jones, B. Sherwood-Lollar y G. Garzón Valencia, "Distal degassing of radon and carbon dioxide on Galeras Volcano, Colombia", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 77, n.º 1-4, pp. 267-283, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00099-6](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00099-6)
- [30] D. Serna, C. Morán, M. Hernández y G. Garzón, "Casos históricos colombianos del registro de anomalías del radón-222 antes de eventos sísmicos de naturaleza tectónica", *Revista Geofísica Colombiana*, vol. 7, pp. 49-54, 2003. <http://bdigital.unal.edu.co/32077/1/31422-113869-1-PB.pdf>
- [31] G. Garzón, W. Hincapié y S. Salazar, "Indoor air: Radiological geohazard survey in the southeast of Manizales city, Colombia", Fourth Colombian Congress and International Symposium on Air Quality and Public Health, Proceedings, Publishing office, Universidad de la Salle, Bogotá, pp. 390-394, 2013.