



This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.

Manuscrito recibido: Mayo 27, 2024

Revisión recibida: Noviembre 28, 2024

Aceptado: Noviembre 29, 2024

Microclimas en cuatro cavidades subterráneas colombianas: Evaluación fisicoquímica

Microclimates in four colombian underground cavities: Physicochemical assessment

Gustavo Garzón^{1,2}✉, Sonia Patricia Salazar²✉, Luisa Fernanda Meza^{1,2}✉

¹Servicio Geológico Colombiano (SGC), Dirección Técnica de Laboratorios, Cali, Popayán, Colombia.

²Centro de Aplicaciones Fisicoquímicas en el Entorno S.A.S., Grupo de Investigación FISQUIM, Cali, Popayán, Colombia.

Resumen

Se evalúan parámetros fisicoquímicos para conocer las condiciones microclimáticas al interior de cuatro cavidades subterráneas monitoreadas por los autores en los últimos siete años en los departamentos del Huila, Cauca y Antioquia. A partir del análisis de los microclimas subterráneos en las fases aire-roca-agua y confrontándolos con los rangos tolerables para los seres vivos, se pueden plantear potenciales usos.

En el presente trabajo se evalúan los datos ya reportados en informes y eventos espeleológicos, a partir de los cuales se calculan en este documento parámetros fisicoquímicos tan importantes como las radiaciones térmicas y las radiaciones ionizantes. Las composiciones gaseosas dentro de las cuatro cavidades subterráneas, que comprenden dos cuevas, una mina aurífera activa y una mina de azufre abandonada, también son evaluados y discutidos.

El conocimiento de las condiciones fisicoquímicas y termodinámicas de las cavidades subterráneas, además de servir para propender por la conservación de los ecosistemas y biosistemas en las cuevas naturales, puede aprovecharse para gestionar adecuadamente proyectos que faciliten el desarrollo económico de las comunidades locales donde los proyectos de explotación minera ya hayan sido abandonados.

Palabras clave: Cuevas, Cavernas, Minas subterráneas, Gases, Termodinámica, Colombia

Abstract

Physicochemical parameters are evaluated to determine the microclimatic conditions inside four underground cavities monitored by the authors over the last seven years in the departments of Huila, Cauca and Antioquia. Based on the analysis of the underground microclimates in the air-rock-water phases and comparing them with the tolerable ranges for living beings, potential uses can be proposed.

In this work, data already reported in reports and speleological events are evaluated, from which physicochemical parameters as important as thermal radiation and ionizing radiation are calculated in this document. The gaseous compositions inside the four underground cavities, which include two caves, an active gold mine and an abandoned sulfur mine, are also evaluated and discussed.

Knowledge of the physicochemical and thermodynamic conditions of underground cavities, in addition to serving to promote the conservation of ecosystems and biosystems in natural caves, can be used to properly manage projects that facilitate the economic development of local communities where mining exploitation projects have already been abandoned.

Keywords: Caves, Caverns, Underground mines, Gases, Thermodynamics, Colombia

Citación: Garzón, G., Salazar, S.P., Meza, L.F. (2024). Microclimas en cuatro cavidades subterráneas colombianas. Evaluación fisicoquímica. Boletín Geológico, 51(2), Número especial de Espeleología. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.51.2.2024.742>

1. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos prehistóricos, la humanidad aprendió a utilizar las cavidades subterráneas para protegerse de las tantas amenazas a las cuales debía enfrentarse en la superficie terrestre, entre ellas, las tormentas y descargas eléctricas atmosféricas, las intensas precipitaciones, las heladas, las sequías o las persecuciones. Habiendo aprendido a fabricar herramientas de pedernal y de cobre, los humanos primitivos aprendieron hace más de siete milenios, a hacer cavidades en la corteza terrestre (Krukowski, 1920; Dublianskyi, 2000).

La espeleología es la ciencia que estudia las cavidades subterráneas. Hay cavidades subterráneas tanto de origen natural, como antropogénico (<http://uis-speleo.org>). Existen cavidades subterráneas tipo grutas, cuevas, cavernas, minas subterráneas, fortificaciones militares o túneles. Por gruta se entiende una cavidad subterránea con una longitud (o desarrollo) menor a 5 metros y con una única entrada (<https://rgo-speleo.ru>). Una cueva es una cavidad con mayor desarrollo y con dos entradas; mientras que una caverna es más desarrollada, con varias entradas y mucho más compleja por tener varios corredores y varias galerías (<http://rgo-speleo.ru>). En nuestro planeta Tierra, se conocen cavidades dentro de la corteza terrestre, en la corteza oceánica, como también en los glaciares. En las últimas dos décadas, gracias al incremento de orbitadores con instrumentos de alta resolución en 15 cuerpos de nuestro Sistema Solar, el conocimiento sobre las cavidades extraterrestres ha ido en aumento, alcanzando los 3.545 puntos de acceso en 11 cuerpos, con procesos de formación que incluyen los volcánicos (crio y magmáticos), los de fracturamiento (tectónicos, impactos) y los de disolución (Wynne et al., 2022).

Las minas subterráneas, las fortificaciones militares y los túneles son cavidades construidas por acción humana; aunque en ciertas situaciones cuando la cavidad subterránea es muy antigua, no es fácil definirse si hubo intervención humana o hay aporte natural por efecto mecánico, gravimétrico, erosivo, tectónico, volcánico, eólico, kárstico, marino y/o bioactivo (Dublianskyi, 1977). Existen también cavidades subterráneas que han sido construidas mediante trabajos humanos, nunca con fines de exploración, ni explotación mineral, sino con propósitos artísticos y/o místicos, como refugios, o como depósitos y por tanto no se clasifican como “minas” (Dublianskyi, 2000).

Los nombres dados a las cavidades subterráneas por los lugareños no siempre coinciden con la clasificación expuesta en este trabajo que es la aceptada por diversos organismos espeleológicos nacionales e internacionales, incluida la Unión Inter-

nacional de Espeleología UIS (uis-speleo.org). Cueva es un término muy utilizado por muchos pueblos para identificar todos los tipos de cavidades subterráneas y se pueden encontrar muchos casos en todos los idiomas (Dublianskyi, 1977; Racovita, 1927; Martel, 1897), donde se le puede llamar cueva a una gruta, o a una caverna, o a una mina subterránea antigua, o a perforaciones con fines específicos.

Existen dos términos para referirse a las actividades que se desarrollan en las cavidades subterráneas: Espeleísmo y Espeleología. El primero se refiere a las actividades lúdicas en las cavidades subterráneas; mientras que el segundo término se refiere al monitoreo e/o investigación dentro de las cavidades subterráneas. El espeleísmo comprende las actividades deportivas, artísticas, religiosas, de rescate o turismo subterráneo. La espeleología incluye las actividades técnicas de monitoreo de las geoformas y las descripciones básicas de su interior; mientras que las actividades de investigación pueden realizarse desde una o varias disciplinas científicas tratando de explicar y modelar la génesis, los procesos y las potenciales interacciones que ocurren al interior y con el exterior, de las cavidades subterráneas (Meza et al., 2019).

Las cavidades subterráneas tienen atmósfera interior llamada *espeleósfera*. La espeleósfera de las grutas es igual a la tropósfera del lugar donde se ubica, tanto en su composición, como por su dinámica. Entre más desarrollado y complejo es el sistema espeleológico, mayores diferencias se encontrarán entre la espeleósfera y la tropósfera; entre las que se pueden destacar los gradientes del potencial eléctrico que se forman en la tropósfera; no existiendo esta diferencia de potencial eléctrico en la espeleósfera. En la Fig. 1 se muestran las cargas positivas y negativas que se forman en la tropósfera, generadoras de las descargas eléctricas, conocidas como *rayos*. Este fenómeno natural no ocurre dentro de las cavidades subterráneas (Meza et al., 2019).

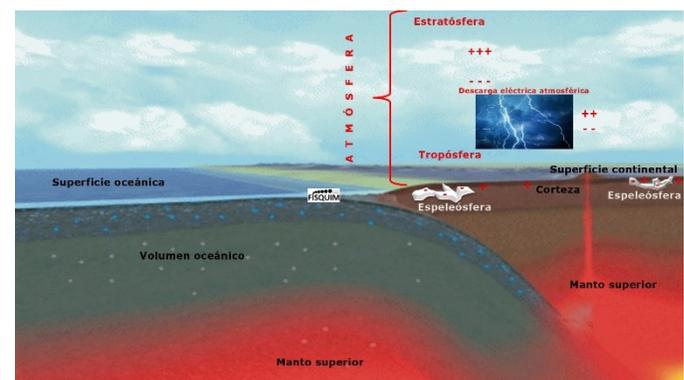


Fig. 1. Espeleósferas en la corteza terrestre y polarización eléctrica en la tropósfera

En climatología, como ciencia que se dedica al estudio de los procesos meteorológicos y sus variaciones en el tiempo cronológico, se definen claramente los conceptos de tiempo atmosférico, clima, cambio climático y microclima. *Tiempo atmosférico* es el estado temporal de la atmósfera terrestre en un específico lugar (se refiere a cómo está la atmósfera). *Clima* es el estado regular de la atmósfera de un sitio en particular (se refiere a cómo es la atmósfera). *Cambio climático* es la variación de la regularidad de la atmósfera en un determinado lugar. *Microclima* entonces, puede ser definido como un conjunto de patrones y procesos atmosféricos locales que se diferencian de su entorno (Garzón et al., 2023).

Cuando se pretende estudiar el microclima espeleoférico, es recomendable considerar desde siempre el tiempo y el clima troposférico de la zona de estudio; además de las formas y geometrías de la(s) entrada(s). Existen cavernas con corredores verticales (Fig. 2a), otras con corredores horizontales (Fig. 2b), las hay con corredores inclinados (Fig. 2c) y/o combinación de todos estos. Cuando los corredores se desarrollan de manera inclinada hacia arriba, el flujo de calor va en sentido contrario que si se desarrollara hacia abajo.

La dinámica aérea dentro de una espeleósfera es función del gradiente de la presión barométrica del lugar. Si una cavidad subterránea es claramente abierta y/o tiene caudal hídrico en su interior, se genera una diferencia de presión, moviendo las masas de aire. Así entonces, a partir de los principios de la termodinámica de los procesos irreversibles, el microclima en una cavidad subterránea puede ser descrito a través de la entalpía y la humedad de los corredores y galerías. Además de la composición de los principales gases tóxicos, explosivos, corrosivos y/o respirables allí presentes.

El conocimiento detallado de los microclimas de las cavidades subterráneas sirve para clasificarlas y gestionar de una manera adecuada su conservación, cuando las condiciones fisicoquímicas de las espeleósferas facilitan la vida de las especies que las habitan o de quienes las visitan. También existen evidencias de algunas cavidades subterráneas que son una amenaza para la vida. Las cuevas que se han formado por mecanismos tectónicos, aquellas que se encuentran sobre fallas geológicas activas, emiten gases como el radón ^{222}Rn y el dióxido de

carbono CO_2 (Heiligmann et al., 1997), que pueden acumularse en galerías cerradas o parcialmente cerradas alcanzando concentraciones peligrosas para la vida. Hay ejemplos de este tipo de cuevas en varios continentes e islas, como la Cueva de la Muerte ($10^\circ 23' 48'' \text{ N}$; $84^\circ 13' 27'' \text{ W}$; 268 msnm) cerca de San José en Costa Rica o la Cueva de Sa Bassa Blanca ($39^\circ 50' 35'' \text{ N}$; $03^\circ 10' 51'' \text{ E}$; 22 msnm) en la región de Alcudia, La Palma, Islas Baleares.

En este documento reportamos resultados de estudios realizados por los autores, algunos de los cuales han sido socializados en informes internos o en eventos organizados por la Asociación Colombiana de Espeleología ESPELEOCOL. Se pretende con este documento diferenciar los potenciales usos de las cavidades naturales (de alto valor para la biodiversidad) y los potenciales usos de las cavidades antropogénicas abandonadas por procesos mineros. El conocimiento de las condiciones fisicoquímicas y termodinámicas de las cavidades antropogénicas sirve para gestionar adecuadamente proyectos que dinamicen el desarrollo económico de las comunidades locales (campesinas, indígenas, afrodescendientes, raizales). Se han identificado zonas aisladas en territorio colombiano, donde las comunidades vivían de la producción de coca y/o de explotaciones mineras, y disponen de minas subterráneas abandonadas que podrían servir para generar proyectos concretos. Los potenciales aprovechamientos en beneficio de las comunidades locales, es la principal motivación del presente artículo.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 Condiciones marco

Las cavidades subterráneas más antiguas son desde una perspectiva litológica e hidrogeológica, el producto de la agresión de las rocas de origen marino y continental, con diferentes eventos tectonomagmáticos ocurridos en diferentes eventos geológicos. En este estudio se reportan resultados comparativos en dos cuevas y dos minas con diferentes orígenes geológicos. En la Tabla 1 se indican los tipos de roca y algunas características litológicas e hidrogeológicas (Morales et al., 2001; Gómez et al., 2023; Ideam, 2023) donde se encuentra cada una.



Fig. 2. Orientación de corredores en cavernas con una entrada. A. Entrada vertical; B. Entrada horizontal; C. Entradas inclinadas

Tabla 1. Descripción marco de las cuevas y minas estudiadas

Sistema	Nombre	Unidad Geológica	Litología	Hidrogeología
Cueva	El Indio	Formación Saldaña	Compuesto por tobas, aglomerados y lavas; ocasionalmente, intercalaciones de capas rojas de arenitas líticas y limolitas	De acuerdo con el estudio nacional del agua del IDEAM, las cuevas y minas de caso de estudio pertenecen a la provincia hidrológica de basamento acuífugas.
		Monzogranito de Altamira	Se observa una variación monzogranítica y cuarzosilicática El miembro inferior se caracteriza 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	
Mina	El Tigre	Formación Caballos	Se asocia las capas de arenitas líticas y calcáreas generalmente glauconíticas con esta Formación	Localmente, los acuíferos contenidos en las rocas sedimentarias como las arenitas y calizas presentan porosidad primaria y secundaria, permeabilidad media a alta y una capacidad específica promedio media.
		Formación Villeta	Andesitas porfiríticas del Cuaternario	
		El Vinagre	Granodiorita, tonalita y cuarzodiorita	
	El Guaico	Batolito		
		Antioqueño		

2.2 Localización de las cuatro cavidades subterráneas

En la Fig. 3 se muestra la ubicación de las cuatro cavidades subterráneas objeto de este estudio. La Mina aurífera activa El Guaico de Santo Domingo, Antioquia se observa que es la más nórdica entre estas, localizada a 70 km por carretera desde el casco urbano del municipio de Medellín. La Cueva del Tigre se encuentra localizada en el municipio de Yaguará, Huila a 54 km de la ciudad capital Neiva. La Mina abandonada El Vinagre de Puracé donde por varias décadas se extrajo azufre, se encuentra a 34 km del casco urbano de la ciudad de Popayán en el departamento del Cauca. La Mina El Indio, localizada dentro del Parque Nacional Natural Los Guácharos, se encuentra a 190 km al sur de Neiva, capital del departamento del Huila, en Colombia.

Cueva del Indio del PNNG, Huila. Para llegar a la Cueva del Indio (01° 36' 47" N; 76° 06' 43" W, 2.188 msnm), localizada dentro del Parque Nacional Natural Los Guácharos PNNG, se requiere gestionar un permiso que otorga la Dirección de Parques Nacionales Naturales de Colombia PNNC.

Desde el municipio de Pitalito en el departamento del Huila, se debe viajar al municipio de Palestina (Huila) y luego a la vereda La Mensura, donde termina el acceso vehicular. Desde este lugar se debe continuar caminando acompañado por un guía profesional o un funcionario que designe PNNC, para ingresar al PNNG por la quebrada La Cascajosa, pasando por el Robledal donde está el Mirador para luego llegar a La Hacienda. En el sector de Los Cedros y a pocos minutos está la entrada a la Cueva del Indio. En la Fig. 4 se ilustra un esquema

para el acceso a la Cueva del Indio del PNNG (González y Morales, 1990).

Cueva del Tigre de Yaguará, Huila. Para llegar a la Cueva del Tigre (02° 44' 26" N; 75° 28' 59" W, 814 msnm), desde el municipio de Yaguará en el departamento del Huila, se debe viajar por la vía que bordea el sector occidental de la Represa de Betania, hasta la vereda Upar donde se encuentran los guías turísticos. En la Fig. 5 se muestra un esquema del acceso a esta cueva.

Mina El Vinagre de Puracé, Cauca. A la Mina de azufre El Vinagre del Resguardo Indígena de Puracé (02° 21' 02" N; 76° 24' 32" W, 3.611 msnm), se accede viajando por una vía en aceptable estado desde la capital del departamento del Cauca, Popayán hasta el municipio de Puracé recorriendo 32 km. Luego, viajando por carretera destapada por la vía que conduce a la Plata, Huila, donde a 10 minutos está señalizado el ingreso a la Mina, que es la misma vía de acceso a la cima del Volcán Puracé. En la Fig. 6 se muestra un esquema de acceso.

Mina El Guaico de Santo Domingo, Antioquia. A la Mina aurífera El Guaico (06° 31' 02" N; -75° 07' 34" W, 1.280 msnm) se llega desde el municipio de Medellín viajando en dirección al municipio de Cisneros. En el Túnel La Quebra se sale de la autopista para ingresar al municipio de Santo Domingo, donde se accede a la Mina. La Fig. 7 muestra la localización de la Mina aurífera El Guaico de Santo Domingo, Antioquia.



Fig. 3. Ubicación de las cuatro cavidades subterráneas de este estudio

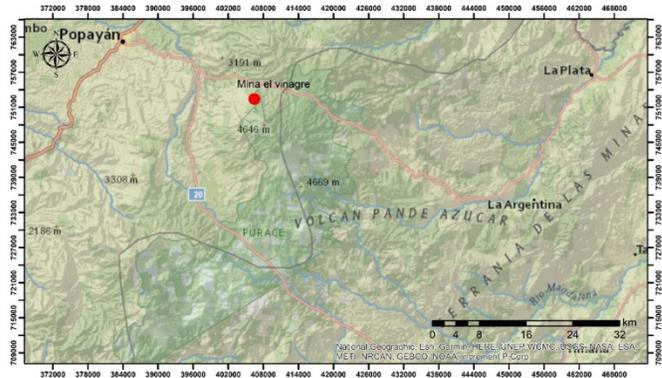


Fig. 6. Vía de acceso a la Mina de Azufre El Vinagre del Resguardo Indígena de Puracé

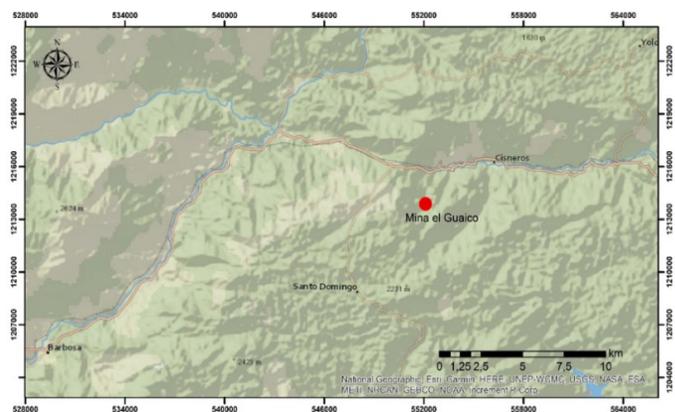


Fig. 7. Vía de acceso a la Mina de oro El Guaiuco de Santo Domingo, Antioquia

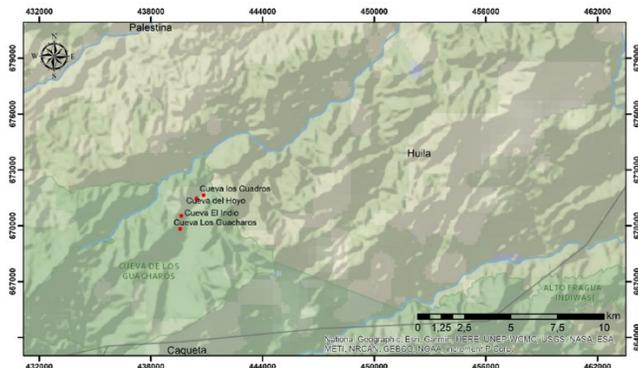


Fig. 4. Esquema de acceso a la Cueva del Indio del PNNG



Fig. 5. Vía de acceso a la Cueva del Tigre de Yaguará

3. MÉTODO

El microclima de una galería o de un corredor de una cavidad subterránea se describe a través del flujo de calor, la humedad y la composición gaseosa en la espeleósfera, tomando en consideración la estructura física (dimensiones, geometría, número de entradas, orientación de los corredores) y la región climática donde se encuentre localizada. El calor de una espeleósfera facilita la formación de vapor interno, definiendo según lo indica la Segunda Ley de la Termodinámica, la dirección del flujo de las masas aéreas, y por tanto la presión barométrica del lugar.

Por esto, en desarrollo de los trabajos en campo, se realizaron cuantificaciones de los contenidos del vapor, para calcular las humedades relativas; se midieron las temperaturas externas e internas de cada galería y corredores, para calcular las respectivas entalpías en las galerías más encerradas. Igualmente se midieron las presiones barométricas y los flujos de las masas de aire, para definir la dirección de los vientos donde esta dinámica aérea se encontraba (Fig. 8).

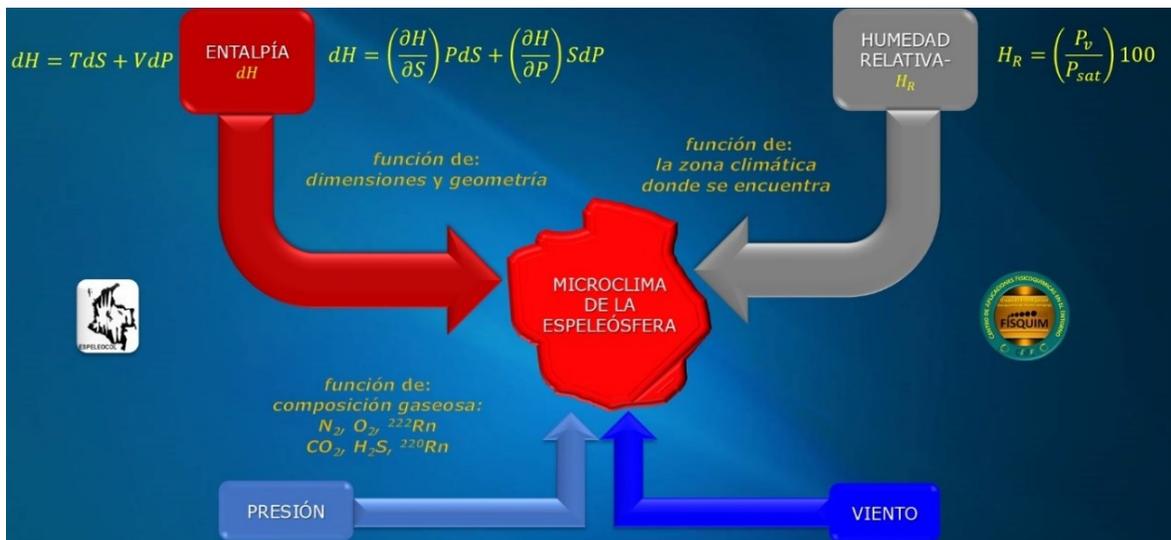


Fig. 8. Parámetros que definen un microclima espeleoférico

3.1 Temperatura del aire

La temperatura es una magnitud que refleja el nivel térmico de un lugar u objeto. Es la capacidad que tiene un objeto o material para ceder o perder energía calorífica e indica en qué sentido fluye el calor: de mayor a menor temperatura, como lo indica la Segunda Ley de la Termodinámica. El calor es una forma de energía.

Los métodos tradicionales y muy comunes utilizados para medir la temperatura de un fluido consisten en:

- Utilizar las propiedades del mercurio o el “galistán”, líquidos que fácilmente responden a los efectos del calor; o
- Cuantificar las variaciones de la fuerza electromotriz, por efecto del calor en una unión de dos metales de diferente naturaleza.

En el primer caso, se utilizaba un termómetro de mercurio Hg, el cual fue prohibido por su alta toxicidad y fue reemplazado por una aleación de los elementos Galio Ga, Indio In y Estaño Sn conocido como “galistán”, de fácil adquisición en el mercado. En el segundo caso, se utiliza un sistema termopar. El primer caso se usa para cuantificar temperaturas menores a los 300°C; mientras que los sistemas termopar, se usan para cuantificar temperaturas en un rango mucho más amplio. En el presente trabajo se utilizó un termómetro digital PROTME X MS6508.

3.2 Humedad relativa del aire

La humedad es una magnitud que indica la cantidad de vapor de agua en el aire. El aire dentro de una cavidad subterránea es una mezcla de aire seco y vapor de agua. El aire seco está

compuesto por mezclas de diversos gases que ejercen una presión parcial, donde el vapor de agua es nulo. La humedad del aire es máxima cuando se satura y no puede permanecer en el aire, dando origen a gotas de condensación en las rocas o en los espeleotemas. Así pues, la humedad relativa H_R de una cavidad subterránea varía entre 0 para el aire seco, y 100 para el aire saturado de vapor de agua a una determinada temperatura, conocida como presión de saturación P_{sat} y se calcula con base en la siguiente ecuación:

$$H_R = \left(\frac{P_v}{P_{sat}} \right) 100 \quad [Ecuación 1]$$

La humedad relativa en general, se puede medir utilizando dos termómetros: uno en condiciones secas y otro en las condiciones de humedad del sitio que se desea conocer. En la antigüedad, los egipcios y los persas realizaban esta clase de mediciones en ambientes desérticos. Secaban la arena y la pesaban, obteniendo un primer dato equivalente a la medición que se puede realizar con un termómetro en condiciones secas. Luego pesaban el mismo volumen de arena en condiciones normales. La diferencia muestra la cantidad de humedad, que, expresada en unidades de 100, se obtiene la humedad relativa en términos de porcentaje. Esta es la base fundamental como se adelantaron las mediciones en campo, cuyos resultados de humedad relativa se reportan, utilizando tecnología científica conocida como psicrómetro de precisión. Se utilizó un equipo PROTME X MS6508.

3.3 Presión barométrica

La presión entendida como una fuerza ejercida en dirección perpendicular a un área, sirve para describir el efecto que los gases que componen el aire interno en un sistema espeleológico ejercen sobre las rocas y los espeleotemas. De acuerdo con la Ley de Dalton la presión total dentro de un espeleosistema, es la suma de las presiones parciales que ejercen cada uno de los gases espeleosféricos:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Para los fluidos cuya densidad varía con la altura, la presión barométrica disminuye a medida que aumenta la altura; y, hacia el interior de la Tierra, aumenta, en función de la fuerza de la gravedad terrestre:

$$\frac{dP}{dz} = \rho g \quad [\text{Ecuación 3}]$$

Los primeros sistemas inventados para cuantificar esta magnitud física en el aire consistían en establecer cuánto se mueve un líquido (se usó el mercurio) en un tubo vacío, conectado a otro tubo expuesto al aire que se desea medir. Los actuales sistemas de medición cuantifican la deformación de una membrana que sirve de tapa a un pequeño tubo: la membrana se deforma en respuesta a la fuerza que sobre ella ejerce el movimiento de los gases del ambiente que se mide. En los trabajos de campo realizados en los estudios que se reportan en el presente artículo, se utilizó un barómetro anerode digital IPX4.

3.4 Viento espeleosférico

La presión al interior de las cavidades subterráneas se relaciona directamente con el flujo del viento espeleosférico. El viento fue la primera variable que se midió en meteorología atmosférica. En sus inicios se utilizaban veletas para conocer la dirección del viento. Estos sistemas evolucionaron hasta los sistemas digitales que hoy se utilizan, ya sea con anemómetro de hilo caliente o anemómetro sónico. En los estudios adelantados en este trabajo se utilizó un anemómetro de hilo caliente tipo Sefram 9862, donde el viento se calcula en función de la resistencia eléctrica.

3.5 Morfometría subterránea

La morfometría es el estudio y descripción tridimensional de la covariación de la forma con factores subyacentes. Para lograrlo, se toman datos de longitudes y rumbos dentro de las cavidades subterráneas, utilizando telémetros láser (Fig. 9A) para posteriormente mediante algoritmos específicos, plantear representaciones 3D de las galerías y los corredores.

3.6 Gases endógenos

La presencia de gases espeleosféricos generan presiones parciales. De acuerdo con la Ley de las Presiones Parciales, la presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales de sus componentes:

$$p = \sum_{i=1}^n p_i \quad [\text{Ecuación 5}]$$

En desarrollo del presente trabajo, se encontraron espeleósferas en ambientes kársticos con mezcla de gases de N_2 , O_2 , CO_2 , vapor (H_2O) y Rn como sus principales componentes. La presión total de la espeleófera de los ambientes kársticos es la sumatoria de las presiones parciales que ejerce cada uno de los gases:

$$p_{\text{espeleósfera}} = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{CO_2} + p_{H_2O} + p_{Rn} \quad [\text{Ecuación 6}]$$

En estas espeleósferas se midieron las concentraciones de los principales gases, utilizando filtros selectivos para disminuir los contenidos de humedad y mediante uso de pequeñas bombas, se succionó el aire espeleosférico para permitir su paso a través de sensores selectivos para N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O y Rn. En condiciones muy diluidas, la presión parcial de cada componente es:

$$p_i = \frac{n_i RT}{V} \quad (\text{Ecuación 7})$$

La presión total en la espeleósfera se calcula combinando las ecuaciones (5) y (7):

$$p_{\text{espeleósfera}} = \frac{RT}{V} \sum n_{N_2} + n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{Rn} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Con los datos de las concentraciones de los gases medidos en campo, se calculan las composiciones molares del N_2 (n_{N_2}), O_2 (n_{O_2}), CO_2 (n_{CO_2}), H_2O (n_{H_2O}) y Rn (n_{Rn}) espeleosféricas.

Es importante considerar que el ejemplo dado es válido en ambientes kársticos. Pues en otros ambientes, se pueden encontrar otros gases espeleosféricos. Por ejemplo, en los ambientes subterráneos volcánicos, se pueden también encontrar gases como H_2S , SO_2 , H_2 , He. En algunos otros ambientes, también CH_4 , N_2O , CO, HCl.



Fig. 9. Instrumentos utilizados para realizar mediciones de algunas variables espeleoféricas: A. Telémetro laser; B. Jaulas de Faraday para ^{222}Rn y ^{220}Rn

3.7 Partículas alfa de la desintegración radiactiva del gas radón ^{222}Rn

En el presente trabajo se reportan datos de los contenidos del gas radón ^{222}Rn dentro de las cuevas y minas estudiadas.

Los núcleos de los átomos están formados por protones y neutrones que se mantienen unidos por la denominada *fuerza fuerte*. Algunos núcleos tienen una combinación de protones y neutrones que no conducen a una configuración estable, a estos núcleos se les denomina *radiactivos*. Los núcleos con configuración inestable tienden a aproximarse a la configuración estable emitiendo ciertas partículas energéticas.

Las desintegraciones radiactivas se clasifican por el tipo de partícula energética emitida. El gas radón ^{222}Rn se desintegra produciendo partículas alfa. La desintegración alfa, emite un núcleo de Helio (dos protones y dos neutrones) y produce un nuevo elemento químico cuyo número atómico es dos unidades menos (dos posiciones atrás en la Tabla Periódica de los elementos químicos de D.I. Mendeleiev), y cuya masa disminuye en cuatro unidades.

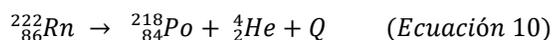
La actividad de una fuente radiactiva es el número medio de procesos de decaimiento por unidad de tiempo. El decaimiento radiactivo está matemáticamente descrito en términos de probabilidades y velocidades de decaimiento promedio:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (\text{Ecuación 9})$$

donde, N es el número de núcleos de la misma naturaleza; t es el tiempo;

λ es la constante de desintegración que no depende del tiempo. Es una constante característica del elemento que se desintegra.

La desintegración natural del gas radón endógeno, produce partículas alfa de acuerdo con la siguiente ecuación:



El gas radón ^{222}Rn que emana del interior de la tierra en una cavidad subterránea, se desintegra de manera natural, produciendo un elemento nuevo de polonio sólido $^{218}_{84}\text{Po}$ y un energético núcleo de helio ^4_2He (conocido como partícula alfa). Q equivale a la energía emitida por la desintegración radiactiva del gas radón en la espeleósfera.

En campo, se realizan mediciones temporales del efecto que las partículas alfa ^4_2He ejercen en el aire dentro de una jaula de Faraday (Fig. 9B), para descargar un electrodo y/o para generar una específica corriente eléctrica, excitando una película de sulfuro de zinc ZnS activado con plata, ZnS(Ag) (Garzón, 2009) dentro de una Celda de Lucas. De manera simultánea, se realizan mediciones de la radiación gamma espeleoférica.

Los sistemas de mediciones deben disponerse dependiendo el medio que se desea medir. En las Fig.10 se muestran las formas de capturar la información cuando se quieren medir los isótopos ^{222}Rn y ^{220}Rn espeleoféricos dentro de una fractura de roca (A) o en la interfase aire-roca de la pared (B).

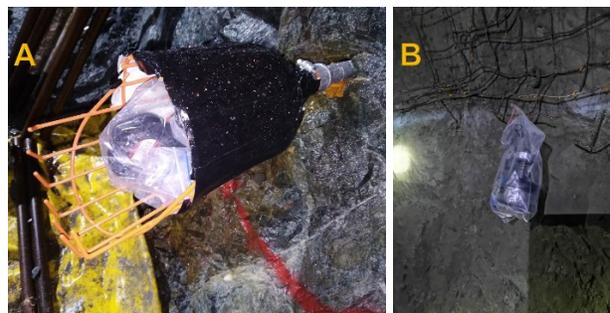


Fig. 10. Captura y medición de los isótopos radiactivos ^{222}Rn y ^{220}Rn : A. dentro de una fractura de roca; B. en la interfase aire-roca

4. RESULTADOS

4.1. Parámetros morfométricos

Cueva del Indio del Parque Nacional Natural Los Guácharos (PNNG). Se clasifica morfométricamente como un sistema complejo tipo caverna, compuesto por un corredor turístico con más de un kilómetro de desarrollo casi horizontal y por las siguientes diez (10) galerías, igual de complejas: Laberinto, Columnas, Decámetro, Pizarras, Borugas, Apagón, Bóvedas, Cirios, Altar y Araña, con un desarrollo horizontal de kilómetro y medio (Morales et al., 2001). Algunas de las galerías como Laberinto, tienen sifones de longitud y profundidades no medidas hasta el momento. Durante los estudios realizados en el año 2017, se identificaron dos entradas al corredor principal: y una entrada en cada una de las galerías Laberinto, Borugas y Bóvedas (Fig. 11 y 13).

Cueva del Tigre de Yaguará, Huila. Está dividida en dos partes: una zona seca y una zona húmeda, recorrida esta última por un pequeño caudal de agua subterránea. La zona seca (ZS) de unos 150 metros de desarrollo es utilizada con fines turísticos, y se caracteriza por su estrechez, donde en algunos corredores de 20 metros de longitud, la altura se reduce hasta ~0,4 m. La zona húmeda (ZH) más ventilada, tiene una longitud de 120 m. En la Tabla 2 se puede observar que la Cueva del Tigre es la menos desarrollada, con un pequeño volumen espeleoférico de sólo 6.750 m³. De esta cueva sólo se evidenció la existencia de una entrada por la zona seca y otra por la zona húmeda (Fig.11 y 15).

Mina El Guaico, municipio de Santo Domingo, Antioquia. No se lograron estudiar todas las zonas de explotación por razones estratégicas de la empresa a cargo. Se estudiaron sectores que sumados alcanzan un desarrollo de 1.200 m, donde las alturas medidas con láser son hasta de 30 m. El promedio de ancho de los corredores es de 10 m y el promedio de altura de 12 m (Tabla 2), para un volumen total de los sectores autorizados para visitar, igual a 144.000 m³. La mina El Guaico es la más profunda entre las cuatro comparadas, con un desnivel que alcanza los -280 m (Fig.11 y 12).

Mina El Vinagre, Resguardo Indígena de Puracé, Cauca. Tiene varios sectores, siendo el principal con un desarrollo casi horizontal de 1.600 m y promedios de 13 y 16 m en el ancho y alto de sus corredores. El sector más interno, menos ventilado y zona tóxica (ZT) está entre los 1.280 y los 1.600 m desde la bocamina (Fig.11, 14 y 16).

El mayor desnivel desde la entrada, o más profunda entre las cuatro comparadas, es la Mina El Guaico de Santo Domingo, Antioquia, con un desnivel de -280 m. El desarrollo de los corredores y galerías en la Cueva del Tigre de Yaguará, la Cueva del Indio del PNNG y la Mina El Vinagre de Puracé son casi horizontales, con desniveles que van desde los -20 a los -90 m (Tabla 2).

Se encontró que la Cueva del Indio del PNNG es la cavidad subterránea relativamente con mayor volumen espeleoférico, con un valor calculado en 382.200 m³; seguido por la Mina El Vinagre de Puracé con 332.800 m³; luego la Mina El Guaico de Santo Domingo con un volumen calculado para la zona estudiada con un valor de 144.000 m³; y la cavidad que aquí reportamos con menor volumen es la Cueva del Tigre de Yaguará con un volumen sumando la zona seca ZS y la zona húmeda ZH de 6.750 m³ (Tabla 2). Estos valores son muy importantes cuando se trate de buscarle usos a estos espacios.

Para obtener los volúmenes totales, se realizaron mediciones del rumbo, ancho y alturas en recorridos por los corredores,

cada 50 m o menos. En el ejemplo que se muestra de las mediciones realizadas dentro de la mina El Vinagre en noviembre de 2023, con esta información se calcularon volúmenes por tramos para finalmente calcular el volumen para los primeros 1.280 m (Tabla 3). Para los últimos 320 m, que es el sector más contaminado con gases tóxicos ZT, principalmente de sulfuro de hidrógeno H₂S que se transfiere desde la chimenea del Volcán Puracé, se debió hacer una extrapolación de los promedios de la altura y el ancho, para finalmente calcular el volumen espeleoférico total, como se muestra en la última fila de la Tabla 3.

4.2 Fisicoquímica subterránea

Dentro de las cavidades subterráneas hay factores que pueden facilitar la acumulación o dilución de los gases endógenos, la transferencia de calor, los cambios de la humedad y las presiones espeleoféricas, así como la existencia o ausencia de vientos.

4.2.1 Parámetros físicos de la espeleósfera.

En la Fig. 12 se muestra un esquema de la mina El Guaico de Santo Domingo, Antioquia, donde se indican y nombran los sitios de las galerías y los nombres de las estaciones para las mediciones de las variables físicas, como las mostradas en la Tabla 4. La tercera columna muestra las cotas medidas en la entrada (bocamina) y en seis estaciones, observándose que en el recorrido en esta mina se desciende $\Delta h = -280$ m, lo cual se ve reflejado en los datos registrados para la presión barométrica P_B (cuarta columna) con valores para todo el recorrido, entre 867,9 y 891,8 hPa, considerados relativamente cercanos, o condiciones espeleoféricas isobáricas.

La temperatura del aire que generalmente se reporta en los informes meteorológicos, es conocida como temperatura de bulbo seco T_S , pues esta variable física se registra usando los termómetros convencionales (de mercurio, termistor, termopar, IR), descartando la humedad en el aire.

En la Tabla 4 se reportan datos de las temperaturas del aire espeleoférico, tanto en la bocamina (entrada a la mina), como en las seis estaciones, con valores T_S entre el más bajo de 24,2°C registrado en la estación 1194 S, y el más alto de 25,4°C registrado en la estación 1064 SW más profunda; mientras que en la bocamina se registró la mayor temperatura de 26,5°C. Todas estas temperaturas muestran un ambiente térmico muy confortable.

En la Tabla 4, columnas quinta y sexta, se puede observar una relación directa entre las temperaturas seca T_S y húmeda T_H , las cuales son funciones directas de la humedad relativa H_R (última columna de la Tabla 4). El punto de rocío T_R (penúltima columna) representa la temperatura más baja, a la cual se puede

enfriar el aire espeleoférico en dependencia de la humedad relativa H_R . En el punto de rocío, el aire espeleoférico tiene una humedad relativa del 100 %, donde un enfriamiento adicional, produce condensación de agua en las rocas, en lugar de reducir la temperatura circundante del aire.

Los aspectos estructurales de las cavidades subterráneas y los flujos de las aguas subterráneas generan cambios de las presiones espeleoféricas lo que facilita el movimiento de masas de aire, conocidos como vientos espeleoféricos. En la Fig. 13 se muestra con flechas, la dirección de los vientos en horario diurno, dentro de la Cueva del Indio del PNNG.

4.2.2 Gases endógenos

Los gases endógenos son aquellos que después de circular por la corteza terrestre, se transportan por mecanismo de advección a través de las rocas fracturadas de acuerdo con la Ley de Darcy, hasta la espeleósfera. Dentro de las cavidades subterráneas, los gases componentes del aire interno tienden a distribuirse en vertical, según sus densidades, en función de la temperatura y las presiones espeleoféricas. En la Fig. 14 se muestra una distribución de los gases endógenos dentro de una cavidad subterránea. Esta distribución puede ser afectada por los

vientos dentro de las cuevas, cavernas o minas. El gas metano CH_4 debido a su relativa baja masa molecular de 16 uma y por tanto su baja densidad, tiende a permanecer en las partes más altas dentro de los corredores y galerías. Por el contrario, los gases más pesados como el torón $^{220}_{86}Rn$ y el radón $^{222}_{86}Rn$ tienden a permanecer en las partes bajas, tal como se observa en la Fig. 14.

El cuerpo humano tiene rangos de tolerancias para los gases. Cuando el aire que se respira contiene dióxido de carbono $CO_2 > 5,0 \%$ v, genera una respiración fatigosa en las personas y animales. Al igual que el exceso de los óxidos de nitrógeno NO_x , al respirar el sulfuro de hidrógeno H_2S por encima de 5,0 ppm genera sofocamiento.

El metano CH_4 es explosivo por encima del 1,0 % v. El monóxido de carbono CO a concentraciones superiores a las 50 ppm, produce intoxicación. El dióxido de nitrógeno NO_2 y el dióxido de azufre SO_2 , son tóxicos a relativas altas concentraciones en la espeleósfera. De la misma manera, hay gases endógenos de origen radiactivo como el radón $^{222}_{86}Rn$, el torón $^{220}_{86}Rn$ y el actinon $^{219}_{86}Rn$, los cuales presentan propiedades heréticas (Garzón, 2009).

Tabla 2. Parámetros morfométricos promedios de las cuatro cuevas reportadas en este trabajo

Cavidad subterránea	Desarrollo [m]	Ancho (Promedio) [m]	Alto (Promedio) [m]	Desnivel [m]	Volumen [m ³]
Cueva del Indio	~2.450	12	13	-30	382.200
Cueva del Tigre	270	5	5	-20	6.750
Mina El Guaico	1.200	10	12	-280	144.000
Mina El Vinagre	1.600	13	16	-90	332.800

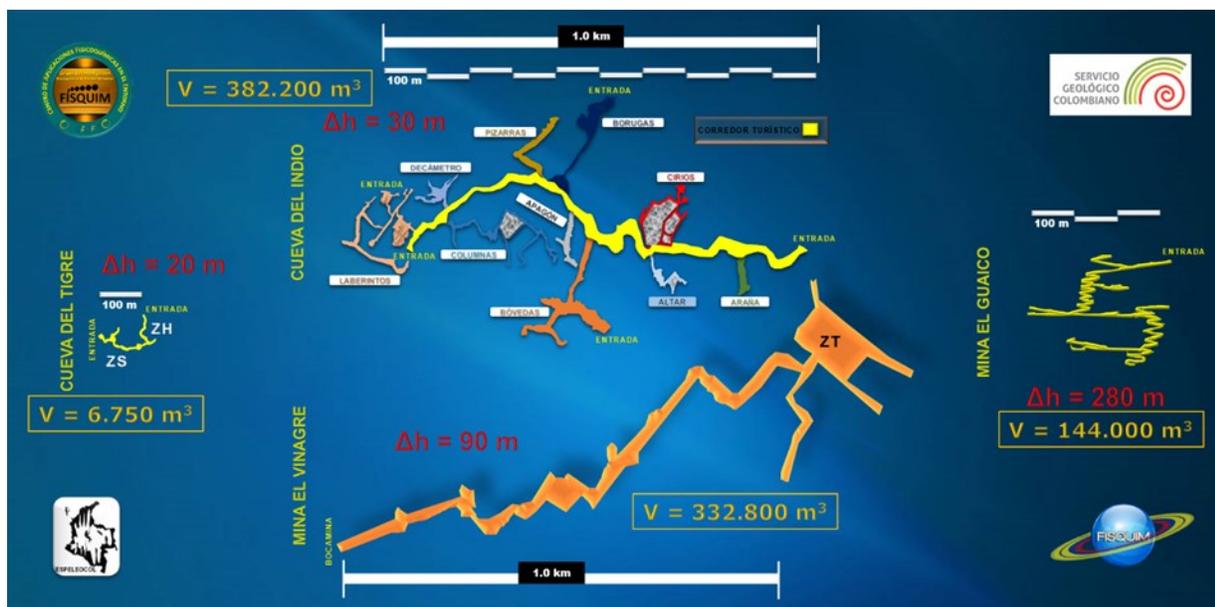


Fig. 11. Comparativo morfológico de cuatro sistemas espeleológicos estudiados en los departamentos de Huila, Cauca y Antioquia

Tabla 3. Datos longitudinales y angulares dentro de la mina de azufre El Vinagre de Puracé

Recorrido	Rumbo	Ancho	Altura	Volumen
[m]	[Grados]	[m]	[m]	[m ³]
0	170	6,5	6,5	2.112,5
50	170	10,5	6,8	3.570,0
100	175	17	10,18	2.076,7
112	175	17	10	6.460,0
150	175	17	10	2.040,0
162	140	8	8	768,0
174	140	8	8	1.792,0
200	150	19	12	6.156,0
227	140	12	12	4.320,0
250	140	10	15	15.000,0
350	250	8	16	3.840,0
380	160	15	15	33.750,0
530	185	18	15	5.400,0
550	185	18	18	32.400,0
650	235	12	12	7.200,0
700	240	12	16	2.880,0
715	185	17	17	10.115,0
750	160	13	22	14.300,0
800	250	12	15	9.000,0
850	260	14	18	12.600,0
900	170	13	22	14.300,0
950	160	18	25	22.500,0
1.000	70	12	25	6.000,0
1.020	160	12	25	6.000,0
1.040	75	12	25	9.000,0
1.070	70	12	22	2.640,0
1.080	70	11	17	9.350,0
1.130	160	13	20	39.000,0
1.280	160	13	22	$\sum_{parcial}=284.570,2$
Promedio [m]		13	16	$\sum_{total}=332.800$

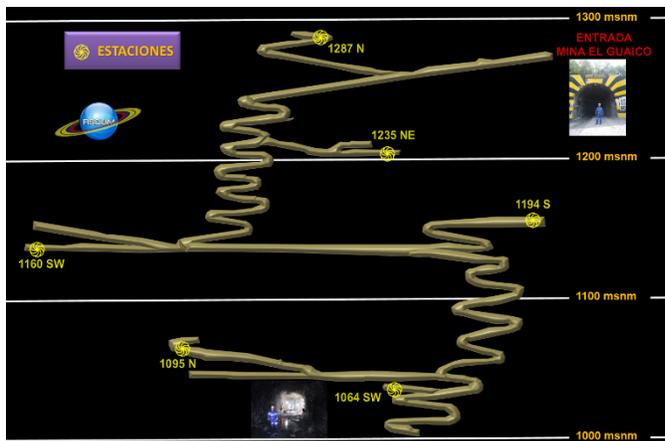


Fig. 12. Estaciones en los corredores estudiados en la mina El Guaico de Santo Domingo



Fig. 13. Dirección de los vientos espeleoféricos en horario diurno, en la Cueva del Indio del Parque Nacional Natural de los Guácharos

Tabla 4. Parámetros físicos medidos en la mina El Guaico de Santo Domingo

Estación	Corredor	Altitud [msnm]	P _B [hPa]	T _S [°C]	T _H [°C]	T _R [°C]	H _R [%]
Bocamina		1.280	868,7	26,5	22,6	21,1	72,1
1	1287 N	1.287	867,9	25,3	23,0	22,2	83,1
2	1235 NE	1.235	873,4	25,3	23,0	22,1	82,8
3	1194 S	1.194	877,8	24,2	22,5	21,9	87,0
4	1160W	1.160	881,5	24,3	21,7	20,6	79,7
5	1095 N	1.095	888,5	25,1	23,8	23,4	90,1
6	1064 SW	1.060	891,8	25,4	24,3	24,0	91,7



Fig. 14. Distribución vertical de los gases espeleoféricos

En la Fig. 15 se muestran las concentraciones del gas radiactivo radón ^{222}Rn medidas dentro de la Cueva del Tigre de Yaguará, Huila (Meza et al., 2019). Se observan dos sectores entre las estaciones 5 - 13 donde se encontraron acumulaciones de gas radón ^{222}Rn , causada por la mayor compactación de las rocas y menores gradientes de presión. En estos dos sectores las concentraciones de radón ^{222}Rn alcanzaron valores entre 1.258 y 20.128 Bq/m³.

En la zona seca ZS por la entrada A, estaciones 1 – 4 se midieron valores promedios de 222 Bq/m³, considerados relativamente bajos. En este sector, la baja radiación ionizante está favorecida por la cercanía a la entrada A, así como a los vientos que fluyen por zonas fracturadas de las rocas. En la zona húmeda demarcada con color azul, se observan las flechas que indican la dirección del viento espeleoférico, en dirección de la estación 29 a la 14. A través de la entrada B y facilitado por el fracturamiento de roca, además del rol que juega el flujo de aguas subterráneas generando gradientes de presión, se midieron los valores más diluidos del gas radón ^{222}Rn , con promedios de 37 Bq/m³.

Por otro lado, en la Mina El Vinagre de Puracé se midieron simultáneamente varios gases endógenos, en un recorrido desde la Bocamina hasta los 1.600 metros y regresando a la Bocamina, cuyos datos promedios se muestran en Tabla 5 y se ilustran gráficamente en la Fig. 16. Desde la bocamina hasta los primeros 850 m, los gases O₂ y N₂ tienen la misma composición que el aire externo, pues los corredores tienen varios tambores y un tajo abierto que facilita el intercambio de masa entre el interior y el exterior. Entre los 900 m y el final del corredor minero a 1.600 m, se crean otras condiciones microclimáticas observándose mayores concentraciones de CO₂, H₂S y CO, disminuyendo en este sector los contenidos de O₂. La zona tóxica ZT de la Mina El Vinagre está en la estación E3, corredor La

Novena, donde está la fuente termal FT1.

4.2.3 Radiación térmica espeleoférica

El calor es energía térmica en tránsito. Su medida es la temperatura. A mayor calor suministrado mayor temperatura, más choques entre partículas, más cinética. El microclima espeleoférico se define a partir de procesos como la transferencia de calor, el cual puede ser descrito en ciertas circunstancias a través de la función de estado termodinámica conocida como entalpía.

En la Tabla 6 se indican los resultados de los cálculos termodinámicos para las presiones, humedades y densidad del aire espeleoférico, con los que se calcularon las entalpías de los corredores de la Mina de azufre El Vinagre de Puracé. Esta radiación térmica expresada a través de la entalpía total, son superiores a las calculadas para las otras tres cavidades subterráneas incluidas en este trabajo.

En la Fig. 17 se observa el incremento de la radiación térmica en términos de entalpías totales, a medida que los corredores se acercan a la chimenea principal del Volcán Puracé. Se puede entender también desde la Fig. 17, que a través de las rocas fracturadas hay transferencia de calor y de masa desde la chimenea volcánica hacia los depósitos de aguas subterráneas, las cuales se transforman en fuentes termales, como las visualizadas en los tres manantiales (FT1, FT2 y FT3) dentro de la Mina El Vinagre.

Las mediciones y cálculos realizados en el corredor La Novena (E3) presenta los contenidos más altos de gases: 980 ppm de dióxido de carbono CO₂; 17,2 ppm de sulfuro de hidrógeno H₂S, 7,0 ppm de monóxido de carbono CO y los menores contenidos de Oxígeno O₂; así como la mayor radiación térmica traducida a 8.950 kJ/mol.

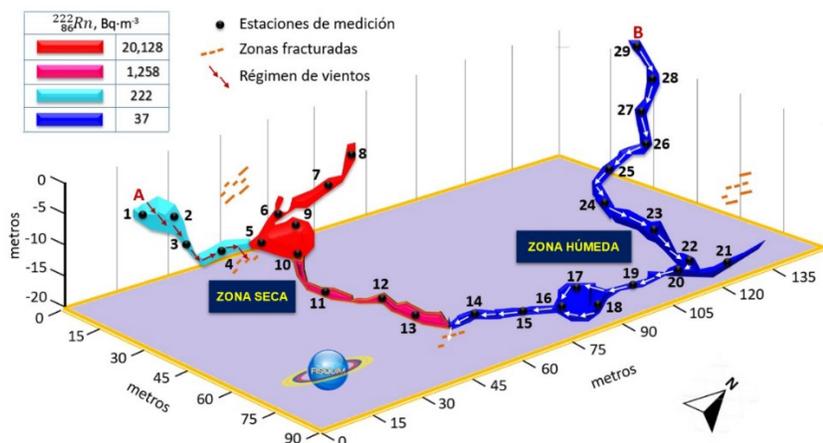


Fig. 15. Dirección diurna del viento y contenidos de gas radón dentro de la Cueva del Tigre de Yaguará, Huila (Meza et al., 2019)

Tabla 5. Gases endógenos en la Mina El Vinagre de Puracé, tomados entre el 18 y el 21 de noviembre de 2023

Estación	Corredor	O ₂ [% v]	CO ₂ [ppm]	CH ₄ [ppm]	CO [ppm]	H ₂ S [ppm]	SO ₂ [ppm]	NO ₂ [ppm]	NO [ppm]
Bocamina		20,8	500	<0,5	ND	ND	1,0	ND	ND
E1	FT3	20,7	700	<0,5	ND	1,3	ND	>1,0	ND
E2	Niño	20,7	750	<0,5	ND	6,7	ND	>1,0	ND
E3	La Novena	20,2	980	<0,5	7,0	17,2	ND	>1,0	ND
E4	La Séptima	20,3	930	<0,5	3,6	9,6	ND	>1,0	ND
E5	Emergencia	20,4	860	<0,5	1,0	11,2	ND	>1,0	ND
E6	La Sexta	20,3	870	<0,5	1,0	9,0	ND	>1,0	ND

ND – No Detectado; ppm – partes por millón

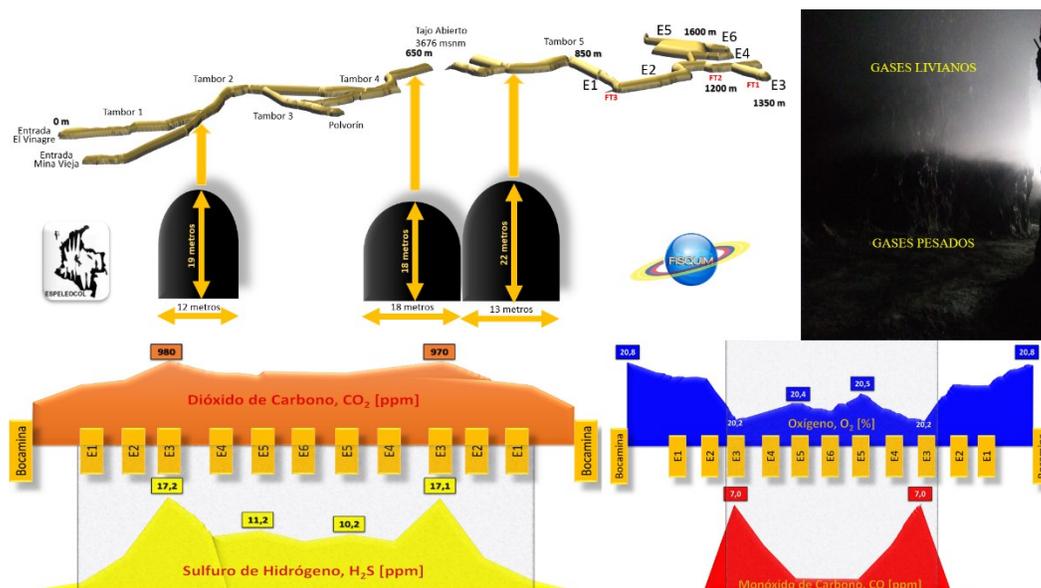


Fig. 16. Gases medidos dentro de la Mina El Vinagre de Puracé entre el 18-21 de noviembre 2023

Tabla 6. Resultados de los cálculos termodinámicos para los corredores de la Mina El Vinagre de Puracé

Corredor	P _V [hPa]	P _{VS} [hPa]	H _E [10 ⁻²]	H _A [g/m ³]	H ₂ O/Aire [g/kg]	ρ _a [kg/m ³]	H _T [kJ/mol]
Bocamina	25,0	34,6	2,43	18,06	24,92	0,74	2.250
FT3	33,0	40,3	3,26	23,68	33,68	0,73	3.880
Niño	41,6	49,0	4,12	29,46	42,99	0,72	4.200
La Novena	50,0	56,6	5,00	35,12	52,60	0,72	8.950
La Séptima	46,0	54,7	4,58	32,38	48,03	0,71	7.580
Emergencia	46,0	55,7	4,62	32,62	48,44	0,71	7.710
La Sexta	44,5	52,1	4,43	31,40	46,33	0,71	7.060

P_V-Presión de vapor; P_{VS}-Presión de vapor saturado; H_E-Humedad específica; H_A-Humedad absoluta; ρ_A-Densidad del aire; H_T-Entalpía total

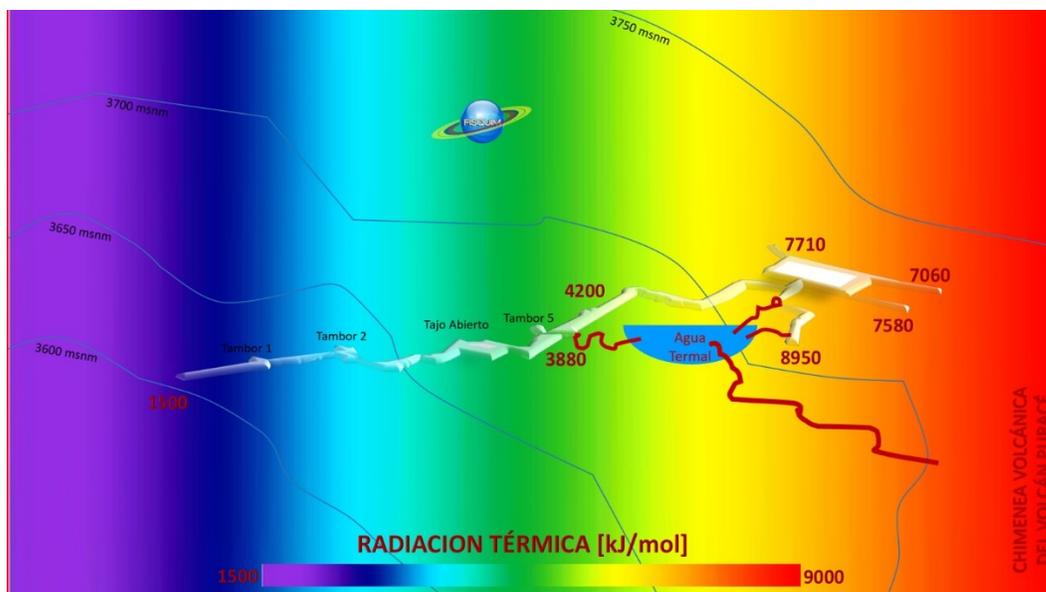


Fig. 17. Entalpías totales calculadas para las espeleósferas de la Mina El Vinagre de Puracé

5. DISCUSIÓN

Todos los organismos vivos, incluido el ser humano, tenemos límites máximos y mínimos de tolerancia a diversos factores fisicoquímicos externos, entre los cuales podemos citar los niveles de radiación térmica, de radiación ionizante y de gases tóxicos, asfixiantes y radiactivos (Tabla 7).

Las temperaturas de las cuatro cavidades subterráneas comentadas en este trabajo tienen temperaturas que oscilan entre 15 y 19°C para la Cueva del Indio del PNNG (Meza et al., 2019); 22 y 32°C para la Cueva del Tigre de Yaguará (Meza et al., 2019); y entre 22 y 27°C para la Mina El Guaico de Santo Domingo (Garzón et al., 2022), rangos aceptables para la vida.

Se destaca que La Mina El Vinagre en su parte más interna, mostró temperaturas hasta de 45°C en los manantiales termales FT1, temperaturas que no son recomendables para exposiciones prolongadas (Garzón et al., 2023). Si a la Mina El Vinagre de Puracé se le suman las radiaciones térmicas que en términos de entalpías superaron los 7.000 kJ por mol de aire espeleoférico; se adicionan las altas radiaciones ionizantes, expresadas en términos de concentraciones de gas radón $^{222}_{86}Rn$ y sus descendientes polonio $^{214}_{84}Po$, polonio $^{218}_{84}Po$, entre 11.470 y 34.300 Bq/m³; (Garzón et al., 2023) y se resalta que las concentraciones de sulfuro de hidrógeno H₂S alcanzaron el rango entre 10,2 y 17,2 ppm (Garzón et al., 2023), por encima de las normas colombianas e internacionales de no superar los 5,0 ppm de este gas, se debe evitar la presencia de personas y animales entre los 1.280 y 1.600 m desde la bocamina de esta mina abandonada.

Tabla 7. Rangos tolerables por el cuerpo humano

Variables Fisicoquímicas	Mínima	Máxima
Temperatura [°C]	-10	+40
Radiación ionizante [mSv/a]	0	50
Oxígeno, O ₂ [% v]	19,5	23,5
Dióxido de Carbono, CO ₂ [% v]	0,5	1,0
Metano, CH ₄ [% v]	0,5	1,0
Monóxido de Carbono, CO [ppm]	25	50
Dióxido de Nitrógeno, NO ₂ [ppm]	3,0	6,0
Sulfuro de Hidrógeno, H ₂ S [ppm]	1,0	5,0

6. CONCLUSIONES

De los cuatro sistemas espeleológicos presentados y discutidos en este trabajo, se puede comentar y recomendar que:

Las Cuevas del Indio y del Tigre muestran condiciones confortables de temperaturas, humedad relativa y contenidos de gases espeleoféricos, que invitan a proponerlos como ambientes propicios para la protección biológica y su aprovechamiento para actividades que faciliten la lúdica, la contemplación natural, como refugio y/o para turismo ecológico.

La Mina El Guaico se encuentra en operación minera y requerirá otros estudios con fines aprovechables, cuando se finalicen las actividades actuales y se pretenda darle un uso específico.

Para la Mina El Vinagre, no es recomendable que se retorne a la actividad de explotación de azufre, pues es el sistema más complejo en cuanto a radiación térmica, radiación ionizante y

toxicidad. El sector entre los 1.280 y 1.600 m de la Mina El Vinagre de Puracé, debe ser restringido para el ingreso. Sólo se debe destinar este sector para futuros estudios especializados: sea apoyar el monitoreo de la amenaza volcánica del Puracé, u otra actividad de tipo científico.

Algunos microclimas espeleológicos tienen potencialidades como refugios climáticos y en condiciones climáticas extremas, son prometedores lugares para proteger la biodiversidad. Esta afirmación es aplicable para las Cuevas del Indio y del Tigre.

Financiación

Este artículo fue financiado por el proyecto Fisicoquímica del Interior de La Tierra, en un 50 % con recursos del Centro de Investigaciones S.A.S. y en un 50 % por la Dirección Técnica de Laboratorios del Servicio Geológico Colombiano.

Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen intereses financieros o relaciones personales que puedan haber influido en el trabajo reportado en este artículo.

REFERENCIAS

- Dublianskyi, V.N. (2000). Espeleología entretenida. Nauchno popularna kniga: libro. Chiliavinsk, Urales. 125pp (en ruso)
- Dublianskyi, V.N. (1977). Cuevas kársticas y minas de las montañas de Crimea. Editorial Nauka, Leningrado, 184p. UDK: 551.44 (477.9) (en ruso)
- Garzón, G., Meza, L.F., Abueta, F. (2023). Gases endógenos del territorio colombiano y clima terrestre: Comparativo de flujos anuales. XIX Congreso Colombiano de Química, Química Ambiental. Universidad de Los Andes, Bogotá.
- Garzón, G. (2022). Estudio fisicoquímico de gases dentro de la Mina El Guaico, municipio de Cisneros, Antioquia. Informe de Comisión. Servicio Geológico Colombiano, Cali. 66pp.
- Garzón, G. (2009). El gas Radón: Manual Teórico – Práctico. INGEOMINAS, Dirección de Geoamenazas, Informe interno. Manizales, Caldas, 55pp.
- Gómez, J., Montes, N.E., Rey-León, V., Marín-Rincón, E. & Mateus-Zabala, D. (2023). Memoria explicativa del Mapa Geológico de Colombia, Geological Map of Colombia y Atlas Geológico de Colombia 2023. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá D. C., 73pp.
- González, E.A. y Morales, L.R. (1990). Estudio espeleológico del sistema de cavernas del Parque Nacional Natural Los Guácharos. Informe final. Fundación de Ciencia y Tecnología, Banco de la República. 134pp.
- Heiligmann, M., Stix, J., Williams-Jones, G., Sherwood, L.B., Garzón, G. (1997). Distal degassing of radon and carbon dioxide on Galeras Volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77: 267-283.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2023). Estudio Nacional del Agua 2022. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, D.C., Colombia, 466pp.
- Krukowski, S. (1920). Primeros frutos de la minería, el transporte y el comercio de pedernal en el holoceno de Polonia. Conclusiones sobre las propiedades de las materias primas y productos (Pierwociny krzemie-niarskie górnictwa, transportu i handlu w holocenie Polski. Wnioski z właściwości surowców i wyrobów). *Cz. I. Wiadomości Archeologiczne* 5: 185–205. (en polaco)
- Meza, L.F., Burbano, L.V., Argüelles, A., Garzón, G. (2019). Fisicoquímica del Interior de la Tierra – Informe Fase I (2017-2018). Servicio Geológico Colombiano. Dirección Técnica de Laboratorios, Santiago de Cali. 65pp.
- Martel, E.A. (1897). Sobre la cueva de Drach (gruta del Dragón) en la isla de Mallorca. *Informes de la Academia de Ciencias de Francia*. 124: 1385-1388 (en francés)
- Morales, C., Caicedo, J.C., Velandia, F., Núñez, A. (2001). Geología de la plancha 345 Campoalegre, escala 1:100.000, Memoria explicativa, INGEOMINAS, 85pp, DOI: 10.13140/2.1.3373.0885
- Racovita, E. (1927). Espeleología: una nueva ciencia de los antiguos misterios subterráneos. Editorial Astra. Cluj, 54p.
- Wynne, J. J., Mylroie, J. E., Titus, T. N., Malaska, M. J., Buczkowski, D. L., Buhler, P. B., et al. (2022). Planetary caves: A solar system view of processes and products. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127, e2022JE007303. <https://doi.org/10.1029/2022JE007303>