

Cavidades con aire enrarecido

Carlos Atienza de la Cruz
Alberto Orozco Cotillas
Santiago Prieto Villar
Club ARA

¿Qué pasa cuando en una sima conocida y en la que has estado en numerosas ocasiones a lo largo de los años, de repente, tienes sensaciones extrañas?

Un 4 de agosto de 2017 entramos en una cavidad en la que habíamos estado numerosas veces y notamos "sensaciones extrañas". No habiéndonos ocurrido antes en cavidad, las describimos como: *sofoco, sensación de hinchar el pulmón, pero no llenarse (como si te abrazan y no puedes expandir el pecho), ritmo cardíaco acelerado, costar esfuerzo vocear, falta de atención/concentración, notar al terminar la actividad que se ha escapado alguna gota orina (en las primeras ocasiones), ver salir al compañero muy agotado y fatigado en una cavidad que no requiere tanto esfuerzo*. Lo primero que te dicen: estarías cansado, es una cavidad difícil que requiere mucho esfuerzo, día de calor y llevarías mucha ropa, tienes asma o problemas respiratorios, etc. La respuesta a todo ello es no.

Dándole vueltas, te viene a la cabeza, que 25 días antes, en esa misma sima dos compañeros, que sí tienen asma, dijeron tener sensaciones extrañas. Diez años atrás, en una cavidad de la zona de Beteta (Serranía de Cuenca), describieron también esas sensaciones, realizándose una medición de oxígeno con resultado de valores bajos. La llama del mechero estaba a 3-4 cm distanciada del mismo, pero no se hizo un seguimiento de lo ocurrido.

En esta ocasión, tras solicitar un medidor de oxígeno (O_2), realizamos una medición de la sima visitada en agosto y de otra sima situada en una localización distinta. Ambas dieron valores bajos de O_2 y altos de dióxido de carbono (CO_2).^(A)

Nos preguntamos qué ha podido pasar, pero no hay una respuesta fácil al haber poca información documentada sobre lo ocurrido. No podemos comparar las primeras medidas obtenidas al no disponer de datos anteriores, por lo que nos vemos obligados a realizar más

mediciones para poder hacer un seguimiento que nos permita conocer mejor el problema y valorar si es seguro realizar la actividad espeleológica. Así, volviendo a solicitar los medidores, decidimos iniciar una serie de mediciones sistemáticas para obtener datos con los que poder plantear una hipótesis sobre el dónde, cómo y cuándo tiene lugar la existencia de concentraciones de aire enrarecido en cavidades de Cuenca, entregando los resultados a la Delegación Provincial de Desarrollo Sostenible en Cuenca y a la FCMEC. Además, los datos obtenidos son publicados en www.facebook.com/clubaracuenca desde la primera medición, para facilitar su difusión y posibilitar la localización de fenómenos similares en otros lugares. Esto nos permitiría encontrar una posible explicación.

Métodos

En primer lugar, se lleva a cabo una serie de mediciones aleatorias por diversas localizaciones de la provincia de Cuenca, que nos lleva a descubrir que este no es un fenómeno aislado o localizado en una sola zona concreta. Posteriormente, se mide en cavidades con varias litologías y morfologías: cuevas con distintas longitudes, con una o varias entradas y simas de diferentes profundidades. Observamos que el aire enrarecido tiene más relevancia en las simas que en las cuevas.

Con estas dos primeras observaciones, elegimos dos simas (sima de Tierra Muerta y sima de Las Palomas) para realizar en ellas una serie de registros de datos de manera sistemática por varios motivos: situarse relativamente cerca de Cuenca (lo que nos facilitaría el trabajo permitiéndonos poder realizar más mediciones), dar los valores más bajos en los primeros resultados y tener un pozo vertical que nos permite bajar el medidor con la cuerda ante valores extremadamente bajos de O_2 . Por

^(A) Para no hacer más confuso el desarrollo del artículo, cada vez que se cita valores bajos de O_2 , lleva consigo valores altos de CO_2 . Ver más en el apartado Interpretación de valores.

Concentración normal de oxígeno en el aire: 20,9%. Bajos: por debajo de 19,5%.

Concentración normal de CO_2 en el aire: 340 ppm. Altos: por encima de 5.000ppm.

otro lado, son cavidades sencillas, al tratarse de pozos únicos sin complicaciones morfológicas que no mezclan distintos regímenes de circulación de aire (Fig. 1).

Pese a tener dichas simas de referencia, donde se concentran el mayor número de mediciones, seguimos midiendo de forma no sistemática en cavidades de otras zonas, sin descartar las cuevas, pero primando las mediciones en simas que nos sirvan para comparar los datos y hacer un seguimiento de la evolución del aire. Las primeras mediciones tienen fechas muy espaciadas, por no disponer de otros medidores que nos confirmasen que los datos obtenidos eran correctos. Para las siguientes no nos es posible ser totalmente sistemáticos en la periodicidad de toma de datos, por la agenda llena de actividades, tanto del Club ARA como de la FCMEC. Esto nos obliga a centrarnos en

localizar el momento de comienzo y fin del periodo de mayor concentración de dióxido de carbono y menor de oxígeno. Para la realización de este trabajo nos informamos de hasta que valores es razonable y seguro llegar a ellos, primando siempre el sentido común y la seguridad.

En el interior de las cavidades se han tomado medidas de diversas variables: oxígeno (%), dióxido de carbono (ppm), humedad relativa (%), temperatura (°C) y presión atmosférica (hPa); con el fin de averiguar cómo pueden influir en la situación de aire enrarecido y cuál de ellas tiene mayor repercusión. Estas variables se han medido en varios puntos de referencia (desde la boca, fraccionamientos, hasta la base del pozo). Estas medidas nos permiten observar que se producen zonas o capas de estratificación formadas por las

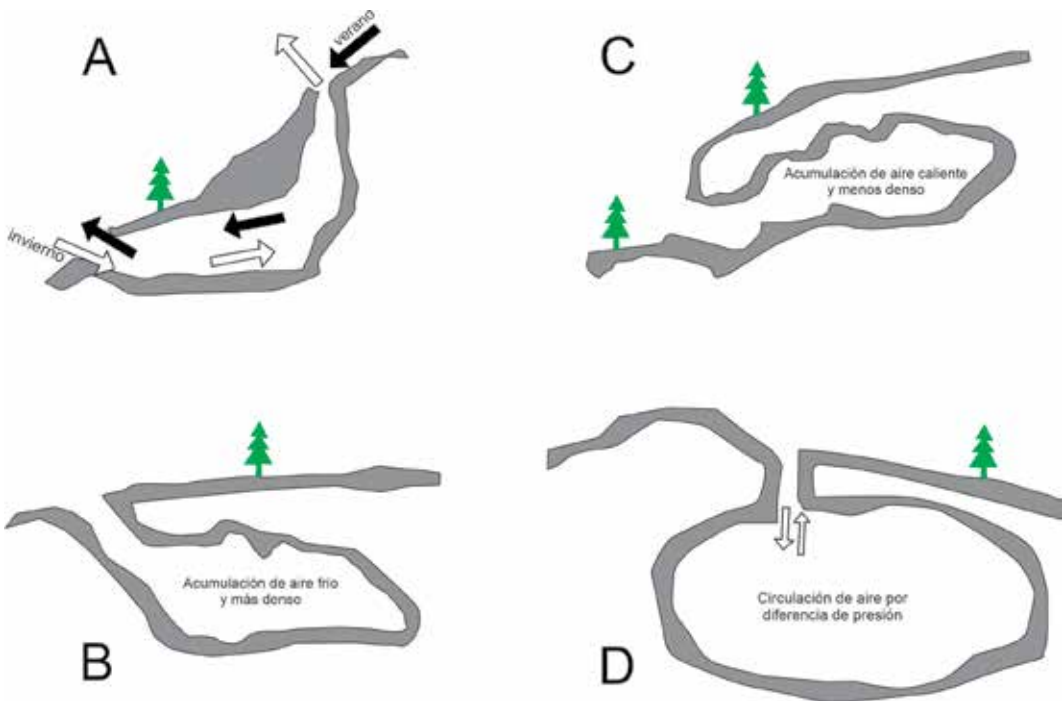


Figura 1. Tipos de cavidades en función del régimen de circulación del aire. A: Caverna "efecto chimenea", B: caverna "trampa de aire frío", C: caverna "trampa de aire caliente", D: caverna barométrica. Modificado de Choppy, 1982; Buecher, 1999 y Fernández, 2005. Normalmente, la circulación de aire en una caverna no permite clasificar a esta en un tipo u otro, sino que a menudo cualquier caverna presenta una combinación de varios regímenes diferentes de circulación, siendo difícil clasificar las cavernas de grandes dimensiones en un tipo u otro por poder presentar una combinación de varios regímenes diferentes de circulación. Por el contrario, en cavernas de dimensiones reducidas la circulación del aire puede ser identificada con un solo tipo de los patrones anteriores. (Fernández, 2005).

distintas concentraciones de O_2 / CO_2 junto a los valores del resto de variables, medidas en cada momento y profundidad, dándonos una referencia de cotas de profundidad, de boca a fondo, que nos facilita el seguimiento de las distintas concentraciones de gases, ya que fluctúan y se localizan a distintas alturas según la fecha en la que se realiza la medición (Fig. 2).

Con el fin de entender la dinámica atmosférica en superficie y su posible relación con los fenómenos observados en el interior de las cavidades, se han extraído de la estación meteorológica de AEMet de la ciudad de Cuenca los datos mensuales desde 1990 y diarios desde 2015. Para su representación e interpretación, se han utilizado líneas de tendencia que permitan ver la evolución temporal de estos datos en un solo vistazo. Además, como variables de referencia, por ser más intuitivas

y comúnmente utilizadas, se han elegido la temperatura, en las variables exteriores, y su repercusión sobre la concentración de oxígeno, a la que nos referiremos frecuentemente al estudiar el funcionamiento de la cavidad.

Materiales

Los medios materiales con los que contábamos eran muy limitados, sobre todo en las primeras mediciones, siendo fundamental conseguir mejores aparatos para obtener unos datos de todo punto fiables. Por ello, con el fin de poder explicar de alguna forma esas primeras sensaciones (sofoco y sensación de hinchar el pulmón sin llenarse) solicitamos un medidor de oxígeno (Fig. 3 arriba), que posteriormente fue complementado con otro que mide valores de dióxido de carbono (Fig. 3 izq.).

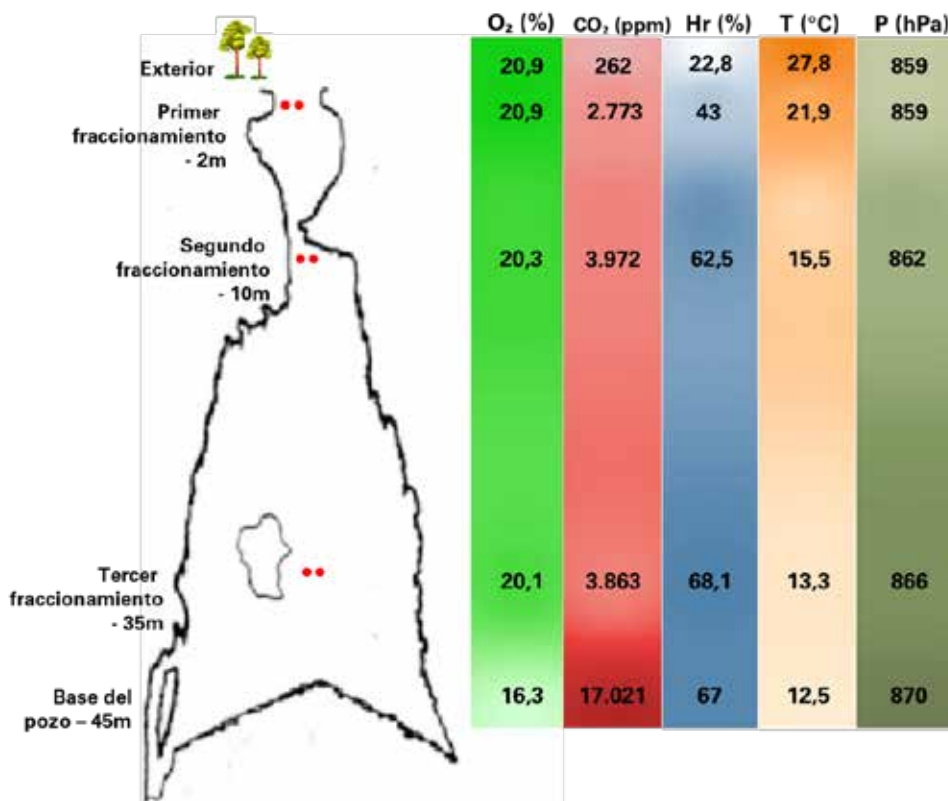


Figura 2. Sima Tierra Muerta 18/06/2019.. Valores medidos de cada una de las variables, desde la boca hasta la base. Capas de estratificación formadas según las concentraciones O_2/CO_2 y profundidad donde se midió.

Ambos han sido comprobados de manera que se encuentren correctamente calibrados. Por otro lado, es interesante saber que estos aparatos tienen un tiempo de reacción, por lo que se les deja que se estabilicen mientras se hace el cambio de cuerda en los fraccionamientos, por ejemplo. También es importante el tomar la precaución de no respirar cerca del medidor, lo que podría falsear los resultados.



Figura 3. Arriba. Detector utilizado en las primeras mediciones. GIG Microtector II G450 (Bomberos Excm. Diputación de Cuenca). , Medidor de temperatura y humedad (no profesional).

Abajo. Equipo de detectores utilizados para el resto de mediciones. Delta OHM HD 21 AB 17 (Deleg. Prov. Desarrollo Sostenible en Cuenca. Servicio de Medio Natural Biodiversidad) y Dräger X-am 5000 (Bomberos Excm. Diputación de Cuenca).

Resultados

Las primeras mediciones realizadas en agosto de 2017 dan valores bajos de O_2 y altos de CO_2 , lo que nos hizo preguntarnos si podía existir alguna emanación que desplazase el O_2 . Al no encontrar nada concluyente en las cavidades, observándose que se produce en más zonas alejadas entre ellas, y corrigiéndose los valores de aire enrarecido unos meses después de comprobar su existencia, se descarta la incidencia de otros gases. No obstante, al no poder confirmar el porqué de este fenómeno, nos planteamos la siguiente hipótesis inicial: *la climatología exterior impide el adecuado intercambio y fluctuación de aire dentro de la cavidad (colchón de gases). Esto ocurre en días muy calurosos, poca precipitación y con ello menor humedad en la cavidad.*

Con las mediciones de 2018, que también se realizan en cavidades de otras zonas, confirmamos que el fenómeno no se restringe a una pequeña área, sino que parece ser general en la provincia de Cuenca. En comparación con los valores obtenidos en 2017, una de las simas de referencia repite las cifras bajas oxígeno, mientras que la otra da valores un poco menos bajos, aunque sin ser los habituales. Unos meses después se repite el hecho de que se corrigen los valores cuando llegan los meses fríos y, por tanto, mantenemos la primera hipótesis planteada.

Con las actividades de 2019 del Club ARA y de la FCMEC, observamos que el fenómeno se produce en todos los lugares donde se van tomando datos. En las simas de referencia nos centramos en los meses en los que se dan los valores más bajos de O_2 para poder contrastar las cifras de años anteriores y mantener un seguimiento. Vuelve a producirse el hecho de que unos meses después se corrigen los valores. Finalmente, con la información obtenida continuamos entregando dichos resultados a la Delegación Provincial de Desarrollo Sostenible en Cuenca y a la FCMEC, dándole difusión a través de www.facebook.com/clubaracuenca, para informar y facilitar el hallazgo de una posible explicación.

A lo largo de estos tres años de mediciones, se han observado los siguientes resultados:

1. En las simas de referencia hay dos intervalos de tiempo a lo largo del año: uno en el que se mantienen los niveles de O_2 y CO_2 parecidos a los del exterior, que va desde primeros de noviembre hasta finales de mayo; y otro donde bajan los valores O_2 y suben los de CO_2 , desde finales de mayo hasta finales de octubre. No obstante, hay cavidades con morfologías más complejas que continúan dando valores propios de los meses de verano, aunque nos encontremos ya entrado el invierno.

2. Se observó que cuando sube la concentración de CO_2 , baja la de O_2 . Los valores pueden situarse fuera de parámetros normales, aunque no llegando a los extremos mortales.
3. No se produce solo en una zona concreta de la provincia de Cuenca, obteniendo los mismos resultados tanto en cavidades de la misma localización geográfica como en las que se encuentran en otras zonas, pese a que estén alejadas, con distintas cotas topográficas y diversas litologías (nos llega algún comentario de otra comunidad autónoma, pero sin aportar datos).
4. En las cuevas con varias entradas naturales situadas a distintas altitudes, en las que se han realizado mediciones, los valores son siempre normales. A lo largo de la cavidad las diferencias de presión no varían con el tiempo, presentando un gradiente de presión constante. De esta forma, existe una dirección preferencial en la circulación del aire, lo que se conoce como **equilibrio dinámico** (Fernández, 2005) (Figs. 4 y 5). De las cavidades encuadradas en este caso se ha realizado un menor seguimiento, puesto que desde el principio los valores obtenidos han sido los normales.
5. En cuevas con una sola entrada los valores de O_2 descienden progresivamente según nos alejamos de la boca, aunque no dan valores tan bajos como las simas.
6. En las cuevas con distintos pisos de altura se agudiza el fenómeno, en comparación con las cavidades de mero desarrollo horizontal, obteniendo valores más normales en las partes altas, zonas fósiles, y menor cantidad de O_2 en las partes bajas de las galerías. En cualquier caso, avanzando por las zonas altas, los valores descienden progresivamente según nos alejamos de la boca de entrada.
7. El fenómeno tiene una relevancia más marcada en las simas que en las cuevas.

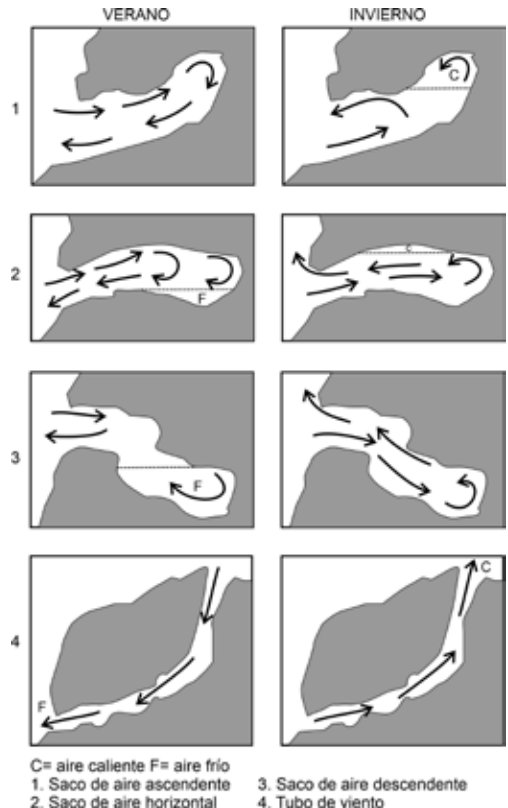


Figura 4. Circulación del aire en distintos tipos de cavidades. La circulación de aire, que se produce, sobre todo en las cavidades con varias entradas, puede modificar profundamente las condiciones constantes que suele reinar en ellas. En cavidades con una sola boca los circuitos de convección creados por diferencia térmica de las masas de aire lo ponen en movimiento. (Cuenca y Céspedes, 1998).

- Independientemente de la profundidad de estas, sucediendo tanto en simas que tienen pocos metros hasta las más profundas. Las simas de referencia descienden hasta los -45 m, pero en simas de -5 m también sucede.
 - Las simas visitadas tienen una boca y diámetro de pozo amplios.
8. Realizando las mediciones en distintas fechas, nos encontramos en el verano y hasta mediados de octubre masas de aire estable cuya densidad crece al aumentar la profundidad en la cavidad, lo que se conoce como **equilibrio estático**, produciendo fenómenos de estratificación

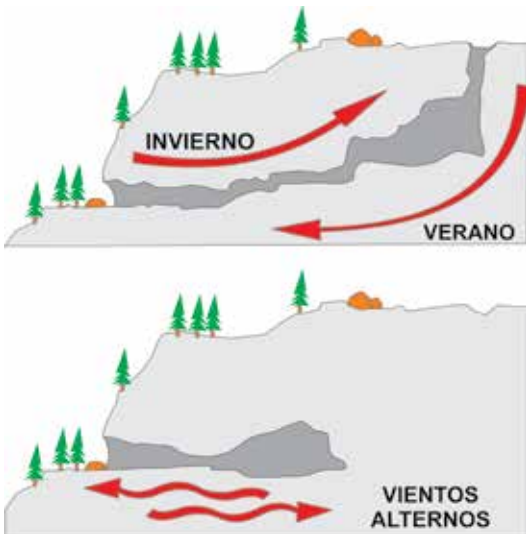


Figura 5. En invierno, el aire de las cavernas es más caliente que el del exterior y tiene tendencia a subir, saliendo por las entradas superiores. En verano, sucede lo contrario. La cueva, más fría que el exterior, aspira el aire de las partes altas y lo lanza frío por las bocas inferiores, pudiéndose apreciar sus efectos a muchos metros de distancia. Siempre hay una diferencia de temperatura entre el aire exterior, que varía dependiendo de las estaciones del año o las horas del día, y el subterráneo, de temperatura constante. Al ser el aire caliente más ligero que el frío, se producen importantes desplazamientos de su masa, creándose circulaciones alternas. (Martínez, 2004)

del aire. En estos, las masas de aire a menor temperatura se vuelven más densas y con mayor contenido en CO_2 , lo que provoca que se sitúen en las zonas más profundas (Fig. 2). Debido a ello, nos podemos encontrar dos situaciones:

- a. Valores normales de O_2 en la boca, próximos a los del exterior. Según se desciende por la sima (todavía quedan metros para llegar a la base del pozo), estos valores disminuyen progresivamente y, cuando nos acercamos a los metros finales, el porcentaje O_2 experimenta una bajada brusca.
- b. Se parte desde la boca ya con valores bajos. Estos siguen disminuyendo progresivamente según se gana profundidad, alcanzando en la base los mismos valores que en el punto anterior, pero sin bajada brusca.

Por tanto, siempre las concentraciones mínimas medidas de O_2 y las más altas de CO_2 se dan en las bases de los pozos o zonas bajas terminales (punto a y b anteriores).

9. En las zonas menos ventiladas (base de pozo terminal, fondos de saco, pasos estrechos en zonas finales, etc.) es donde se encuentran los valores más bajos de O_2 . La propia exhalación de varios deportistas puede aumentar la concentración de CO_2 , a la vez de disminuir la de O_2 .

Análisis de los resultados

Para la interpretación de estos resultados, utilizaremos lo expuesto por Cuenca y Céspedes (1998): La climatología general de una cavidad viene determinada por su localización geográfica. La ausencia, en ella, de ciertos elementos meteorológicos, como la insolación, y las especiales características del medio subterráneo, condicionan en gran medida el clima reinante en él.

- Así el primer factor fundamental que interviene es la **temperatura**. Otro es la **presión atmosférica**, de la que resultan los movimientos de aire en el interior de la red subterránea.
- La atmósfera de las cavidades contiene vapor de agua (grado higrométrico muy elevado y próximo al 100%) que se condensa en paredes y techos, así como un notable contenido en anhídrido carbónico (CO_2).
- La temperatura del aire de las cavidades suele considerarse constante e igual a la media anual de la temperatura existente en cada región (Fig. 4).

En nuestra trayectoria espeleológica comprobamos que se cumplen estas enseñanzas, debiendo tener cuidado en las zonas donde se podría acumular restos de materia orgánica, vegetación, lodos, etc., que al descomponerse pueden generar aún más CO_2 . Entonces, ¿qué está pasando? ¿Qué ha cambiado? ¿Por qué ahora las concentraciones del aire en cavidad son diferentes?

Buscando información sobre algún fenómeno parecido, encontramos varias referencias, pero no nos explican los datos o resultados de lo que estamos midiendo. En la documentación consultada (listado a continuación), cuentan con una medición realizada, pero no con anteriores que permitan obtener una comparativa y así poder encontrar las causas de dichos resultados. También estamos ante el particular fenómeno de que, en las mediciones que realizamos, los valores se corrigen unos meses después de producirse.

- Sima CJ-3 (Casarejos, Soria). Falta de oxígeno.
- Sima del Vapor y el Cerro del Castillo (Alhama de Murcia). Alta concentración de CO₂ y temperatura 43°C.
- Cueva Castañar (Caracena de Castañar de Ibor, Cáceres). Altos niveles de radón.
- Cova de les Rodes (Pollença, Mallorca). CO₂ por alto grado fosilización.
- Sumidero de Acebreiros (Cuenca). Concentración baja de O₂ tras zona sifonada.
- Hoyo del Dragón, Sa Piqueta (Mallorca). Espeleobuceo, alta concentración de CO₂, galerías y bóvedas cerradas por sifones.
- Macizo del Garraf (Barcelona). Disminución de O₂ y aumento de CO₂.
- Publicación Blog Espeleo Minas (2011): Dióxido de Carbono, las cavidades y tú. Efectos fisiológicos, disminución de CO₂ en el ser humano.
- Geoda de Pulpi (Pilar de Jaravía, Almería). Fallecimiento en 2015 por acumulación de CO₂.
- Cueva del Agua (Cartagena). Espeleobuceo, concentraciones bajas O₂ en burbujas de aire.

Para poder llegar a conocer qué está provocando la situación de aire enrarecido en las cavidades, debemos entender cómo funciona el **movimiento del aire en una cavidad**, teniendo dos orígenes diferentes:

Circulación Barométrica: las variaciones de presión barométrica del aire interior dependerán de los cambios térmicos respecto al exterior. Según Lewis (1992) y Fernández

(2005) normalmente suceden en cortos intervalos de tiempo, correspondiéndose con pequeños impulsos por cambios en la relación entre presión interior-exterior (por ejemplo, por la llegada de frentes de alta o baja presión en el exterior). Las variaciones de la presión barométrica pueden tener un carácter aleatorio, o en su caso seguir ciertas pautas rítmicas con oscilaciones semanales o incluso de pocos segundos. Estas oscilaciones se corresponden con ciclos estacionales ligados a fenómenos meteorológicos, variaciones día-noche o cambios instantáneos debidos a vibraciones, por ejemplo: terremotos o por detonaciones en la minería.

Circulación Convectiva: el movimiento del aire de una cavidad se desplaza en función de su densidad, parámetro que depende de la presión barométrica, de la temperatura y de la humedad relativa del aire. El aire con mayor densidad tiende a desplazarse a cotas topográficas bajas de la cavidad, mientras que el aire menos denso se aloja en las cotas altas o sale de la cavidad, en función de la densidad del aire exterior (Fernández, 2005).

Ambos tipos de circulación se presentan combinados en el ambiente subterráneo e interaccionan entre sí. Los cambios de presión exterior-interior, que originan la circulación barométrica del aire de la cavidad, también tienen un reflejo en la circulación convectiva ya que la densidad del aire también depende de la presión.

Además cada cavidad con circulación barométrica tiene un propio modelo de movimiento del aire por diferencia de presión, de modo que no es extrapolable a otras cavidades debido a que las **dimensiones y morfología de la cavidad** (volumen, sección y longitud de la entrada y galerías) siempre van a ser distintas (Fernández, 2005) (Fig. 5).

Con el fin de correlacionar la dinámica atmosférica exterior con el funcionamiento y el comportamiento observado en las simas de referencia, se han extraído de la estación de

AEMet de la ciudad de Cuenca los registros correspondientes a las variables de temperatura, precipitación, humedad relativa y presión atmosférica. Se han recabado estos parámetros meteorológicos de los últimos 30 años a escala mensual y de los últimos cinco con cifras diarias.

Así, fijándonos inicialmente en las fechas en las que se realizaron las mediciones de gases en cavidad con valores anómalos de O_2/CO_2 (meses de verano) y buscando en las condiciones climatológicas exteriores un episodio que justifique esos cambios de valores, se encuentran coincidencias de **subida de las temperaturas** y una **amplitud de presión diaria** ($\Delta P = P_{\text{máx}} - P_{\text{mín}}$) **con valores próximos a 0**. Posteriormente, en las medidas realizadas meses más tarde (otoño), comprobamos que, cuando se corrigen los valores en el interior de cavidad, en el exterior se están produciendo unas bajadas de temperaturas, a la vez que se amplían los valores de la amplitud de presión diaria. Por tanto, descubrimos en las condiciones atmosféricas externas un patrón de funcionamiento. La marcada tendencia creciente de las temperaturas determina el comportamiento de la presión atmosférica, no tanto en sus valores máximos, medios y mínimos, sino en las diferencias que entre estos existen a lo largo de cada día. Así, cuando la temperatura mínima diaria es elevada, de en torno a 15-20°C, especialmente durante una secuencia de días en los meses de verano y debido a la permanencia de anticiclones sobre la península, no existen casi diferencias entre la presión máxima y la mínima de cada uno de esos días.

Por ello, es importante considerar la amplitud de presión diaria a la hora de explicar parcialmente la ventilación de una cavidad, dado que es esta variación entre la presión máxima y la mínima la que genera un gradiente de presión que es el responsable de los desplazamientos de las masas de aire y, por tanto, de la formación de corrientes de viento. Cuando la amplitud de presión diaria (ΔP) es cercana a 0, existe en el aire una estabilidad máxima, y esto sucede desde finales de primavera hasta principios de otoño.

El fenómeno contrario, una inestabilidad atmosférica elevada ($\Delta P > 10$ hPa), viene determinado por la llegada de situaciones meteorológicas adversas a la península, como sucede, sobre todo, en los meses de otoño y primavera. Esa amplitud de presión diaria alta viene propiciada por las bajas presiones que acompañan a las borrascas de gran impacto (aquellas que reciben nombre propio) y a los fenómenos de huracán mediterráneo, DANA (depresión aislada en niveles altos) o gota fría. El encadenamiento sucesivo de estos fenómenos favorece la ventilación por circulación barométrica de las cavidades, especialmente de las verticales.

Al ampliar la secuencia temporal, observando el resto de los meses en que se hicieron las mediciones (desde que prevemos que empieza a producirse el fenómeno hasta su fin), todavía se aprecia mejor la interacción de los fenómenos atmosféricos del exterior con las variaciones de los gases de las cavidades. Además, se muestra un singular paralelismo donde, analizados los datos atmosféricos exteriores y el aire dentro de la cavidad, nos dan como resultado unas gráficas en las que:

1. Observamos que en mayo empiezan a subir las temperaturas (mínimas-máximas), descendiendo la amplitud de la presión atmosférica a lo largo del día. En el mes de octubre, en contraste, empiezan a descender las temperaturas y comienza a incrementarse la amplitud de la presión, produciéndose en octubre-noviembre una llegada de borrascas (bajas presiones) que dejan precipitaciones (Figs. 6 y 7).
2. En el aire del interior de las cavidades, también hay dos intervalos de tiempo a lo largo del año 2019: uno en que se mantienen los niveles de O_2 y CO_2 parecidos a los del exterior, que va desde mediados de octubre hasta mayo y otro que va desde mayo hasta mediados de octubre, cuando las simas se van cargando gradualmente de CO_2 y perdiendo O_2 (Figs. 8 y 9).



Figura 6. Sima de las Palomas. Línea de tendencia correspondiente a la amplitud de presión diaria. Mediciones de O₂ y CO₂ en la base del pozo. Periodo mayo-noviembre de 2019.

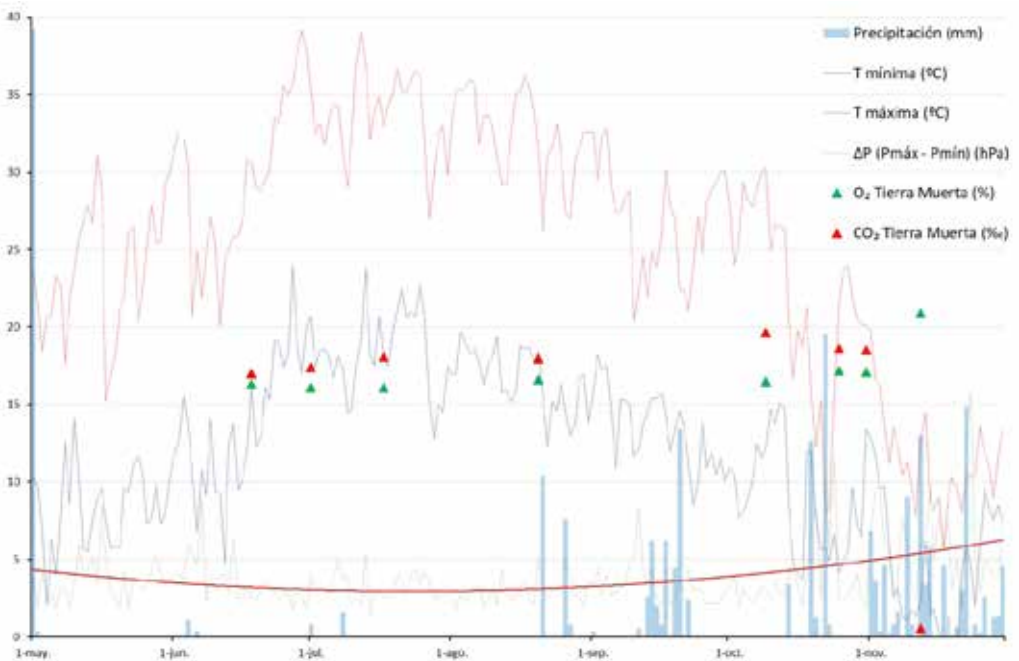


Figura 7. Sima Tierra Muerta. Línea de tendencia correspondiente a la amplitud de presión diaria. Mediciones de O₂ y CO₂ en la base del pozo. Periodo de mayo-noviembre de 2019

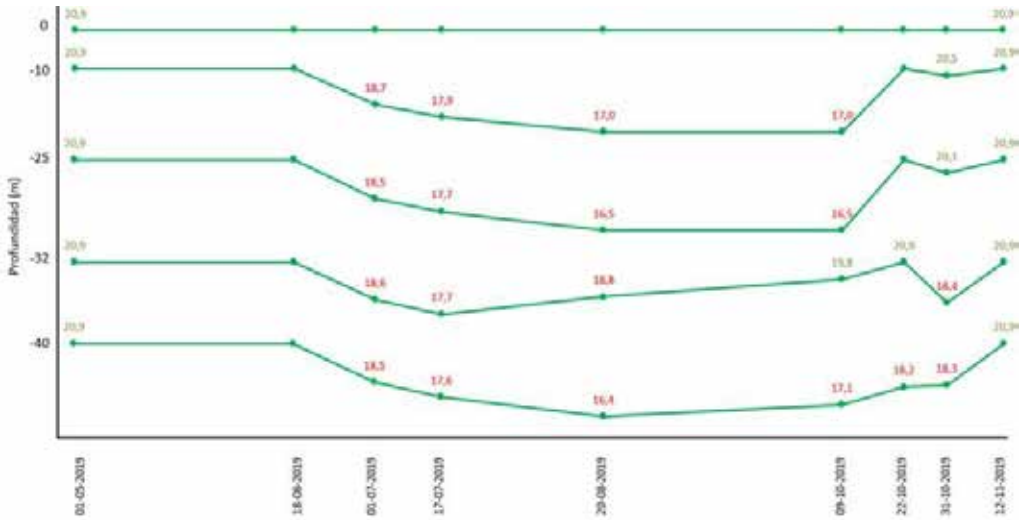


Figura 8. Sima de Las Palomas. Evolución temporal y altitudinal de los niveles de O₂ formando capas de estratificación en los distintos puntos medidos. Desde la boca, los fraccionamientos, hasta la base pozo. Fechas de las mediciones mayo-noviembre de 2019.

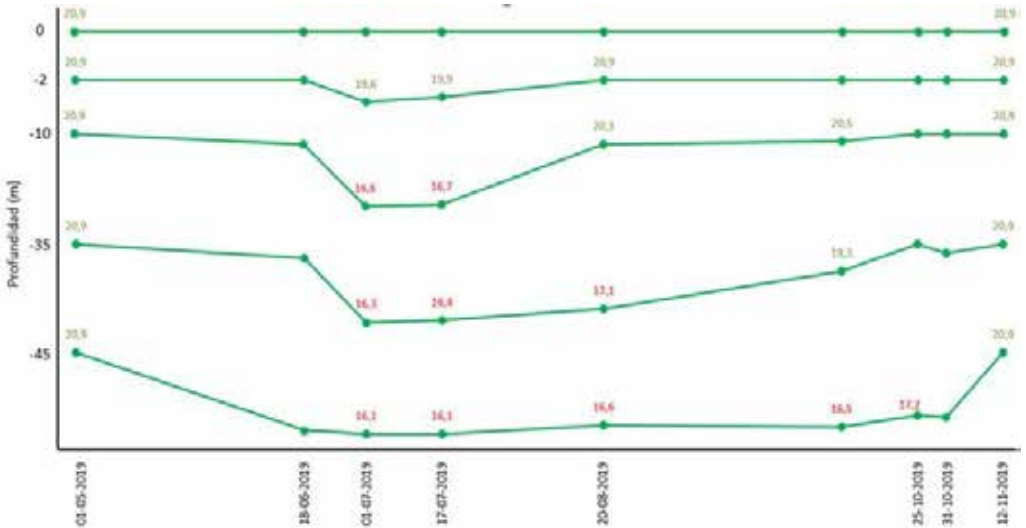


Figura 9. Sima de Tierra Muerta. Evolución temporal y altitudinal de los niveles de O₂ formando capas de estratificación en los distintos puntos medidos. Desde la boca, los fraccionamientos, hasta la base pozo. Fechas de las mediciones mayo-noviembre de 2019.

En el aire del interior de las cavidades, de las diversas variables medidas [O₂ (%), CO₂ (ppm), Hr (%), T^a (°C) y P (hPa)] (Fig. 2), resulta muy complicado el poder mostrar todas las variables, en las distintas profundidades y a lo largo de la cronología de la recogida de medidas, por

generar una gran cantidad de información difícil de ser visualizado en una sola imagen, optando por representar una única variable a lo largo de la secuencia tiempo de medidas realizadas, tomando la variable del O₂ como valor de referencia más intuitivo (Figs. 8 y 9).

Del final de primavera a principio de verano no tenemos datos para precisar el momento del cambio en la sima de Tierra Muerta, pero sí en la sima de Las Palomas, habiendo realizado una medición antes (16-6-2019) y otra después (3-7-2019) de la bajada de valores de O_2 . En el intervalo de esos 16 días entre mediciones vemos que en el exterior se produjo una subida de la temperatura mínima por encima de los 15°C, bajando también la amplitud de presión diaria a valores cercanos a 0.

Con temperaturas máximas de más de 35°C en el exterior, realizamos mediciones dentro de ambas cavidades repartidas en el periodo de junio a noviembre, encontrando las temperaturas más altas en las partes superiores de las cavidades (masas de aire caliente y menos denso) y las más bajas en las zonas más profundas (masas de aire más frío y denso). Lo que provoca una estratificación de la atmósfera de las cavidades. Esto se debe a que el movimiento del aire queda en la cavidad a expensas de cambios térmicos o de presión significativos que, como hemos visto en la evolución del O_2 a diferentes niveles, durante estos meses calurosos con escasa variación de presión no se producen, por lo que solo suben y bajan las capas de estratificación dentro de las cavidades.

Así, según la fecha de medición (junio-octubre) y la cota a la que se realizan, nos encontramos las diferentes capas de estratificación con distintas concentraciones de O_2 y CO_2 , además de sus valores particulares de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica (Figs. 2, 8 y 9).

Por lo analizado hasta ahora, podemos describir una serie de observaciones y apreciaciones durante el periodo junio-octubre que ocurren en las dos cavidades:

- Los valores bajos de O_2 se podían encontrar en la misma boca de la cavidad, a lo largo del recorrido de descenso o en la misma base del pozo.
- En la medición del 22/10/19 (Palomas) y 25/10/19 (Tierra Muerta), realizadas durante un corto periodo de borrasca, observamos que la capa de estratificación con los valores

mínimos de O_2 se situaba a 2 m del fondo de la sima. Sin embargo, en otra medición realizada a la semana siguiente esta capa había subido a 8 m del fondo.

- Estas variaciones también se advierten en intervalos más cortos de tiempo, ya que en el mismo día de medición, descendiendo obtuvimos unos valores de O_2 a una determinada cota, que una hora más tarde, durante nuestro ascenso, se situaba a una cota diferente.
- Pudiendo observar también que estos cambios se producen en segundos. Midiendo en la sima de Tierra Muerta, esperando en un fraccionamiento al libre del compañero obtuvimos unos valores determinados de O_2/CO_2 que cambiaron de forma súbita con la aproximación de una nube. Los valores posteriores a la aparición de la nube se situaron 3-4 m más abajo. Si bien no se corregían los valores de O_2/CO_2 , si subían o bajaban las capas de estratificación de gases.

El cambio producido a finales de octubre está bien documentado en las dos simas de referencia debido a las sucesivas mediciones y a la representación en los gráficos. Cuando las temperaturas máximas del exterior bajan de 10°C y empiezan a aumentar las variaciones de presión, fuera de la cavidad hace más frío que en el interior, lo que ocasiona la ventilación de la sima, que llega a producir la estabilización de sus valores a lo largo del mes de noviembre.

También observamos que periodos breves de bajada de las temperaturas (p. e. 21 de octubre) sí producen cambios muy acusados en la sima de Las Palomas, aunque no en Tierra Muerta, donde los cambios son menores, sin inferir un motivo claro. Los cambios de temperaturas día/noche no parecen ser significativos, sin embargo, el cambio gradual y mantenido de la temperatura desde finales de octubre lleva consigo una clara disminución del CO_2 y un aumento del O_2 , sobre todo cuando las temperaturas máximas bajan de los 10°C, siendo estas más frías que las del fondo de la cavidad.

Estas observaciones nos conducen a afirmar que variaciones de las temperaturas del exterior durante periodos cortos de tiempo no son suficientes para purificar el aire de las cavidades, como, por ejemplo, los cambios día/noche o la súbita bajada de temperaturas del día 26 de octubre. Por tanto, se requiere una bajada constante de las temperaturas para producir un cambio brusco en las cantidades de O_2 y CO_2 .

Es curioso que haya diferencias en ambas simas en el momento en que empieza a formarse el aire enrarecido. En los datos obtenidos se refleja que en la sima de Tierra Muerta es un poco anterior y más brusco. Tal vez esto se deba a que cuentan con diferentes tipos de roca en la que se originó su formación. Tierra Muerta se formó en calizas tableadas del Jurásico medio (Formación Yémeda) que se presentan en bancos de relativamente poco espesor, mientras que Las Palomas se formó en un banco único de dolomías (Dolomías de la Ciudad Encantada), lo que nos hace suponer que su red fisural es de menor importancia que en Tierra Muerta, lo que explicaría que mostrara con más lentitud los cambios en la cavidad al inicio del verano. De la misma manera sucede a la hora de corregirse el fenómeno, puesto que la sima de las Palomas lo hace de forma gradual, no así Tierra Muerta.

Una vez corregidos los valores en ambas simas de referencia (con regímenes de circulación sencillos, al contar con un único pozo vertical), nos encontramos con otras simas que siguen dando valores bajos de O_2 . Son los casos de la Sima Alfa II y Sima C-2. Estas tienen un régimen de circulación de aire mucho más complejo debido a su propia morfología.

La Sima Alfa II, el 17 noviembre daba valores de 16,5% O_2 , cambiando 10 días después a 18,1%, probablemente provocado por la sucesión de tres borrascas de escala peninsular que trajeron las primeras nieves del otoño. En posteriores mediciones la capa de estratificación con valores anómalos se concentra en los últimos pozos, estancándose en el 18% O_2 . A la finalización de este artículo (15-01-2020), más de dos meses

después de que las simas de referencia ya se hayan corregido, en la Alfa II el pozo más aireado da valores de O_2 de 19,9%, mientras que el que tiene mayor complejidad de ventilación registra 18,2%. Se demuestra así que la cavidad está ventilando y corrigiendo los valores, aunque de manera muy lenta. Por lo tanto, no todas las cavidades se comportan de igual modo y en los mismos tiempos. Las que por su morfología no ofrecen dificultades de circulación de aire (pozo directo al exterior) empiezan antes a corregir los valores, mientras que las cavidades con más desarrollo y con distintos tipos de regímenes de circulación de aire (bocas de acceso reducidas, pasos estrechos, meandros, pozos escalonados, fondos de saco a distintas alturas, etc.) necesitan de un proceso más lento (Fig. 1).

Una vez demostrada la influencia de la morfología y dimensiones de una cavidad en la corrección de sus valores nos preguntamos si una cavidad con morfología compleja comenzará también más tarde el proceso del enrarecimiento de su atmósfera.

Según hemos visto cómo se desarrollan los movimientos del aire en una cavidad, la teoría nos dice que no, puesto que, al subir la temperatura del exterior, esta masa de aire caliente no dejará salir el aire frío, más denso y pesado del interior. Este fenómeno impide la circulación convectiva, por lo que el movimiento de gases queda a expensas de circulación barométrica. No obstante, durante los meses de mayo a octubre descienden notablemente las variaciones de presión, que ocasionan un mínimo movimiento de la capa de estratificación dentro de cavidad.

En la práctica vemos que se cumple la teoría y no se produce más tarde el enrarecimiento del aire de las cavidades por tener morfologías complejas. Cuando en las simas de referencia se recogen valores bajos de O_2 en el mes de junio, en la sima Alfa II (medición 29-06-2019) también recogemos valores de 17,8% de oxígeno en la base del primer pozo, por lo que no se descendió en su totalidad.

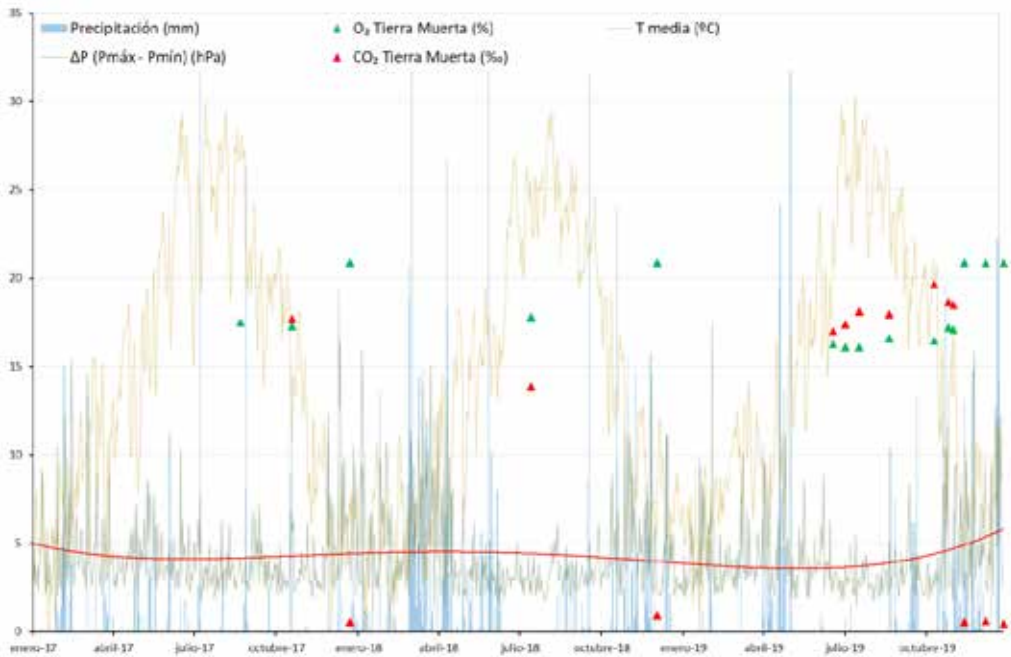


Figura 9. Sima de Tierra Muerta. Gráfica fenómenos atmosféricos exteriores 2017-2019. Con línea de tendencia correspondiente a la amplitud de la presión diaria. Valores 20,9% O₂, fuera del contorno de la temperatura. Valores por debajo de 20,9% O₂, dentro del contorno de la temperatura. Medida de O₂ y CO₂ realizada en la base del pozo.

Tras este recorrido, nos situamos ante una importante cuestión: ¿por qué ahora hay cavidades con aire enrarecido y antes no?

Primero

Hemos hecho un seguimiento de los valores meteorológicos exteriores de los últimos tres años y los comparamos con los datos obtenidos de las mediciones realizadas en el interior de cavidad (menor número de mediciones en 2017-2018 y mayor en 2019) (Figs. 9 y 10) y podemos observar que:

En la sucesión de movimientos del aire dentro de la cavidad de estos tres últimos años (Fig. 10), vemos que se producen bajadas de las concentraciones del O₂^(A) en tres periodos coincidiendo estos con los meses de verano de cada año, transcurridos los meses más calurosos, los valores vuelven a la normalidad.

Representando en la secuencia de fenómenos climatológicos exteriores de estos tres últimos

años (Fig. 9) las medidas del O₂ tomadas en la base del pozo, vemos que cuando las medidas oxígeno son normales, los triángulos verdes se sitúan en una línea imaginaria del 20,9% de O₂. Pero cuando en el interior bajan las concentraciones de O₂, vemos que en el exterior hay unos cambios o alteraciones de las condiciones climatológicas que se concretan en un aumento de las temperaturas (mínimas y máximas) y un descenso de la amplitud de las presiones diarias. Esto ocasiona que los puntos de O₂ se sitúen dentro de los contornos de la temperatura.

Sin embargo, cuando cambian las condiciones exteriores, descendiendo las temperaturas, subiendo la amplitud de presión y recogiendo precipitaciones, los valores del aire interior de la cavidad vuelven a ser normales y se sitúan en la línea imaginaria, saliéndose de los contornos de las temperaturas donde habían estado antes. No se repite el fenómeno hasta los meses verano-otoño del año siguiente.

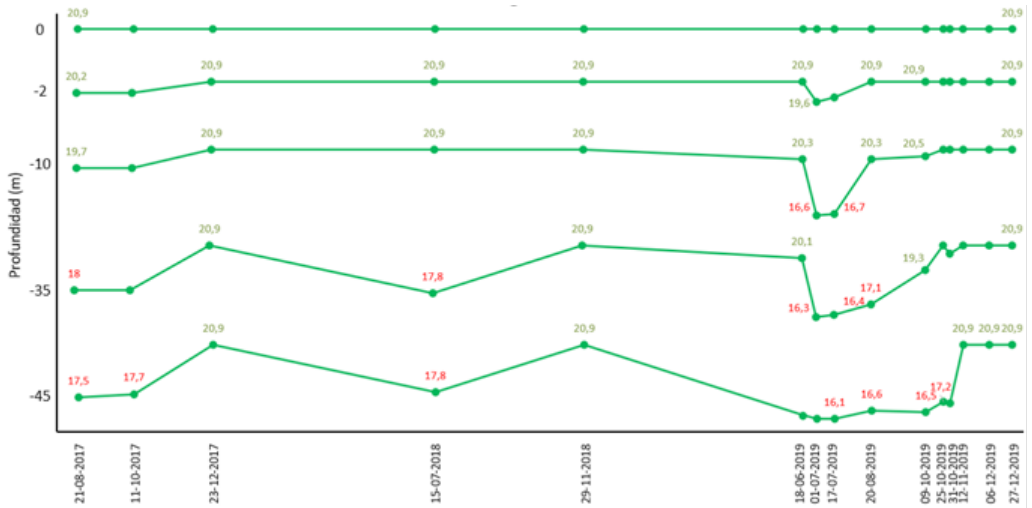


Figura 10. Sima de Tierra Muerta. Evolución temporal y altitudinal de los niveles de O₂ formando capas de estratificación en los distintos puntos medidos. Desde la boca, los fraccionamientos, hasta la base pozo. Fechas de las mediciones 2017-2019.

Igualmente, observamos que en 2018 el periodo de altas temperaturas empezó un mes más tarde y acabó un mes antes que en el 2017 y 2019, debido al encadenamiento de frentes de bajas presiones que descargaron precipitación abundante, incluso en forma de nieve ya entrada la primavera. Esto provocó que los cambios de valores en cavidad empezasen a producirse más tarde y también se corrigieran antes.

Segundo

No disponemos de datos anteriores a 2017 de concentraciones O₂/CO₂ dentro de cavidad, para poder compararlos, pero sí se dispone de los datos meteorológicos del exterior (Fig. 11). En ellos destaca una tendencia creciente en las temperaturas máximas, medias y, sobre todo, mínimas, que aumentan a un ritmo

de 2,7°C durante dicho intervalo de tiempo. El incremento de la variable temperatura repercute de manera directa sobre el volumen de precipitaciones, debido a una mayor evapotranspiración, lo que, a su vez, provoca un descenso del contenido en vapor de agua del aire a nivel del suelo.

No obstante, como ya hemos visto, la marcada tendencia creciente de las temperaturas determina el comportamiento de la presión atmosférica, sin apenas variación a lo largo de los días. En consecuencia, es importante considerar la amplitud de presión diaria ($\Delta P = P_{\text{máx}} - P_{\text{mín}}$), dado que esta genera un gradiente de presión que es el responsable de los desplazamientos de las masas de aire y, por tanto, de la formación de corrientes de viento.

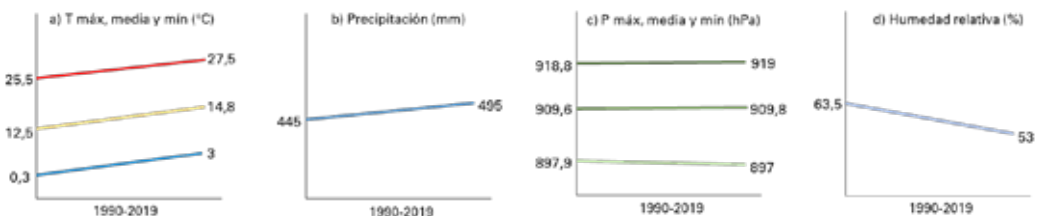


Figura 11. Gráficas periodo 1990-2019 (AEMet). Líneas de tendencia de los parámetros meteorológicos estudiados.

Por ejemplo, durante 2019, el 86% de los días en los que la amplitud de presión diaria es baja, $\Delta P < 2$ hPa, se concentran entre los meses de mayo a octubre, meses en los que la atmósfera a nivel del suelo se encuentra muy estable y el CO₂ va reemplazando al oxígeno en el fondo de las simas.

De igual manera, si analizamos los últimos 30 años, la amplitud de presión mensual, es decir:

$\Delta P_{\text{mensual}} = P_{\text{máx}} - P_{\text{mín}}$ mensual nos encontramos que, de los diez valores más bajos de dicha amplitud de presión a lo largo del periodo, cinco se registran entre 1990-2015 y otros cinco en estos últimos 4 años, la mayoría en los meses de julio y agosto. Por tanto, se observa una reciente recurrencia de este suceso debido al mencionado aumento generalizado de las temperaturas.

Finalmente, si seguimos disminuyendo la escala, nos encontramos con que estos datos no son fruto de un fenómeno local, sino que marcan la tónica a nivel mundial.

Durante la Cumbre del Clima de Madrid de finales de 2019, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) realiza un avance provisional sobre estado del clima: *El año 2019 pone punto final a una década marcada por registros de calor excepcionales. Las temperaturas promedio registradas en los últimos cinco años (2015-2019) y durante la última década (2010-2019) serán casi con total seguridad las más elevadas que jamás se han contabilizado.* Pendiente del informe definitivo que saldrá en marzo 2020, convirtiéndose 2019 en el segundo o tercero más cálido de la historia. Los poseedores del récord actual son, por rango, 2016, 2015, 2017 y 2018. A esto se le añade el informe del Servicio de Cambio Climático de la Agencia Espacial Europea (ESA) elaborado dentro del programa Copernicus en julio de 2019: *2019 no para de encadenar récords de temperatura. Este junio fue el junio más cálido desde que hay registros fiables, que arrancan en 1880. "Cuando miramos hacia atrás, a los últimos cuatro años (entre 2015 y 2018), se descubre que han sido los cuatro años más calientes del registro.*

Posteriormente, la ESA añadió julio y octubre como los más cálidos registrados, en la misma línea que siguen los científicos de los Centros Nacionales de Información Ambiental de la NOAA en Estados Unidos, quienes señalan recientemente que 2019 ya es el segundo año más caluroso de la historia y, junto con la OMM, que *la concentración en la atmósfera del dióxido de carbono, el principal de los gases de efecto invernadero, también ha llegado a niveles históricos 415 partes por millón a principios de este año. En 30 años esa concentración se ha disparado más de un 15%.*

Tercero

Al tener solo medidas de valores de los gases de cavidad de los últimos 3 años, no podemos confirmar lo ocurrido en años anteriores, pero debiendo cumplirse la teoría por la cual se produce el movimiento del aire en una cavidad, con condiciones climatológicas exteriores normales, la circulación convectiva y barométrica se produciría en periodos más cortos y con temperaturas mínimas no tan altas como las medidas en los últimos años.

Por ello, el cuerpo humano sin un medidor de gases (O₂/CO₂) no sería capaz de notarlo. En la práctica, sólo podemos suponer que durante los años anteriores a 2017 la ventilación prácticamente no dejaba de realizarse, ya que hemos practicado la espeleología sin tener esas sensaciones extrañas, o no hemos sido conscientes de ellas (aunque sí haber oído algún caso o comentario de haber experimentado sensaciones extrañas, pero sin hacerse un seguimiento).

Definición de aire enrarecido

En el desarrollo del artículo se hace alusión al término *aire enrarecido*, pero ¿qué definen esas palabras? Smith (1999) y Fernández (2005) definen como aire nocivo, en términos espeleológicos, a aquella atmósfera particular de una cavidad cuya composición tiene un efecto fisiológico anormal sobre la salud humana. Pudiendo usarse otros adjetivos como viciado, enrarecido o cargado, donde todos tienen en común que:

Tabla 1. Smith, 1997. Notas Técnicas Prevención NTP 223 Trabajos en Recintos Confinados (Legislación Española). OSHA, NIOSH (Legislación de Estados Unidos)

%O ₂ en aire	Tiempo de exposición	Efectos o consecuencias en los seres humanos
> 23%		Atmósfera sobre oxigenada Gran riesgo de incendio. Nivel Máximo de Seguridad (OSHA)
21,00%	Indefinido	Concentración normal del Oxígeno en el aire (20,954%)
20'5%	No definido	Concentración mínima requerida para entrar en un espacio confinado, Sin equipos de protección respiratoria con suministro de aire.
19'5%	No definido	Límite respirable por el ser humano sin afectar al proceso respiratorio Nivel Inferior (OSHA, NIOSH) NTP 223: Concentración mínima por debajo de la cual obligación de equipo respiratorio. Atmósfera peligrosa.
18,00%	No definido	Aumento del volumen de respiración (aceleración del ritmo respiratorio), elevación del pulso, Problema de coordinación muscular Afectación del sistema muscular (Fatiga y problemas de coordinación).
17,00%	No definido	Riesgo de pérdida del conocimiento sin signo precursor, Descenso de la capacidad de juicio. Atmósfera inmediatamente peligrosa para la vida.
16,00%		Primeros Síntomas de Anoxia.
16 – 12%	Segundos a minutos	Marcada elevación del pulso, respiración acelerada Vértigo, dolores de cabeza, disneas e incluso alto riesgo de inconsciencia. Escasa capacidad de juicio, aparición rápida de una gran fatiga, vómitos, visión borrosa, elevado riesgo de desmayo y cianosis.
10 – 6%	Segundos a minutos	Comoción con cianosis intensiva, respiración rápida superficial. Nausea, vómito. Inhabilidad para moverse pérdida de conocimiento, coma y muerte rápida (6-8 minutos).
> 6%		Convulsiones, sofoco, para la respiración y el corazón para unos minutos después.
3 – 5%		Tiempo de vida: 3-5 minutos
0,00%	Segundos a minutos	Inconsciencia en 2 inhalaciones. Muerte en minutos

- Existe una deficiente o nula renovación de aire.
- Aire procedente de un espacio interior hacia el exterior.
- Tiene una composición que hace dificultosa la respiración y que en grandes cantidades puede ocasionar problemas graves. Normalmente, esto se debe a la disminución de O₂ y a la presencia de CO₂ en cantidades mayores a los normales.

Interpretación de los resultados

Hemos estamos hablando de valores o medidas bajas de O₂/altas CO₂, ¿qué consideramos alto/bajo o qué porcentaje es un valor normal?

De acuerdo con Smith (1999) el cuerpo humano (respiración) en condiciones naturales inhala aire que contiene aproximadamente un 21% de oxígeno y un 0,03% de dióxido de carbono. En

cambio, el aire exhalado durante la respiración de una persona contiene un 15-16,3% de oxígeno y un 4,5% de dióxido de carbono aproximadamente. Asimismo Fernández (2005) apunta que los niveles de CO₂ en la atmósfera de una cavidad normalmente son entre 10 y 100 veces superiores al 0,034% (340 ppm) existente aproximadamente en el exterior.

Smith (1999) y legislación-publicaciones en espacios confinados, recogen los tiempos máximos de exposición y los efectos o consecuencias que se pueden producir en los seres humanos, según los valores o porcentajes que se respiran (Tabla 1).

Para las cifras que estamos midiendo, entre 19-17%, están bien definidos los efectos fisiológicos que producen en los seres humanos, pero no están regulados o cuantificados los tiempos de exposición, ni las posibles consecuencias ante estos tiempos de inhalación. Por este motivo, en trabajos en espacios confinados, al no saber el tiempo que puede llevar la realización de estos, está regulado que deban realizarse con Equipo de Respiración Autónomo (ERA). Además, los medidores de oxígeno están calibrados y tarados para hacer saltar la alarma por debajo de 19,5%. En caso de necesidad, el ser humano puede sobrevivir con aire siempre que el oxígeno no baje del 16% pero la atmósfera se vuelve intolerable si el O₂ es insuficiente o el CO₂ es excesivo.

Las sensaciones extrañas descritas pueden ajustarse a los síntomas por una concentración baja de oxígeno pero están más demostrados y justificados por altas concentraciones de CO₂ (Tabla 2).

Según el trabajo de Garry Smith (1997) el nivel de CO₂ en la sangre es un importante estimulador de la respiración. Los nervios receptores en la aorta cercana al corazón y en la arteria carótida que va al cerebro, detectan los cambios en el CO₂ del organismo. Si la cantidad de CO₂ en sangre se incrementa, aumentan la frecuencia y la profundidad de la

respiración. Cambios en el nivel de O₂ también son detectados, pero los receptores no son tan sensibles a los cambios de O₂ como los del CO₂.

Por consiguiente, no teniendo recogidas las valoraciones para la práctica deportiva, primará el sentido común y la seguridad, proponiendo las medidas recogidas en las tablas donde no se comprometan funciones corporales.

De acuerdo con Smith (1999) y Fernández (2005), el aire nocivo ha sido descrito como aquel que contiene concentraciones de CO₂ superiores al 0.5% (5.000 ppm) y concentraciones de O₂ inferiores al 18% del volumen de aire considerado. La caracterización de un aire nocivo debe ser comparada con los valores de estos gases en una masa de aire estándar; 0,034% de CO₂ y 21% de O₂. Por otra parte, la Instrucción Técnica Complementaria (4-7-2002) recoge los valores de 5.000 ppm de CO₂ durante una jornada de 8 horas y 12.500 ppm durante periodos cortos.

Formación del CO₂ en cavidad

Según James (2003) la mayoría de las cuevas tienen aire enriquecido en CO₂ aunque en la mayoría de los casos está en una proporción sólo ligeramente superior a la media a la que se encuentra en la atmósfera, que suele ser una concentración de 0,04% en volumen. Un elevado porcentaje de CO₂ en el aire de las cuevas puede ser un indicador de contaminación en la cavidad o de su entorno. Por ello es importante comprender cómo se produce y distribuye este gas en las cavidades. La presencia de dióxido de carbono en una cavidad tiene varios orígenes:

Tipo I: Adición de CO₂ al aire de la cueva en dilución con otros componentes

Al precipitar calcita a partir del agua de la cueva, se libera CO₂ de la disolución hacia la atmósfera de esta. En general, la cantidad producida de esta forma es baja y el descenso de oxígeno asociado es modesto. Por lo tanto,

Tabla 2. Modificada de Smith (1993, 1997, 1999); EspeleoMinas (2001) y Fernández (2005).

%CO ₂ en aire	Consecuencias. Efectos fisiológicos los seres humanos
0.03% (300 ppm)	No sucede nada. Concentración habitual de dióxido de carbono en el aire.
0.5% (5.000 ppm)	El ritmo en la respiración aumenta un 5%. Nivel seguro máximo recomendado durante una actividad continuada de 8 horas .
1.0% (10.000 ppm)	Comienza a aparecer los primeros síntomas, tales como sensación de calor y humedad, falta de atención a los detalles, fatiga, ansiedad, torpeza y pérdida de energía, comúnmente conocidos como flojera en las rodillas (piernas flojas)
2.0% (20.000 ppm)	El ritmo en la respiración aumenta un 50% y puede aparecer dolor de cabeza después de varias horas de exposición. La acumulación de CO ₂ en el cuerpo después de una prolongada respiración de aire conteniendo alrededor de 2% o más altera funciones vitales causando la acidez de fluidos en los tejidos. Esto provoca una pérdida de energía e incluso sentirse agotados antes de abandonar la cueva. Se debe colocar a la persona afectada durante varios días en un ambiente sano para el metabolismo del cuerpo regrese a la normalidad.
3.0% (30.000 ppm)	Aumenta la ventilación de los pulmones en un 100%, jadeos tras el esfuerzo, los síntomas incluyen: dolor de cabeza, vértigo y posible perturbación de visión (borrosa como estrellas)
5 - 10% (50.000-100.000 ppm)	Jadeos violentos y fatiga hasta el punto de la extenuación simplemente por respirar, palpitación violenta y dolor de cabeza severo. La exposición prolongada a una concentración del 5% podría producir efectos irreversibles para la salud. La exposición prolongada a una concentración mayor a 6% podría producir pérdida de conocimiento o la muerte.
10 - 15% (100.000- 150.000 ppm)	Jadeos insoportables, severos dolores de cabeza y rápida extenuación. Exposición durante pocos minutos darán con pérdida de conocimiento y asfixia sin previo aviso.
25% a 30% (250.000- 300.000 ppm)	Las concentraciones extremadamente altas causarán coma y convulsiones con sólo un minuto de exposición. Muerte segura.

la atmósfera en cuevas con formaciones no es peligrosa (James, 1997).

- Las cavidades kársticas se comportan como sumideros a través de la red de fisuras. La cantidad existente en cada momento se explica por la mezcla entre el aire exterior (ventilación) y el aire de la red de fisural (Bourges y Mangin, 2000).
- El CO₂ en disolución acuosa es un componente importante tanto para la disolución y precipitación de espeleotemas como para la disolución de las calizas (James, 2003).

Siendo el CO₂ uno de los parámetros fundamentales en el proceso de karstificación, formación de cavidades y redistribución y deposición de carbonato cálcico en forma de espeleotemas. El CO₂ liberado por la materia orgánica en superficie es absorbido por el agua de infiltración (disuelto en el agua) y abandonado por ésta al entrar en contacto con una atmósfera más pobre con diferente presión, temperatura y humedad.

Tipo II: Sustitución del O₂ por CO₂

Este tipo de enriquecimiento con dióxido de carbono se debe a la respiración de la fauna y flora de las cavidades. Según el cociente de respiración, esto implica que por cada molécula respirada de O₂ se reemplaza por una de CO₂. Pero este cociente depende del organismo que realice la respiración y puede llegar a ser inferior al 0,7%. Este tipo de enriquecimiento puede ocurrir dentro de la cavidad o en el suelo existente encima de la misma; en última instancia, el CO₂ entra en la atmósfera de la cueva por la diferencia de presión, siendo muy difícil de distinguir entre una y otra fuente (James, 1997).

Producción de origen orgánico asociado con el metabolismo de microorganismos o macrofauna (grades colonias quirópteras). Respiración humana en cavidades muy visitadas (turísticas).

Tipo III: Descenso de O₂ en el aire de la cueva sin aumento equivalente de CO₂

Hay muchos mecanismos que producen este tipo de enriquecimiento, incluyendo la adición de nitrógeno, metano o sulfuro de hidrógeno a la fracción residual o el desplazamiento del O₂ por procesos que no se deben a respiración (James 1997) (Tabla 3).

El CO₂ en las simas proviene de la oxidación lenta de materia orgánica. Según Bourges (2000) las cantidades del isótopo C¹³ indican un CO₂ de origen biogénico. El aire contenido en

el suelo raramente está por encima del 2% y no explica las cantidades que se miden en algunas cuevas. Una explicación sería la oxidación de la materia orgánica mientras circula hacia el interior de las cuevas. El déficit de O₂ igual al enriquecimiento en CO₂ apoya esta idea.

En el caso de la sima de Tierra Muerta, que años atrás, se utilizó de escombrera y basurero quedando en el fondo todavía restos de esta mala praxis, por lo que hasta que se analice ese aire no sabremos si puede ser la causa del incremento de la concentración de CO₂, además del que genere la propia cavidad (tipo I y II).

La estratificación por densidad de los diferentes gases que componen el aire de una cavidad, donde no existen intercambios importantes de masas de aire, provoca que puedan existir zonas profundas con acumulación de gases más densos como el CO₂.

De acuerdo con Smith (1997, una atmósfera muy estática donde el movimiento de aire es mínimo, puede hacer que el CO₂ se hunda hacia las partes más profundas desplazando al O₂ y al N₂. Por ello aumentaría la concentración de CO₂ en las zonas más bajas de la cueva. Aunque el CO₂ es 1,38 veces más pesado que el O₂ se dispersa en un cierto volumen de aire debido a la difusión molecular, es decir, una mezcla de gases no se separará en capas de diferentes densidades si se mantienen por un tiempo prologado en una atmósfera con aire estático, aunque se va colocando en las zonas más profundas al ser un gas más denso.

A lo que James (2003) añade que es oportuno desmitificar que este gas más-pesado-que-el-aire se hunde hasta el suelo y charcos de la cueva. La mezcla de CO₂ y aire ocurre espontáneamente por difusión. La separación del CO₂ de una mezcla de gases vía proceso inverso no es posible en las condiciones de una cueva. Como regla general, el mayor enriquecimiento de CO₂ se dará cerca de su origen.

Tabla 3 Cuevas con CO₂ tipo III y posibles causas (James y Dyson, 1981).

Cueva	Causa
Tlamaya, Méjico	Fango anóxico (natural)
Odyssey, Australia	Bacteria de hierro (natural)
Lower Cane, EE.UU.	Oxidación de sulfuros (natural)
Kacna Jama, Eslovenia	Residuos industria papelera
Sinkhole Plain, EE.UU.	Basura doméstica e industrial

Conclusiones

No somos especialistas en abordar este fenómeno, tan solo somos espeleólogos preocupados por el mismo y que han llevado a cabo una serie de mediciones desde agosto del 2017. No son todavía suficientes para llegar a conclusiones más precisas, pero hay varios hechos que ya se repiten y podemos adelantar:

1. No ocurre solo en un lugar concreto de la provincia de Cuenca, se produce en todas las zonas donde se han realizado las mediciones, independientemente de la localización geográfica y la litología.
2. Medimos principalmente en simas y en algunas cuevas, teniendo en las simas valores más bajos que en las cuevas. Por lo que se toman dos simas como referencia, centrandose en ellas el mayor número de mediciones, centrándolas en los meses en que prevemos que comienza y finaliza el fenómeno.
3. Temporalidad.: durante los meses de verano y mediados de otoño no se realiza adecuadamente la circulación o movimientos del aire de la cavidad, dándose los valores más bajos de CO₂ a finales de octubre 2019 (pudiendo variar según el año). Transcurridos los cuales la situación se normaliza. En las cavidades con morfología más complejas los valores anómalos continúan después de octubre.
4. Definimos el aire enrarecido como aquel que tiene una deficiente o nula renovación de aire, tiene una composición que hace dificultosa la respiración y en grandes cantidades puede ocasionar problemas graves.
5. Normalmente esto se debe a la presencia y aumento de CO₂ en cantidades mayores

a los normales, disminuyendo el O₂. Los valores medidos no son letales o mortales, pero si están fuera de los parámetros ordinarios.

No obstante, tampoco debemos alarmarnos más de lo debido, eso sí, ser conscientes del problema y estar atentos a los síntomas para conocer el momento de dejar la exploración para otra ocasión. Hay tiempo de reacción en el caso de encontrarnos en un ambiente enrarecido. Tenemos que ser responsables de la situación y no hacer avances innecesarios que puedan suponer algún riesgo.

**«No debemos alarmarnos más
de lo necesario: hay que ser
conscientes del problema y estar
atentos a los síntomas.»**

Hasta ahora, se ha estado cumpliendo lo aprendido de la climatología general de las cavidades y los regímenes de circulación del aire que se producen en ellas. El primer factor fundamental es la temperatura (circulación convectiva); otro es la presión atmosférica (circulación barométrica), de la que resultan los movimientos de aire en el interior de la red subterránea.

Las condiciones atmosféricas exteriores de años anteriores, con temperaturas/variaciones de presión menos extremas que las de los últimos 3 años, favorecerían la circulación convectiva y barométrica, provocando los cambios y procesos de circulación del aire dentro de las cavidades, realizándose de una manera fluida y a una velocidad razonablemente rápida (no siendo nosotros conscientes de su proceso), sin olvidarnos de la influencia de la morfología de la propia cavidad.

Hemos estado dando por hecho que en las cavidades siempre se producían movimientos

del aire y con ellos existía una circulación que lo regeneraba ya que nunca lo hemos tenido que comprobar porque no nos ha hecho falta.

En este caso se han tenido que utilizar los datos meteorológicos y mediciones del aire interior de la cavidad, viendo que se sigue cumpliendo lo que nos han enseñado. La única variación es que ahora las condiciones climatológicas exteriores, con tendencia a la elevación de temperaturas (circulación convectiva) y a los valores bajos de las variaciones de presión (circulación barométrica), provocan un retraso en los tiempos en los que se realiza la correcta circulación de aire. Por lo que, al regenerarse menos el aire interior de las cavidades, provoca situaciones de aire enrarecido, con mayores concentraciones de CO_2 y menores de O_2

Resumiendo lo expuesto en este artículo y como conclusión, ponemos como ejemplo cualquiera de las cavidades que podemos visitar (Figura 1, 4 y 5).

En los meses verano y mediados de otoño, el aire exterior a mayor temperatura y menor densidad es incapaz de introducirse en la cavidad mediante circulación convectiva, ya que el interior se encuentra un almacén de aire frío y denso que lo impide. En este periodo se produce un estancamiento de las masas de aire cuya renovación solo es posible mediante circulación barométrica, por un aumento de la temperatura interior por encima de la temperatura del aire exterior por causas antrópicas, o bien por un descenso brusco

de la temperatura del aire exterior que invierta el gradiente térmico (Fernández, 2005).

Los cambios en las temperaturas del día y la noche no parecen ser significativos al no existir gran amplitud térmica, al igual que las primeras bajadas de temperatura de los días de octubre. Sin embargo, el cambio gradual y mantenido de la temperatura desde finales de octubre sí que lleva consigo una disminución del CO_2 y un aumento del O_2 , sobre todo cuando bajan las temperaturas máximas exteriores, siendo más frías que las del fondo de la cavidad. Durante el invierno el aire exterior más frío y denso penetra en la cavidad, mientras que el aire de mayor temperatura y menor densidad sale de la cavidad, regenerando el aire de la cavidad.

Estos valores anómalos no son un hecho casual, ya que se está repitiendo en los meses verano y mediados de otoño de varios años consecutivos (habrá que medir los siguientes), dándose el hecho de que estos valores son inferiores a las concentraciones normales o habituales. Por ello, coordinados por la Delegación Provincial de Desarrollo Sostenible en Cuenca y el Servicio de Medio Ambiente y Biodiversidad, se empieza a elaborar un inventario de cavidades en las que la visita requiere de precauciones previas. Se colocan carteles de aviso en los que se informa de que pueden darse valores bajos de O_2 , teniendo que visitar la cavidad con precaución (Fig. 12). Temporalmente se colocará uno de prohibición en el caso de encontrar valores no seguros para la visita a la cavidad (Fig. 13).



Figuras 12 y 13. Carteles de aviso. Izquierda: tomar precauciones al realizar la visita. Derecha: Acceso prohibido.

Debemos cambiar el modo en que veníamos practicando la espeleología, empezando a tomar y tener presente unas precauciones, consejos o medidas a tomar:

- Observar los carteles de Precaución/ Prohibido Temporal. Principalmente en los meses de verano y mediados de otoño, ampliable según la morfología de cavidades.
- Teniendo en cuenta los meses en los que las cavidades pueden contener una mayor proporción de CO₂ y una menor de O₂. Estar atentos a los síntomas que aparecen en las tablas 1 y 2 para saber diferenciar el cansancio de la existencia de aire viciado.
- Llevar medidor O₂ / CO₂. Improvisar medios alternativos: mechero, etc.^(B)
- Cada persona es distinta, según su condición física o entrenamiento. No callarse las sensaciones.
- Cuidado especial las personas con problemas respiratorios, notarán antes los síntomas que el resto de sus compañeros.
- No dudar en dar la vuelta cuando notemos algunos de estos síntomas, eso sí, yendo con tranquilidad y, sin entrar en pánico, salir de la cavidad.
- No promover avances innecesarios. El primer espeleólogo puede estar metido en *zona de precaución* y sus compañeros que van detrás en *zona de confort*, por lo

que los deportistas segundos no deberán animar o promover avances a los primeros que supongan riesgos.

- Al utilizar descendedor, nos podemos encontrar zonas con distintas concentraciones O₂ y CO₂ en pocos metros (estratificación). Realizar avances despacio y progresivos, sobre todo al llegar al fondo de los pozos, donde pueden darse los valores más bajos de oxígeno.
- Prever una posible ayuda o evacuación, llevando una cuerda auxiliar para que desde el exterior nos puedan ayudar.
- Cuidado en las zonas menos ventiladas: finales de galerías (fondo de saco), pasos estrechos, zonas bajas de cavidad. La respiración (exhalación) de grupos numerosos en espacios reducidos pueden aumentar los niveles de CO₂, bajando los de O₂.
- Atención cuando la actividad espeleológica requiera un alto esfuerzo físico con una reducida concentración de oxígeno. Valorar que concentración es segura y por cuánto tiempo, no debiendo asumir riesgos.
- Conocer y contemplar las observaciones descritas en el apartado de resultados.
- Antes de realizar una actividad preguntar cuáles son los datos de las últimas mediciones obtenidas por otros espeleólogos. Tras la actividad, informar de nuestros propios datos si llevamos medidor de oxígeno.

^(B) La prueba del mechero (es mejor que utilizar cerillas o una vela) nos muestra un fenómeno curioso: en el exterior la llama permanecerá ardiendo desde la salida del gas pero cuando estamos en una atmósfera que no soporta una buena combustión (una baja concentración de O₂) como por arte de magia la llama permanecerá ardiendo donde la atmósfera soporte la combustión justo por encima de la transición entre baja y alta concentración de O₂ mientras que el mechero está varios centímetros bajo la zona de separación (7,5 - 10 cm) (Garry Smith, 1997).

Aunque esta prueba no nos da información sobre el contenido en CO₂ se puede apreciar en los datos tomados, que siempre que en la atmósfera hay poco oxígeno también hay una mayor cantidad de CO₂, aunque no haya una correspondencia exacta entre los valores de ambos gases. (Los valores de menos de 17% de O₂ siempre van acompañados por valores de CO₂ por encima de 17.000 ppm (1,7%).

Trabajos y futuros escenarios

- Elaboración de un catálogo de cavidades que se deberán visitar con precaución. Este inventario de cavidades requerirá una serie de mediciones a lo largo del año.
 - Los meses de invierno-primavera, según nuestros datos, deben ser normales (aire no enrarecido).
 - En los meses de verano y comienzo del otoño es cuando debemos estar más atentos, pues es cuando se dan valores de aire enrarecido.
 - Sería interesante conocer cuando comienza el aire de la cavidad a estar enrarecido y cuando deja de estarlo en distintas cavidades, pudiendo así también conocer la relevancia que tiene el tipo de morfología de la cavidad (al corregirse, o no, en los mismos tiempos que las simas de referencia).
 - A través de las siguientes medidas a llevar a cabo con el inventario inicial veremos los comportamientos en cuanto a valores, fechas de comienzo y final del aire enrarecido, afectación y recuperación. Se podrán determinar unas cavidades de referencia en cada zona.
 - Establecer unos lugares o profundidades donde hacer las mediciones en cada cavidad, para realizarlas siempre en esos lugares y poder comparar los datos obtenidos en las mediciones.
 - Según permitan los valores, primar seguridad, recoger medidas a varias cotas y en el fondo, que será el valor más bajo de los niveles de O_2 y mayores de CO_2 .
 - Comparación de los valores obtenidos en el interior con las condiciones climatológicas exteriores. Datos AEMet.
- Según disponibilidad de medidores. Medir el O_2 y la concentración de CO_2 , para obtener más datos e información de cómo y cuándo se produce este aire enrarecido.
 - Realizar medidas y analizar el CO_2 para intentar localizar su formación o procedencia.
 - Comprobar las cavidades que sean una excepción al tener valores distintos a los de las cavidades de su alrededor. Las posibles causas serían: tener distinta morfología, tener otra entrada de aire a distinto nivel, no siendo visible o accesible, etc.
 - Debido a las causas que pueden estar originándolo (condición atmosférica exterior), se debería producir en más lugares, aparte de la geografía conque. Facilitar resultados obtenidos para su posible estudio y comparación en otras zonas.

Agradecimientos

Delegación Provincial de Desarrollo Sostenible en Cuenca. Servicio de Medio Natural Biodiversidad.
Bomberos Excm. Diputación de Cuenca.
Ángel Fernández Cortés.

Bibliografía

Abelló Linde. Deficiencia de oxígeno. Consejo de Seguridad 3 y 12.
Altube Basterretxea, I. (2003): Trabajos en Recintos Confinados. (OSALAN, Gobierno Vasco, IFPRL).
ANSI/ASSE Z117.1 Requerimientos de Seguridad para Espacios Confinados.
Barragán Cervera, A. y Cantavella Jordá, S. Mediciones de CO_2 , O_2 , Temperatura del Aire y Temperatura del Agua en las Caves de Sant Josep.
Bourges, F. Y Mangin, A. 1998 (Brest) 2000 (Paris).
Le CO_2 dans l'atmosphère des grottes, sa place dans la dynamique des systèmes karstiques. Communications aux réunions des sciences de la terre.

- Cuenca Rodríguez, J.J., y Céspedes Campos, M. (1998): Manual de Iniciación a la Espeleología. 3ª edición. (FEE)
- Escuela de administración pública. Región de Murcia. Prevención de riesgos laborales en tareas con espacios confinados.
- Fernández Cortés, A. (2005): Caracterización Microclimática de Cavidades y Análisis de la Influencia Antrópica de su Uso Turístico. Departamento de Hidrogeología y Química Analítica. Universidad de Almería. Tesis Doctoral 181 pp. 87-106
- Fernández Cortés, A., Pérez López, R., Cuezva, S., Calaforra, J.M., Cañaveras, J.C. y Sánchez Moral, S. (2018): Seguimiento y caracterización fisicoquímica de gases de efecto invernadero en ambientes subterráneos hipogénicos activos: caso de la Sima del Vapor (Alhama de Murcia). Sociedad Española De Espeleología y Ciencias del Karst (SEDECK) Boletín nº 12
- Frías Fernández, P. Inhalación de oxígeno y aire en la respiración humana actividad reposo moderada muy vigorosa.
- Ginés, A. Hernández, J. Ginés, J. Pol, A. Grup Espeleologic EST. Palma de Mallorca. Observaciones Sobre la Concentración de Dióxido de Carbono en la Atmósfera de la Cova de les Rodes (Pollença, Mallorca) Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es>
- Giraldo, E., Gázquez, F., Fernández Cortés, A., Argumosa, A. y Calaforra, J.A. Cálculo de la visitabilidad máxima en cavidades turísticas mediante el Método Cavix: El Soplao (Cantabria, España).
- Instituto de Salud Pública. Gobierno de Chile. Septiembre 2016 Guía Para los Trabajos en Espacios Confinados.
- Instrucción Técnica Complementaria (2002). Concentraciones límites de gases. Temperatura, humedad, clima. Recuperado www.ins.es
- James, J.M. (2003): Carbon dioxide-enriched cave air. En: Gunn, J. (ed.), Encyclopedia of caves and karst sciences, Routledge, USA, 183-184 pp. Recuperado de <https://espeleominas.blogspot.com>
- LEY 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- Martínez Hernández, J. (2004) Manual de Espeleología (Desnivel Ediciones).
- Martínez Hernández, J. y Villaverde Mora, F. Grupo GET. Sumidero de Acebreiros. Grupo de Espeleología de Villacarrillo G.E.V. (ed.) Año 2015 Gota a Gota, nº 6: 94-103 pp.
- Ministerio Trabajo y Asuntos Sociales. INSHT. Guía de Actuación Inspectoral en Espacios Confinados.
- Ministerio Trabajo y Asuntos Sociales. INSHT. Nota técnica de Prevención (NTP) 223.
- Olcina Cantos, J. y Martín Estévez, D. (2012): Variaciones en la densidad del oxígeno y su influencia en la salud humana. Universidad de Alicante. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, n.º 58, págs.7-32
- OSHA 29 CFR 1910. 146 Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Permisos requeridos en espacios confinados.
- Pérez López, R. y Martínez Díaz, J.J. (2016): Simas calientes en el corazón de una falla activa. El ejemplo de la Sima del Vapor en la Falla del Alhama de Murcia. Asociación Española de Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra. AEPETC.
- Pérez Raja, P.A. (2016): Protocolo de seguridad en espacios confinados. Universidad de Alicante
- Petitt, T. Linn, H. (1987). National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). A Guide to Safety in Confines Spaces.
- REAL DECRETO 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- Smith, G.K. (1996): Non-Toxic "Foul Air" Can Kill. Published 'Rescue Australia'. Recuperado de <https://espeleominas.blogspot.com/2011/06/dioxido-de-carbono-las-cavidades-y-tu.html>
- Smith, G.K. (1996): Naked Flame Test for, and humans Tolerance to, Foul Air in Caves Helictite 34(2). 39-47 pp.
- Datos mediciones cavidades. Recuperado de www.facebook.com/clubaracuena
- Datos meteorológicos AEMET estación Cuenca. Recuperado de www.opendata.aemet.es
- Datos climáticos variados, recuperados de: www.aemetblog.es
www.noaa.gov
www.public.wmo.int
www.climate.copernicus.eu/climate-bulletins
- Datos de otras zonas, recuperados de: www.cuevadelagua.net
www.cavitatscatalaneshipoxia.blogspot.com
www.cuevascastellon.uji.es