



Equipos para la medición de la calidad del aire y el clima en cavidades para espeleólogos

Andrés Ros ⁽¹⁾, José L. Llamusí ⁽¹⁾, Ángel Fernández-Cortés ⁽²⁾ José M. Calaforra ⁽²⁾
Fernando Gazquez ⁽²⁾, José Antonio Soto ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro de Estudios de la Naturaleza y el Mar cenm@cenm.es,

⁽²⁾ Universidad de Almería, acortes@ual.es

Contact; cenm@cenm.es

Abstract: In caves, know the quality of the air or in spaces without ventilation such as post-siphon bubbles, mine galleries, etc. and other places where non-breathable gases or low concentrations of O₂ can be stored, it is a fundamental and mandatory question to guarantee the safety of explorers. At present, the study of gases in cavities is allowing to know and obtain data on the dynamics of gases and air, from the deepest areas and their relationship with morphologies, corrosive processes, and their effects on the underground system, providing new methods to understand the processes involved in the formation and development of cavities.

A selection of equipment that has been used and tested in cavities is compiled. The equipment is grouped into two sections, the first "essential equipment", which includes measuring instruments that all groups of cavers should carry as they are the ones that can guarantee the breathing of air in closed environments or warn us of the risks due to the accumulation of gases. A second group, which we call "equipment for climate analysis", which allows obtaining data on the dynamics or the state of the climate of the cavities.

Keywords: *Climate equipment, caves, CO₂, temperature, humidity, gases*

Citation: Ros, A., Llamusí J.L., Fernández-Cortés A., Calaforra J.M., Gazquez F., Soto J.A., 2020. *Equipos para la medición de la calidad del aire y el clima en cavidades para espeleólogos*. Publicaciones digitales CENM-naturaleza. Spain, www.cenm.es

INTRODUCCION

Las cuevas tienen unas características muy estables, así se ha considerado tradicionalmente. Estudios recientes nos indican que existe una dinámica del clima y gases que puede variar de forma natural en diversas épocas, como lo demuestran algunas cavidades analizadas (Chervyatsova et al 2019; Ginés et al 1987, 2017; Ros A. Llamusí, 2018), en otras por alteraciones externas como sucede en el macizo del Garraf (Domingo L. et al 2019).

En algunas cavidades puede encontrarse aire "enrarecido" o con parámetros no aptos para la respiración a corto o medio plazo, que suponen un riesgo importante para los espeleólogos, estas situaciones pueden suceder en nuevas cavidades

con escasa ventilación, burbujas de aire en cuevas submarinas, galerías tras sifones, zonas confinadas, y cuevas hipogénicas o hidrotermales con cierta actividad. Hay ejemplos donde es vital el control de la calidad del aire, Murcia, Baleares, Cuenca (Pérez-López et al, 2016; Ginés et al, 2017; Atienza et al. 2019), a fin de evitar incidentes o accidentes, y que pueden variar de una época a otra, como puede suceder con el Dióxido de Carbono (CO₂) ya que aumentos de este gas pueden desplazar el Oxígeno O₂, disminuyendo sus concentraciones, creando atmosferas no respirables, Atienza de la Cruz C, (2019), describe algunos casos en cavidades de Cuenca, también hay graves problemas de bajas concentraciones de O₂ y otros gases nocivos en cavidades del macizo del Garraf (Domingo L. et al 2019). Otro elemento que cada día se va concienciando más es la presencia y distribución de gas radón (²²²Rn) en cavidades.

Se trata de un gas derivado de la desintegración de elementos radiactivos de la roca y que se va acumulando en la atmósfera de la cavidad. Debido a que el gas radón también se desintegra y emite partículas ionizantes, se trata de un gas radiactivo. La exposición al radón durante tiempos prolongados es nociva para la salud humana (Organización Mundial de la Salud 2015). Se empiezan a conocer datos de radón en cavidades, algunos sorprendentes y que indican que la permanencia prolongada en algunas cavidades puede resultar altamente preocupante.

La observación del clima y gases está apartando nuevos conocimientos científicos en el análisis del clima en cavidades y sobre todo de la dinámica de gases. De entre ellas, las cavidades de origen hipogénicas o hidrotermales son lugares que aportan datos muy importantes para el estudio de las emisiones de gases naturales de zonas profundas, datos muy valiosos para conocer sus orígenes y dinámica de gases.

En este trabajo nos centramos en los equipos para medir y analizar gases y datos del clima más comunes que se pueden analizar por espeleólogos en cuevas; temperatura, humedad, punto de rocío, concentración de oxígeno (O₂), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), radón (²²²Rn), sulfuro de hidrógeno H₂S y gases combustibles (LE). Para ampliación en la información y datos técnicos de los equipos, hemos creado una tabla online que puede consultarse en www.cenm.es

1. Equipos

Actualmente en el mercado se puede encontrar una amplia gama y precios de diversos equipos que permiten analizar el aire y el clima de las cavidades con cierta facilidad. Si bien la lista es larga y existen instrumentos para todos los gustos, hemos seleccionado una serie de equipos que dividimos en dos grupos recomendados para uso por espeleólogos, la mayoría probados con excelentes resultados.

En primer lugar, analizamos los equipos “imprescindibles” que deberían llevar todos los espeleólogos. Éstos permiten analizar la calidad del aire respirable, son los denominados equipos “multigas”. Y un segundo grupo denominado “equipos para análisis y dinámica de gases” que nos permiten realizar estudios sobre el clima y los gases en cavidades.

1.1 Equipos imprescindibles, multigas.

En este grupo entran los equipos “multigas”, son equipos que permiten realizar análisis de la calidad del aire respirable de forma continuada con un solo equipo. Están indicados para equipos de exploraciones donde el descubrimiento de nuevas galerías, poco ventiladas pueda suponer un riesgo por acumulación de gases no respirables o un desplazamiento del O₂ por debajo del nivel respirable. Son instrumentos vitales para la exploración de zonas de cuevas submarinas donde se localicen burbujas o galerías posteriores a un

sifón. Se trata de equipos de uso obligatorio para cavidades con zonas de minas o minas poco conocidas, o cuevas con ambientes extremos, ejemplos notables, como son la sima del Vapor en Murcia (con niveles bajos de O₂ y otros gases; Fernández-Cortés A. et al, 2018), cavidades en Garraf (con problemas de niveles bajos de O₂ y altas concentraciones de CO₂; Domingo L., et al, 2019), algunas cavidades en Cuenca (Atienza de la Cruz, et al, 2019), la Cueva del Agua en Cartagena donde varias burbujas de aire el CO₂ oscila con valores altos y baja peligrosamente el nivel del O₂ (Llamusi J.L., et al 2020). La Federación Catalana de Espeleología tiene publicado un mapa donde se pueden ver cavidades con problemas de hipoxia y otros problemas de gases

<https://www.espeleologia.cat/es/hipoxia/> .

Todo espeleólogo que explore nuevas cavidades, y no disponga de información adecuada, o entre en zonas confinadas de escasa ventilación, sifones, y minas, deben llevar un equipo multigas para la comprobación de la atmósfera respirable, que garantice su seguridad.

Los equipos multigas son utilizados en entornos de riesgos por gases tóxicos, explosivos o bajo nivel de O₂, estos permiten alertar de cualquier riesgo respirable por cualquier gas de los que miden. Son de fácil adquisición en el mercado y muy útiles. Se trata de equipos obligatorios para espeleólogos de exploración, tanto aérea, submarina como en minas, el muestreo continuo del aire permite obtener resultados inmediatos.

Actualmente en el mercado se encuentran numerosos equipos y precios diferentes, pero si lo que se va a analizar es la calidad del aire respirable, es necesario que cumplan una serie de requisitos y estén debidamente certificados;

Como mínimo deben realizar mediciones del oxígeno respirable y otros gases como CO, H₂S, LEL y CH₄:

- Análisis del Oxígeno O₂ de forma continuada con alarmas por debajo de niveles respirables.
- Análisis del CO (Monóxido de Carbono).
- Análisis del H₂S (Ácido Sulhídrico).
- Gases inflamables LEL (CH₄ Metano).

También pueden llevar otros tipos de sensores. El mercado es amplio y variado tanto en calidad como en precios, una garantía es que cumplan especificaciones CE y que estén certificados para su uso profesional.

De entre los numerosos equipos que se encuentran en el mercado hemos seleccionado dos modelos;

[Detector de Gas Portátil Multigas ALTAIR 4xR.](#)

Fabricado por MSA es un equipo para protección

profesional, con certificaciones IECEX y ATEX, que analiza en tiempo continuo los niveles de O₂, Co, H₂S, LEL, CH₄. El tiempo de respuesta es de 30 segundos, con alarma sonora y visual. Tiene una resistencia al agua de 2 metros durante 60 minutos. Resistente a caídas de hasta 7.5m IP68, **foto 1A**.

Este modelo de equipo es usado por profesionales, equipos de extinción de incendios, profesionales de industrias, etc. Es uno de los más solicitados y fiables. Tiene un servicio de verificación y cambio de sensores cada cierto tiempo. Es el equipo que habitualmente usamos para nuestras actividades espeleológicas con notables resultados y fiabilidad.



Foto 1. Equipos multigas A. Altair 4x y B. Smart Sensor ST8900

Detector Smart Sensor ST8900.

Detector de cuatro gases para medir los niveles de H₂S, O₂, CO y combustibles LEL en entornos naturales e industriales, en seguridad, e investigación. Alarma de vibración de sonido y luz cuando una de las concentraciones de gas alcanzar el nivel de alarma. Para uso en industria, minería, etc. **foto 2B**.

Es un equipo de bajo coste NO probado pero las referencias indican que podría resultar efectivo.

1.2 Equipos para análisis clima y gases.

Este tipo de equipos permite conocer la dinámica del clima y gases en cavidades, datos como temperatura, humedad, punto de rocío, CO₂, H₂S, radón. El estudio de estos datos permite avanzar en las investigaciones de las cavidades como es su relación con agua o termalismo profundo, repercusiones en las morfologías, procesos corrosivos, etc. entre otras cuestiones, día a día aumentan los equipos que pueden ser usados por espeleólogos para el análisis de estos gases, así como la interpretación de los datos obtenidos.

En este grupo de equipos se encuentran dos tipos, los equipos datalogger, que nos permiten registrar los parámetros ambientales durante largos periodos de tiempo. Y equipos de mediciones directas o puntuales que permiten obtener datos durante las visitas a

cavidades.

El mercado ofrece una amplia variedad de equipos y actualmente son asequibles para cualquiera, resulta difícil decantarse por un modelo o fabricante, en este trabajo presentamos los que habitualmente usa nuestro equipo.

En los equipos para análisis de clima y gases se pueden medir o analizar diversos parámetros y gases según nuestro interés:

Temperatura, nos puede informar si la cavidad mantiene la temperatura estable o variable en diversas épocas del año. Los equipos datalogger nos permiten poder obtener largos periodos con muestreos cada cierta hora o minutos. Los equipos pueden medir en grados, decimas, centésimas, milésimas, estos últimos suelen ser más caros por la precisión centesimal o mayor, y salvo que sean para estudios muy precisos no suelen llevarse por espeleólogos, solo equipos más convencionales de grados, decimas.

Los equipos de temperatura pueden llevar sensores de humedad o ser solo de temperatura esto es más habitual en los datalogger como el modelo RC-5 de Elitech, un equipo de bajo coste con capacidad para almacenar 32.000 registros y ajustes de intervalos, tolera muy bien la humedad ambiental y se puede tener hasta un año registrando.

El SBE56 de Sea Bird Scientific es un equipo de alta precisión, sumergible hasta 1500m y amplia capacidad de registros más de 15 millones y programable. Actualmente también se pueden usar termómetros laser que nos da el dato de temperatura en pared de una forma puntual, rápida y precisa.

Humedad, nos permite conocer el grado de humedad de la cavidad, generalmente más humedad que el exterior. Al igual que con la temperatura, también encontramos equipos datalogger y equipos para mediciones directas. Los equipos datalogger suelen medir temperatura y humedad, algunos incorporan acceso para medir el "punto de rocío" o nivel de condensación máximo del ambiente, esto es importante para conocer si la cavidad está depositando agua en las paredes por condensación ambiental o está en proceso de evaporación.

Una cuestión importante es el tipo de sensor de la humedad, debido a que algunos sensores condensan la humedad y generan una gota que pueden dar datos erróneos. Conviene probar los equipos y ver el grado de tolerancia de la sonda con la humedad.

Las mediciones se realizan en % siendo 100 el punto máximo de condensación de humedad para generar agua. Al igual que los termómetros los precios oscilan muy diferentes entre equipos que midan centésimas o más % de humedad.

Modelos

Datalogger: Al igual que en temperatura los hay datalogger y de medición directa puntual, entre los datalogger destacamos el modelo RC-51H de Elitech, un

equipo compacto que también mide la temperatura y que ha mostrado una buena adaptación a la humedad ambiental. Puede almacenar hasta 32.000 registros y ajustar los intervalos, las baterías suele tener una duración de un año, aunque conviene revisarlo cada 4-6 meses.

Sensor de temperatura SBE 56. Es otro modelo a tener en cuenta pese a un precio más elevado es el SBE 56E, es un equipo de registro continuo de temperaturas datalogger de alta precisión, para mediciones continuas en navegación submarina. Con una capacidad de hasta 15.9 millones de muestras y precisión de temperatura de: $\pm 0,002$ ° C y resolución de temperatura: 0.0001 °C, sumergible, es uno de los equipos para análisis de la temperatura de mayor capacidad, precisión y resistencia.

Dióxido de Carbono

El Dióxido de Carbono (CO_2), es un gas que se emite de forma natural desde las profundidades y que también emite el ser humano, por ello los equipos se deben alejar del operador al realizar mediciones para no falsear las medidas. Suele ser más abundante en cavidades hipogénicas, hidrotermales o volcánicas. Su medida se realiza en partes por millón (ppm) o en porcentaje.

El CO_2 es un gas que en algunas ocasiones procede de zonas calientes profundas, vulcanismo, termalismo, etc. Suele ser frecuente en cuevas de origen volcánico, hipogénico o hidrotermal, puede alcanzar altos niveles de concentración en cavidades poco ventiladas o con un termalismo incipiente. Puede alcanzar niveles no respirables por encima de los

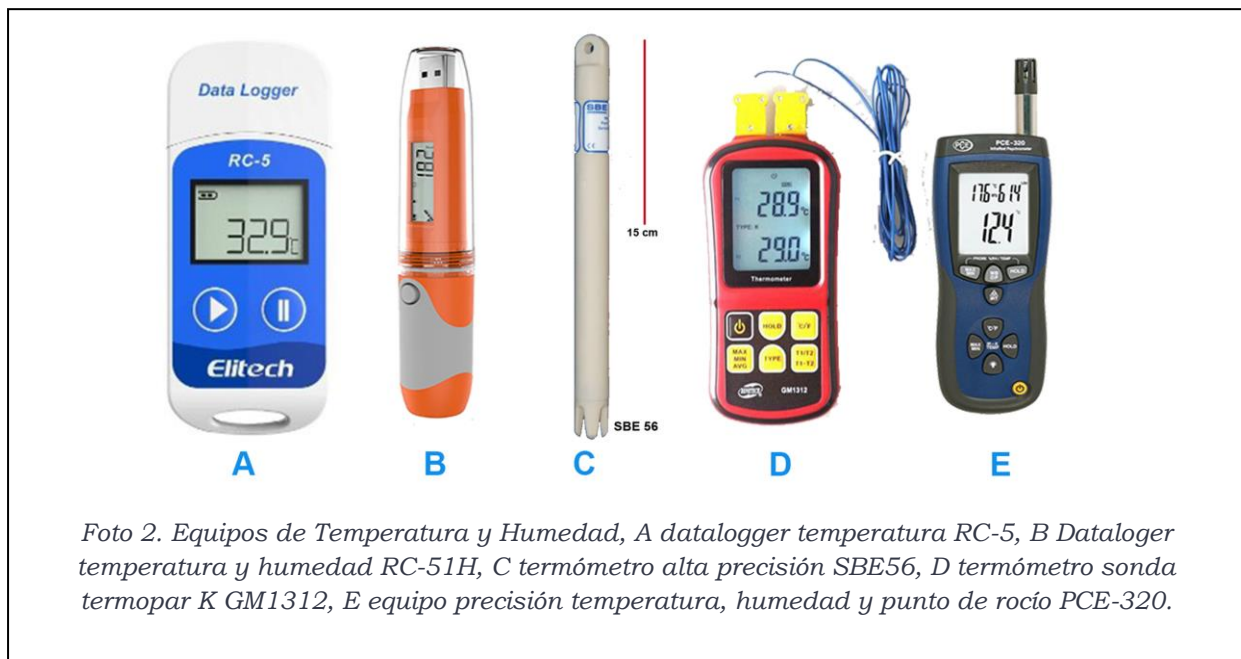


Foto 2. Equipos de Temperatura y Humedad, A datalogger temperatura RC-5, B Datalogger temperatura y humedad RC-51H, C termómetro alta precisión SBE56, D termómetro sonda termopar K GM1312, E equipo precisión temperatura, humedad y punto de rocío PCE-320.

Medición directa: Suelen encontrarse en el mercado una amplia variedad de equipos, se han seleccionado dos tipos: equipos de temperatura con sonda termopar tipo K, suelen ser muy rápidos y normalmente llevan doble pantalla con indicador de temperatura ambiente y la temperatura de la sonda, esta nos puede permitir sumergirla en el agua y tener medición de aire y del agua a la vez. Uno de los modelos asequible y fáciles de encontrar es el GM1312, de bajo coste con conexión para dos sondas termopar tipo K y dos medidas a la vez.

PCE-320 es un equipo de precisión que puede medir temperatura, humedad y punto de rocío. Permite conocer el grado de saturación de humedad de la cavidad y si está condensando agua en las paredes. También incorpora un medidor laser de temperatura y sonda termopar tipo K.

30.000 ppm 3% vol. Los valores en cavidades pueden variar a lo largo del año, y de una estación a otra por lo que es conveniente hacer un seguimiento durante periodos prolongados. En cuevas hidrotermales hemos podido ver mayores niveles en toberas, feeders o fracturas profundas. Su presencia en valores muy elevados puede ser indicador de cueva hipogénica o hidrotermal, e incluso de la presencia de redes profundas.

Altos niveles de CO_2 suelen ir acompañados de bajos niveles de O_2 en zonas de poca ventilación en cavidades, lo cual se debe a un desplazamiento en la masa del O_2 por aumento del CO_2 . Se ha registrado casos como en la Cueva del Agua, en Cartagena (Llamusi, et al 2020), Sima del Vapor en Alhama de Murcia (Fernandez-Cortés et al 2018) Sima de la Tierra Muerta en Cuenca (Atienza de la Cruz et al 2019), cuevas y sima en Garraf presentan altos niveles de CO_2 y baja concentración de O_2 (Domingo L. et al 2019), y

FCE (<https://www.espeleologia.cat/es/hipoxia/>).

Los equipos para la medición del CO₂ son fáciles de encontrar en el mercado. El mayor problema lo tiene los equipos datalogger, debido al consumo de energía de los sensores que limita bastante las baterías.

Actualmente los nuevos modelos de sensores de bajo consumo que están apareciendo en el mercado, como es el caso del CO2METER que permite mediciones de hasta 200 días. Otro parámetro limitador a tener en cuenta es como les puede afectar la humedad que puede llegar a bloquear los sensores, para ello se deben comprobar previamente para ver si la electrónica puede verse saturada por la humedad.

los primeros equipos en disponer de uno de los sensores de bajo consumo de Senseair con auto calibrado automático, su dificultad está en el gran consumo de baterías. No está diseñado para llevar baterías y precisa de un cable adaptador y batería externa para uso de campo. Recomendable para mediciones directas o puntuales, ha sido el equipo que hemos usando durante varios años, más referencias en www.cenm.es.

HT2000, foto 3C, equipo de medición de CO₂, temperatura y humedad con visor es un equipo que incorpora los nuevos sensores Senseair S8, portátil,

Límites de exposición (% en aire)	Efectos sobre la salud
2-3	Imperceptible en reposo, pero en actividad marcada falta de aliento
3	Respiración se hace notoriamente más profunda y más frecuente durante el reposo
3-5	Aceleramiento del ritmo respiratorio. Repetida exposición provoca dolor de cabeza
5	Respiración se hace extremadamente dificultosa dolores de cabeza, transpiración y pulso irregular
7.5	Respiración acelerada, promedio cardíaco aumentado, dolor de cabeza, transpiración, mareos, falta de aliento, debilidad muscular, pérdida de habilidades mentales, somnolencia y zumbido auricular
8-15	Dolor de cabeza, vértigo, vómitos, pérdida de conciencia y posible muerte si el paciente no recibe oxígeno inmediatamente
10	Agotamiento respiratorio avanza rápidamente con pérdida de conciencia en 10 – 15 minutos
15	Concentración letal, la exposición por encima de este nivel es intolerable
25+	Convulsiones y rápida pérdida de conciencia luego de unas pocas aspiraciones. Si se mantiene el nivel, deviene la muerte.

Efectos de diferentes concentraciones de CO₂ sobre la salud. (Baxter, 2000; Faivre-Pierret and Le Guern, 1983 and refs therein; NIOSH, 1981). Fuente ivhhn.org

Equipos para CO₂:

CO2METER, foto 3A, es un equipo datalogger para medir CO₂, de alta precisión, también mide temperatura y humedad. Sin visor, su capacidad puede llegar a 200 días según el intervalo de registro, aunque hay que aislarlo en cámara seca ventilada para evitar que la humedad afecte los sensores, es uno de los pocos que nos puede permitir hacer registros permanentes durante un tiempo en un lugar fijo, más referencias en www.cenm.es.

CDL210, foto 3B, equipo de medición de CO₂, temperatura y humedad con visor, para tomas directas, aunque indica que puede ser datalogger. Fue uno de

incorpora baterías AA, con auto calibrado automático, puede ser datalogger. Limitado por la duración de las baterías, aunque se le pueden conectar baterías externas de mayor capacidad. Recomendado para mediciones directas o puntuales. Es uno de los equipos compactos y portátiles que mejor se adaptan a la espeleología, más referencias en www.cenm.es.

Radón

Este gas está presente en la naturaleza. Se produce por la desintegración del radio (²²⁶Ra), elemento altamente radiactivo. En cavidades se ha detectado y en algunas en altas concentraciones, Sima del Vapor Murcia 50.000 Bq/m³ (Pérez López et al, 2016), Cueva

del Castañar Extremadura con 34.000 Bq/m³ de media (Cueva s., et al 2015). Varios factores pueden contribuir a estas altas concentraciones, cavidades de origen profundo, termalismo o vulcanismo activo, etc.

La presencia de cantidades elevadas de radón

portátil, básico solo para Radón, los primeros datos se obtienen a las 24h. Rango medición hasta 0 - 9.999 Bq/,3.

- [Corentium Plus Airthings](#), foto 4B, medidor portátil Avanzado, mide Radón, temperatura, humedad y

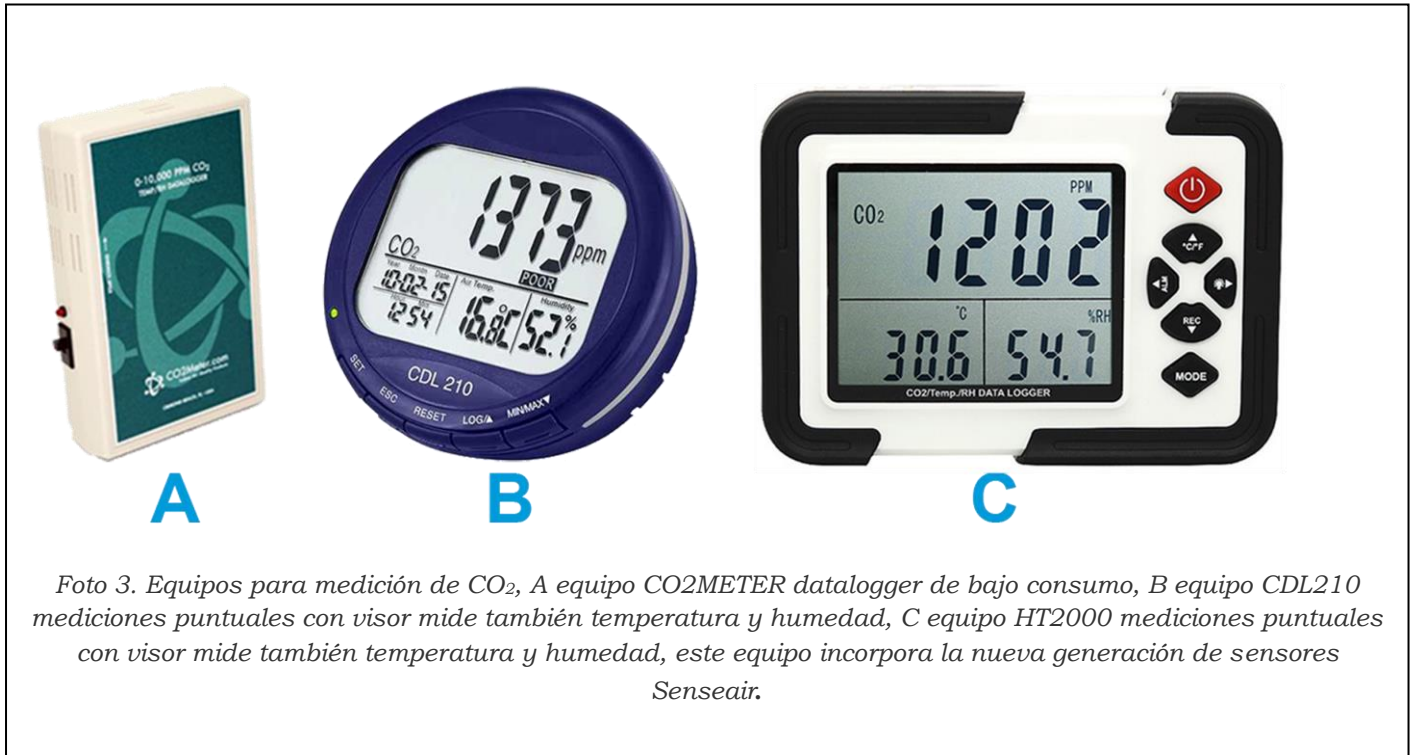


Foto 3. Equipos para medición de CO₂, A equipo CO2METER datalogger de bajo consumo, B equipo CDL210 mediciones puntuales con visor mide también temperatura y humedad, C equipo HT2000 mediciones puntuales con visor mide también temperatura y humedad, este equipo incorpora la nueva generación de sensores Senseair.

indica poca ventilación, generalmente suele venir acompañado de altos niveles de CO₂, al haber poca renovación de aire, aunque estos datos pueden variar por efecto del clima exterior verano invierno donde se pueden haber intercambios de aire cálido y frío, (Atienza de la Cruz et al 2019). Su presencia en las cavidades puede ser perjudicial hay que evitar su exposición, a altas concentraciones o exposiciones prolongadas puede ser cancerígeno. De hecho, es el segundo causante del cáncer de pulmón según la OMS (2015) que establece una exposición de entre 100 a 300Bq/m³ anualmente como máximo.

El Radón es un gas que se emite de forma natural y este puede ser variable a lo largo del año por lo que su medida efectiva debe hacerse a lo largo de un año y con mediciones cada cierto tiempo.

Equipos medidores de Radón

Los equipos para su medición se basan en dos tipos de detección;

Espectroscopia energética están indicados para mediciones a largo tiempo por acumulación, pueden estar hasta un año, aunque la humedad en cuevas puede ser un factor a tener en cuenta con la electrónica del equipo. En este tipo de equipos se encuentran los modelos de Airthings;

- [Corentium Home Airthings](#), foto 4A, es medidor

presión, conexión usb para informes. Los primeros datos se obtienen a la hora, registra datos hasta 10 años con 1 hora de resolución.

- [Wave Airthings](#), foto 4C, monitor portátil para medir Radón, temperatura y humedad a través de app conexión a un terminal móvil Bluetooth. Dispone de una cámara de difusión pasiva y usa espectrometría Alfa para calcular el nivel de radón de forma precisa. Un fotodiodo de silicón detecta el radón, cuenta y mide la energía de las partículas alfa resultantes de la cadena de desintegración del gas radón, se autocalibra en los primeros días. Los primeros datos se obtienen a la hora y puede estar registrando datos hasta 1,5 años con dos baterías AA. Equipo que por su coste es una buena opción para espeleólogos.

Sistema de detección por cámara ionizante, en los que la respuesta de mediciones suele ser más rápidas por lo que son ideales para mediciones puntuales o directas. Aunque no están diseñados para usos portátil se puede adaptar una batería para su uso en cavidades, al igual que los equipos con circuitos electrónicos la humedad puede afectar su funcionamiento. Entre los equipos que integran cámara ionizante los modelos, están los RadonEye, foto 4C. Equipo compacto precisa de batería externa, en menos de una hora se obtienen los primeros datos.

Captadores pasivos de radón

También existen unos captadores pasivos de radón (del tipo de trazas o Alpha-track), que se han de colocar en puntos bien elegidos de los lugares de trabajo. Los captadores deben permanecer en el sitio elegido durante un periodo (no menor de tres meses). Tras ese tiempo, se manda cada captador, siguiendo las instrucciones, al laboratorio especializado que “leerá” el resultado, acompañado de una ficha informativa sobre las características del espacio en el que estuvo colocado. La empresa www.radiansa.com ofrece estos servicios.

Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural, publicada en el BOE el 26 de enero de 2012.

Sulfuro de hidrógeno (H₂S)

El H₂S es un gas inflamable en concentraciones entre el 4 - 46%. Tiene un olor característico a huevos podridos, perceptible en contenidos muy bajos en un rango de 0.008-0.2 ppm. Es 1.2 veces más pesado que el aire. El rango de las concentraciones típicas de H₂S en fumarolas volcánicas diluidas es de 0.1-0.5ppm. El H₂S es un gas tóxico y el peligro depende tanto de las duraciones de la exposición como de la concentración.

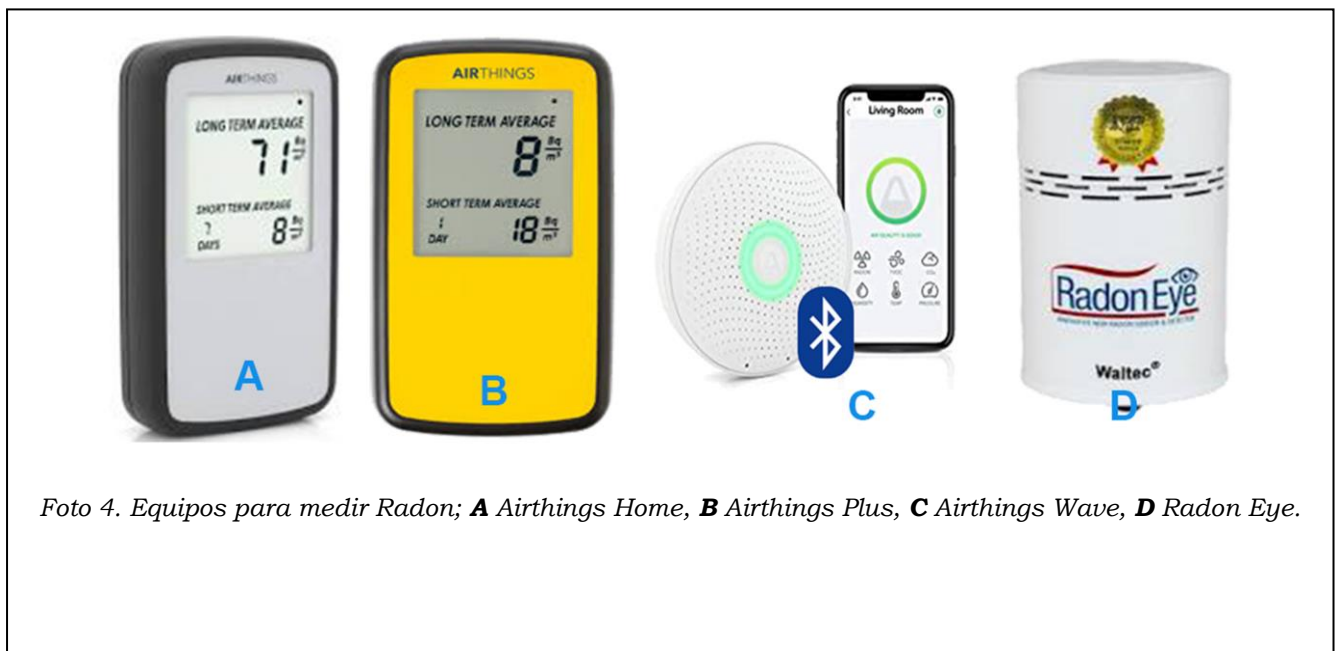


Foto 4. Equipos para medir Radón; **A** Airthings Home, **B** Airthings Plus, **C** Airthings Wave, **D** Radon Eye.

Exposición al Radón:

La directiva europea, 2013/59/EURATOM (2013), indica la referencia máxima de exposición al Radón para toda la Comunidad Europea, fijando como límite máximo para viviendas y entornos confinados de 300 Bq/m³. Este límite se corresponde con el de la Instrucción IS-33 del Consejo de Seguridad Nuclear tiene actualmente fijado para ciertas actividades en las que hay presencia de público.

En contraste, actualmente, para los lugares de trabajo, los niveles de referencia fijado en la Instrucción IS-33 son los siguientes:

- < 600 Bq/m³ No es necesario control.
- 600-1.000 Bq/m³ Se debe aplicar un nivel bajo de control.
- > 1.000 Bq/m³ Se debe aplicar un nivel alto de control.

En cuevas y minas de uso turístico es obligatorio realizar estudios y medidas de control y exposición tanto del personal que trabaja como de los visitantes según la Instrucción IS-33 del Consejo de

Irritante para los pulmones y en bajas concentraciones irrita los ojos y el tracto respiratorio. La exposición puede producir dolor de cabeza, fatiga, mareos entre otros. Suele encontrarse en cuevas de origen volcánico o hipogénicas, no suele ser muy común pero su presencia en concentraciones superiores a 50ppm puede ser peligroso. Lo normal es encontrarlo en concentraciones bajas, su presencia es un indicativo de las cavidades volcánicas o hipogénicas.

En la página de *the International Volcanic Health Hazard Network (IVHHN)* hay una tabla de los riesgos de exposición al H₂S.

<https://www.ivhhn.org/es/guidelines/guia-sobre-gases-volcanicos/hidrogeno-de-sulfuro>

Equipos para H₂S:

Los equipos multigas miden el H₂S, pero en resoluciones a partir de 1ppm, equipos específicos como el WT8822 (ver en www.cenm.es) miden resoluciones de 0.01ppm, por lo que pueden apreciar restos o trazas del H₂S en cavidades.

Sistemas de información en cavidades NFC

La utilidad de poder dejar información y los datos obtenidos en la cavidad para visitas posteriores o para otros equipos, investigadores o de advertencia es crucial sobre todo en cavidades con anomalías gaseosas y peligrosas. El cartel en la puerta de la cavidad es el elemento informativo, clave cuando se trata de cavidades con riesgos peligrosos, si se detecta una vez una atmosfera no respirable se debe indicar en la boca de la cavidad, **foto 5 izquierda**.

discretamente y actualizable siempre que se requiera, **foto 5 centro**, sobre los tipos de etiquetas y modelos más eficaces se puede las publicaciones de (Ros et al, 2017, 2018) o la página www.cenm.es se detalla ampliamente su uso y modelos para cavidades.

DISCUSION

La disponibilidad actualmente de una gran numero de equipos y precios de los equipos para gases y clima, permiten al espeleólogo poder realizar análisis y mediciones del clima en cavidades.

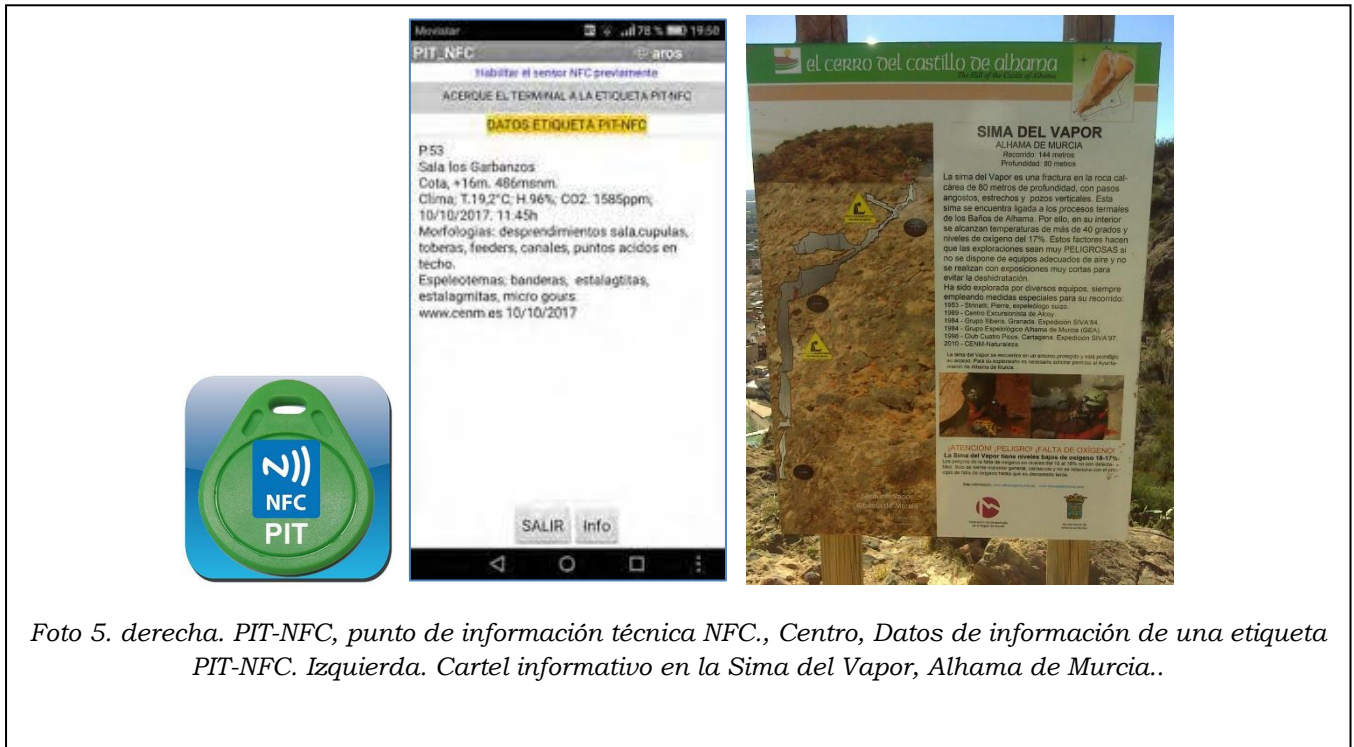


Foto 5. derecha. PIT-NFC, punto de información técnica NFC., Centro, Datos de información de una etiqueta PIT-NFC. Izquierda. Cartel informativo en la Sima del Vapor, Alhama de Murcia..

Otro tipo de información son los datos que obtengamos sobre el clima y gases interiores que pueden ser importantes para investigadores o para ver la evolución en otras épocas de visita. Para ello se ha diseñado un sistema de etiqueta inteligente basada en tecnología NFC y adaptada para su uso en cuevas en diversas situaciones, topografía, clima, información técnica etc. (Ros et al, 2017, 2018). Estas etiquetas o Punto de Información Técnica con tecnología NFC permiten almacenar datos que son fácilmente legibles con aplicaciones en el móvil, no precisan energía y son resistentes a la humedad e intemperie, **foto 5 derecha y foto 6**. Inicialmente se desarrollaron para puntos topográficos, pero pronto se ha visto que su uso es más amplio como puntos de información del clima y gases, para usos en yacimientos arqueológicos o paleontológicos (Aberasturi, a., et al 2020). Este tipo de etiquetas o puntos NFC son de fácil adquisición y sencillo uso y nos permiten incluir información de texto y cambiarlo a voluntad, con lo que con un pequeño punto o etiqueta NFC podemos almacenar información

De lo expuesto anteriormente, destacamos los equipos “imprescindibles” o equipos multigás que debería tener cualquier persona o institución, que se adentre en cavidades y más cuando se traten de primeras exploraciones, burbujas de aire bajo el agua, minas, etc. Resultan relativamente frecuentes las cavidades con riesgos altos para la seguridad por gases potencialmente tóxicos o irrespirables por sus concentraciones. La variabilidad de los gases durante el año puede aún ser más confusa y elevar el riesgo, por ello al análisis de la calidad del aire es vital para las primeras exploraciones o lugares desconocidos o poco documentados, un análisis de los efectos y síntomas que padecieron los espeleólogos en la sima del Vapor de Murcia durante los trabajos de investigación y a tener en cuenta se describe en (Pérez-López et al 2016).

Otros aspectos como el usos de equipos datalogger en cavidades visitadas permite conocer la perturbación de estas en la cavidad y los tiempos de recuperación y estabilidad ambiental, (Ros et al, 2018-2)

El análisis de la dinámica del clima y gases aportan datos significativamente importantes para el conocimiento y evolución de las cavidades. Las concentraciones de CO₂, radón y otros gases nos pueden indicar cavidades de origen hipogénico o hidrotermal y su estado actual de emisiones profundas, su grado de afectación a las morfologías, corrosiones, etc. Actualmente se está estudiando la relación entre las emisiones puntuales más elevadas de CO₂ en puntos concretos de cavidades, grietas, toberas, nivel de agua, etc. y la presencia de redes de galerías más profundas y amplias.

Análisis en el tiempo de parámetros ambientales, como ha sido el registro de temperatura, CO₂ y otros elementos, durante un año en Cueva del Agua, Cartagena, confirman la actividad permanente de emisiones de aguas termales hacia el mar del acuífero y posibles variaciones del termalismo profundo, así como los desplazamientos del O₂ por las variaciones de las emisiones de CO₂ en una burbuja de aire, (Llamusi, J.L. et al 2020).



Foto 6. Punto de medición permanente dataloger y Punto NFC de información inteligente.

CONCLUSIONES

Dos cuestiones se plantean. Primero el uso de equipos para el análisis termo-gaseoso en cavidades, por un lado, el más importante por nuestra seguridad, son los equipos que hemos denominado “IMPRESCINDIBLES” para el análisis de la calidad del aire, **equipos multigas**, no puede faltar en el equipo del espeleólogo que explore nuevas cavidades, entornos con poca

renovación de aire, burbujas postsifón, minas. Las consecuencias de encontrar atmosferas no respirables o de bajos contenidos de O₂, pueden ser muy peligrosas, teniendo en cuenta que entre 14-17% del O₂, y que aparentemente parecen respirables, sin embargo, a corto tiempo son peligrosos ya que es un ambiente hipóxico sin que seamos consciente de ello. El O₂ por debajo del 14% se considera umbral no tolerable. Las causas de estas bajadas del O₂ no tienen por qué ser permanentes, emisiones de CO₂ puntuales o estacionales en el tiempo, pueden desplazar el O₂. Por ello se recomienda el uso de los equipos multigas.

Una segunda cuestión es el análisis termo-gaseoso, estamos asistiendo a una nueva generación en las exploraciones e investigaciones en cavidades, análisis de gases o climáticos son cada vez más fáciles de hacer con la gama de equipos que hay en el mercado. Los recientes estudios nos están acercando a nuevas formas de conocer las cavidades e incluso a estimar la importancia de la red en la cueva. Actualmente ya se clasifican cavidades por su espeleogénesis basados en el tipo de gas natural emisor del subsuelo, cavidades de espeleogénesis del ácido sulfúrico SAS donde el ácido sulfúrico ha configurado la morfología de la cavidad (Waele J., et al 2016, Chervyatsova et al 2019), o las de espeleogénesis del dióxido de carbono CO₂, gas que interactúa con la caliza modelando sus morfologías.

Los equipos que aquí analizamos son una muestra de la potencialidad que el mercado nos ofrece hoy en día, la selección realizada permite que el espeleólogo, pueda acceder con seguridad a espacios desconocidos, disponer de datos termo-gaseosos de primera mano que ayuden a interpretar y conocer la espeleogénesis variada de las cavidades.

BIBLIOGRAFIA:

- Aberasturi A., Fierro I., Navarro J., Romero G., (2020) Resultados e impacto del campo de trabajo en el yacimiento paleontológico de cueva Victoria. XXVI Jornadas de Patrimonio Cultural en la Región de Murcia, Edic. tres Fronteras, Murcia.
- Atienza de la Cruz C., Orozco A., Prieto S., (2019) *Cavidades con aire enrarecido*, revista Calar núm. 3, Edita Federación Castellano Manchega de Espeleología y Cañones, Guadalajara.
- Chervyatsova O.Y., Kazadaev D.S., Dbar R.S., Ekba J.A. 2019 natural ventilation study of the new athos cave (abkhazia) using radonometric shooting: sustainable development of mountain territories, Rusia, República Osetia del Norte-Alania N°2 2019.
- Cueva S., Fernández-Cortés A., Abella R., Álvarez-Gallego M., García E., Sánchez-Moral S., 2015 *La Cueva de Castañar, Monumento Natural, Condiciones Medio Ambientales y medidas de conservación*. Junta de Extremadura.
- [Directiva 2013/59/EURATOM del Consejo, de 5 de](#)

- [diciembre de 2013](#), (2103) por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, y se derogan las Directivas 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom y 2003/122/ Euratom.
- Domingo L., Fernández-Cortés A., Yzaguirre I., Font X., Calaforra J.M., Perez R., Cano R., (2019) *Avance de los estudios atmosféricos en las simas del Garraf*, Presentación, X Congreso Español Espeleología. Federación Aragonesa de Espeleología, Huesca.
 - Fernández-Cortés, A., Pérez-López, R. Cuezva, S., Calaforra, J.M., Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S., 2018. *Seguimiento y caracterización físico-química de gases de efecto invernadero en ambientes subterráneos hipogénicos activos: caso de la Sima del Vapor (Alhama de Murcia)*: Boletín de la SEDECK núm. 12.
 - FORNÓS J., ENTRENA A., GINÉS J. 2018 *Dinàmica de l'atmosfera dels sectors no turístics de les Coves del Drac*: Papers Soc. Espeleo. Balear, 1 (2018).
 - Ginés A., Hernández J., Ginés J., Pol A. 1987 *observaciones sobre la concentraci- n de dióxido de carbono en la atmósfera de la cova de les rodes (Pollença, Mallorca)*. Rev. Endins núm. 13 Mallorca.
 - Ginés A., Mulet A., Rodríguez-Homar M., Vadell M., Sánchez-Cañete E., Ginés J. 2017 *Extreme Seasonal Fluctuations Of Carbon Dioxide In The Cave Atmosphere Of Cova De Sa Font (Sa Dragonera Islet, Balearic Islands, Spain)*: Proceedings of the 17th International Congress of Speleology, Australia.
 - ISTAS *Exposición laboral al Radón*, 2019 [Guía para la prevención](#) ISTAS 2019.
 - Llamusi J.L., Ros A., Fernández-Cortés A., Calaforra, J.M., Gazquez F., Soto, J.A. (2020) *Resultados preliminares de la monitorización termo-gaseosa en Cueva del Agua, Cartagena*) edita CENM-naturaleza, Biblioteca digital www.cenm.es Murcia.
 - Organización Mundial de la Salud 2015. [Manual de la OMS sobre el radón en interiores - una perspectiva de salud pública](#). Disponible en https://www.who.int/phe/publications/indoor_randon_handbook/es/.
 - Pérez-López R., Sánchez S., Martínez-Díaz J., Cuezva S., Sánchez-Malo A., Bañón E., Quiles L., Marco A., Carballo A., Águila M. 2016 *Condiciones ambientales extremas de la Sima del Vapor: temperatura, traza isotópica de CH₄ y CO₂ y valores de radon*. Actas EspeleoMeeting Ciudad de Villacarrillo, 2016: 143-149.
 - Ros A., Llamusi J.L., Sánchez A., 2017. *Nuevos materiales para puntos o marcas topograficas en cavidades*. III Simposio Andaluz de Topografía Espeleológica, Málaga.
 - Ros A., Llamusi J.L., Sánchez A., 2018-1. *Punto de Información Técnica PIT_NFC con tecnología NFC aplicado en cavidades y nuevas marcas para la topografía*. CUEVATUR 2018 Castellón.
 - Ros A., Llamusi J.L., 2018-2 *Resultados sobre el efecto en el clima de las visitas a Sima de la Higuera análisis temperaturas*. Edita Biblioteca digital cenm-naturaleza. www.cenm.es
 - Waele J., Audra P., Madonia G., Vattano M., D'Angeli I., Bigot J., Nobécourt J., 2016 *Sulfuric acid speleogenesis (SAS) close to the water table: Examples from southern France, Austria, and Sicily*. Geomorphology 253 (2016) 452–467.