

# CUEVATUR 2022

VIII CONGRESO ESPAÑOL SOBRE  
CUEVAS Y MINAS TURÍSTICAS  
Pulpí (Almería), 19 al 22 octubre 2022

## Minas y Cuevas: Patrimonio Geológico y Turístico

Convoca



Organiza



Editores:

José María Calaforra  
Juan José Durán





# **Minas y Cuevas: Patrimonio Geológico y Turístico**

José María Calaforra Chordi  
Juan José Durán Valsero  
(editores)

**Pulpí (Almería), octubre 2022**

Comunicaciones del Octavo Congreso Español  
sobre Cuevas y Minas Turísticas

Minas y Cuevas: Patrimonio Geológico y Turístico. J.M. Calaforra y J.J. Durán Valsero (eds.), Pulpí (Almería). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), 2022.

610 págs.; 3,1cm.

ISBN: 978-84-123288-2-0

Portada y contraportada: Composición fotográfica de Mina Rica, San Juan de los Terreros y Geoda Gigante de Pulpí (Víctor Ferrer).

*Se autoriza la reproducción y transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico, mecánico, incluido fotografías, grabación o por cualquier otro sistema de almacenar información siempre que se cite su procedencia, autores y editores. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal).*

© Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE)  
Ríos Rosas, 23. 28003 MADRID

ISBN: 978-84-123288-2-0

Depósito Legal: AL-3168-2022

Imprime: INTRO PUBLICIDAD CREATIVA SL. [www.intropublicidad.com](http://www.intropublicidad.com)

## PRESENTACIÓN

Cuevas y minas son espacios subterráneos que comparten algunas características y que se diferencian en otras. La más evidente de las diferencias es el origen: las cuevas son elementos geológicos de origen natural, mientras que las minas son vacíos, superficiales o subterráneos, generados por el ser humano. Sin embargo, la realidad no es tan sencilla. Muchas cuevas han sido descubiertas dentro de galerías mineras, o por frentes de canteras a cielo abierto, coexistiendo en ocasiones en un mismo espacio cueva y mina. Un caso emblemático es el de la Geoda de Pulpí, en Almería, una cavidad natural tapizada por completo de grandes cristales de yeso, localizada en el interior de las galerías mineras abandonadas de Mina Rica y hoy declarada Monumento Natural y accesible para su visita turística. Pero existen otros bien conocidos, como por ejemplo el caso de la cueva El Soplo, en Cantabria, que se descubrió igualmente durante la explotación de las labores mineras de La Florida y en la actualidad es una cueva habilitada para el turismo con un elevado valor geológico y un éxito de visitas. Cuevas y minas son, por tanto, espacios subterráneos que pueden ser merecedores de su protección y conservación, y de su puesta en valor como recurso turístico.

La Asociación Española de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), creada en el año 1997, agrupa en su seno tanto a cuevas como a minas turísticas. Una de las señas de identidad más arraigadas de la asociación es el Congreso CUEVATUR, que se empezó a celebrar en el año 2005 y que ahora alcanza su octava edición. CUEVATUR es un foro de encuentro y de debate para científicos, técnicos, gestores y otros expertos, así como de interesados en general en el mundo del turismo subterráneo desde todas sus perspectivas.

En este libro se recogen las comunicaciones presentadas en CUEVATUR 2022, que fue el VIII Congreso Español sobre cuevas y minas turísticas, celebrado en Pulpí (Almería) entre los días 19 y 22 de octubre de 2022, bajo el lema "Minas y cuevas: patrimonio geológico y turístico". En él se recogen un total de 48 comunicaciones presentadas en las sesiones de dicho congreso, mayoritariamente en forma oral, y revisadas por el Comité Científico del mismo.

CUEVATUR 2022 ha sido el lugar de encuentro de gestores e investigadores de las cavidades, el karst y las minas turísticas; estas últimas con auge creciente en nuestro país. Se presentaron experiencias e investigaciones de prácticamente toda la geografía nacional, y algunas de otros países (Israel,

Francia y Alemania). Comunicaciones científicas enmarcadas en Andalucía, Extremadura, Baleares, Cantabria, Asturias, Comunidad de Madrid, Aragón, Canarias, Comunidad Valenciana, Murcia, Castilla la Mancha... y con la multidisciplinareidad que siempre se ha asociado al estudio del medio ambiente subterráneo: geoespeleología, bioespeleología, arqueología y presencia humana, valorización del patrimonio geológico y minero, gestión del turismo subterráneo y protección ambiental.

Los editores agradecen profundamente a los autores de los trabajos publicados su contribución a este libro, así como a los revisores, miembros del comité científico. Igualmente, quieren dejar patente el agradecimiento público al Ayuntamiento de Pulpí, institución que gestiona la visita turística a la Mina Rica, que alberga la Geoda de Pulpí, maravilla geológica de primer orden, y que ha contribuido de manera capital a la organización del congreso. También agradecen al resto de las instituciones y empresas que han colaborado en la organización y la financiación del mismo.

**José María Calaforra Chordi**  
**Juan José Durán Valsero**  
(editores)

# **Comité Organizador**

## **Coordinador**

Manuel Durán Hidalgo

Presidente de la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE).

## **Vocales**

Juan José Durán Valsero. Vicepresidente de ACTE.

Rafael Pagés Rodríguez. Vicepresidente de ACTE.

Ovidio Altable Argüelles. Secretario de ACTE.

Juan Bautista López Ruíz. Teniente de Alcalde del Ayto. de Pulpí.

Francisco Javier Fernández Amo. Geólogo, TECMINSA S.L.

Milagros Carretero Tortosa. Geóloga, Coordinadora Geoda de Pulpí.

## **Presidente del Comité Científico**

José María Calaforra. Universidad de Almería

## **Colaboradores**

Jesús Morillas Ramos. Geólogo, Geoda de Pulpí.

Rafael Jordá Bordehore. Colegio Oficial de Geólogos.

Andrés Ros Vivancos. Cueva Victoria de Cartagena.

Diego Contreras. Cuevas de Sorbas.

Juan del Olmo Torrente. Cueva de El Puerto de Calasparra.

Pedro Agustín Robledo Ardila. Instituto Geológico y Minero de España..





# Índice

José María CALAFORRA CHORDI, Milagros CARRETERO TORTOSA, Lucía MARTEGANI, Fernando GÁZQUEZ SÁNCHEZ, Ángel FERNÁNDEZ CORTÉS - <b>Evaluación dosimétrica por exposición a gas radón en la Mina Rica – Geoda de Pulpí (Almería)</b> .....	13
Milagros CARRETERO TORTOSA, Jesús MORILLAS RAMOS, Francisco Javier FERNÁNDEZ AMO, Juan Bautista LÓPEZ RUÍZ, José María CALAFORRA CHORDI - <b>Funcionamiento, organización y gestión de la atracción turística y Monumento Natural de Mina Rica y la Geoda gigante de Pulpí (Almería)</b> ....	27
Patricia CASTILLO MARTÍNEZ, Pablo BARRANCO VEGA, Yolanda Del ROSAL PADIAL, Cristina LIÑÁN BAENA, Ángel FERNÁNDEZ CORTÉS, Alberto TINAUT RANERA - <b>Los habitantes invisibles de la Cueva de Nerja</b> .....	39
Alexander CHRAPKO, Michel RENDA - <b>Comment réaliser un projet parfait dans une grotte touristique?</b> .....	49
Sergio Raúl DURÁN LAFORET, Juan José DURÁN VALSERO, Raquel MORALES GARCÍA, Pedro Agustín ROBLEDO ARDILA - <b>Mapas y cortes geomorfológicos, elementos clave de la divulgación geológica en cuevas turísticas</b> .....	59
Sergio Raúl DURÁN LAFORET, Juan José DURÁN VALSERO, José Enrique SÁNCHEZ PÉREZ, Iñaki VADILLO PÉREZ - <b>Descubrimiento de un conjunto excepcional de estegamitas en una nueva cavidad aparecida en el interior de una cantera de calizas en La Araña, Málaga, Sur de España</b> .....	71
Mohamed EL KADIRI, Andrés ROS VIVANCOS, Hassan AUROHAGE, José AMORÓS, José Luis LLAMUSÍ LATORRE, Mohamed EL AHMADI, Manuel TREMIÑO BRU - <b>Grotte du Chameau, Berkane – Maroc. Una cueva hipogénica para el turismo en la Región Oriental de Marruecos</b> .....	85
Alba M. FAS BOTIAS, Jorge GARCÍA FERNÁNDEZ – <b>La implementación tecnológica en Coves de Sant Josep (La Vall d’Uxió, Castelló)</b> .....	97
Concepción JIMÉNEZ DE CISNEROS VENCELÁ, Cristina LIÑÁN BAENA, Celia TORRES BRAVO, Aránzazu PEÑA HERAS, Antonio GONZÁLEZ RAMÓN - <b>Control y análisis geoquímico de la precipitación carbonatada actual en la Cueva de Nerja (Málaga, S de España)</b> .....	107
Rafael JORDÁ BORDEHORE, Manuel ARLANDI RODRÍGUEZ, Luis JORDÁ BORDEHORE, Alberto BERNARDO SÁNCHEZ, Carmen CRISÓSTOMO MIRANDA - <b>Valoración y protocolos de gestión de riesgos en espacios naturales protegidos subterráneos de Extremadura</b> .....	119
Jesús Francisco JORDÁ PARDO, Santiago CALLEJA, Miguel POLLEDO, Esteban ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ - <b>La cueva de Tito Bustillo (Ardines, Ribadesella, Asturias, España): 50 + 3 años de investigación arqueológica y gestión de visitas públicas</b> .....	131

Francisco Javier FERNÁNDEZ AMO, José María CALAFORRA CHORDI - <b>La luminiscencia en minas y cuevas españolas como atractivo Geoturístico</b> .....	153
Ángel FERNÁNDEZ CORTÉS, Valme JURADO LOBO, Cesáreo SAIZ JIMÉNEZ, José Luis GONZÁLEZ PIMENTEL, Soledad CUEZVA ROBLEÑO, Roberto ONTAÑÓN PEREDO, Pablo ARIAS CABAL, Tamara MARTÍN POZAS, Sergio SÁNCHEZ MORAL - <b>Control microclimático de la dispersión bacteriana en cavidades con arte rupestre: aplicación de estrategias de conservación para la cueva de La Garma (Cantabria)</b> .....	163
Ismael FUENTE MERINO, Luis Santiago QUINDÓS PONCELA, Carlos SAINZ FERNÁNDEZ, Daniel RÁBAGO GÓMEZ, Santiago CELAYA GONZÁLEZ - <b>La nueva legislación en el cálculo de dosis debida al radón: ¿un peligro para la gestión de las cuevas turísticas?</b> .....	177
María GALLEGO FERNÁNDEZ, Rafael PAGÉS RODRÍGUEZ - <b>Comunicación online de Cuevas Turísticas</b> .....	189
Lilia GARCÍA LORENZO, Javier MENÉNDEZ RODRIGUEZ, Dulce VEGA GONZÁLEZ - <b>El Pozo Sotón, una experiencia turística única. Asturias</b> .....	203
José Antonio GÁZQUEZ PARRA, Nuria NOVAS CASTELLANO, Manuel FERNÁNDEZ ROS, Rosa GARCÍA SALVADOR, Jaime Mc LENNAN - <b>El Soplao, 15 años telemonitorizado en tiempo real</b> .....	211
Fernando GÁZQUEZ SÁNCHEZ, Ángel FERNÁNDEZ CORTÉS, Lucía MARTEGANI, Antonio GONZÁLEZ RAMÓN, Hu HSUN MING, Shen CHUAN CHOU, José María CALAFORRA CHORDI - <b>Monitorización ambiental y dataciones preliminares de espeleotemas en la Cueva de los Órganos (Sierra de Mollina, Málaga)</b> .....	225
Fernando GÁZQUEZ SÁNCHEZ, Ana MONTSERÍN LOSAS, Lucía MARTEGANI, Manuel GUERRERO MANZANO, Ángel FERNÁNDEZ CORTÉS, Javier GARCÍA GUINEA, Fernando RULL PÉREZ, José María CALAFORRA CHORDI - <b>Dos décadas de investigaciones científicas en la Geoda Gigante de Pulpí (Almería, SE España)</b> .....	239
Antonio GONZÁLEZ RAMÓN, Rosa María MATEOS RUÍZ, Concepción JIMÉNEZ DE CISNEROS VENCELÁ, Marian ALONSO MARTÍNEZ - <b>Cuevas inducidas por deslizamientos: tipologías identificadas en el SE de la Cordillera Bética (S de España)</b> .....	251
Francisco José HOYOS MÉNDEZ - <b>Tour virtual de cavidades. Experiencia en la Gruta de las Maravillas, Aracena. Incorporación de nuevas tecnologías de imagen para documentación del patrimonio subterráneo</b> .....	267
Carmen LARA ASTIZ, Pedro Agustín ROBLEDO ARDILA, Pere ARNAU - <b>Avances recientes en los hallazgos arqueológicos y paleontológicos de la Cueva de S'Aigua, Menorca</b> .....	275
Javier LARIO GÓMEZ, Tamara MARTÍN POZAS, Sergio SÁNCHEZ MORAL, Juan Carlos CAÑAVERAS JIMÉNEZ, Ángel FERNÁNDEZ CORTÉS, Roberto CANO MUÑOZ, Cecilio LÓPEZ TERCERO, Álvaro ROLDÁN MONTES, María Esther MARTÍN GONZÁLEZ, Carlos	

PÉREZ MEJÍAS, Hai CHENG - <b><i>El Túnel de la Atlántida (Lanzarote): un patrimonio geológico sumergido de interés mundial</i></b> .....	287
Cristina LIÑÁN BAENA, Lucía OJEDA RODRÍGUEZ, A. BRAVO, Iñaki VADILLO PÉREZ, Yolanda Del ROSAL PADIAL, José BENAVENTE HERRERA, Luis Efrén FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ - <b><i>Exploración y detección de flujos de calor en el entorno de la Cueva de Nerja (Málaga) mediante sensores térmicos aerotransportados</i></b> ...	299
Almudena De la LOSA ROMÁN, Juan José DURÁN VALSERO, Carlos BAQUEDANO ESTÉVEZ, Raquel MORALES GARCÍA, Luis MORENO MERINO, Javier HEREDIA DÍAZ, Fabián Luis LÓPEZ OLMEDO, Amalia ROMERO PRADOS, A. - <b><i>El Hidrogeodía: una propuesta de divulgación para conocer la relación entre las aguas subterráneas, las formaciones kársticas y las cuevas</i></b> .....	309
Yariv MALIHI - <b><i>Nature protection and management in a highly populated country - Israel 2022</i></b> .....	323
Lucía MARTEGANI, Fernando GÁZQUEZ SÁNCHEZ, Ángel FERNÁNDEZ CORTÉS, Juan GISBERT GALLEGRO, Milagros CARRETERO TORTOSA, Jesús MORILLAS RAMOS, Francisco Javier FERNÁNDEZ AMO, José María CALAFORRA CHORDI - <b><i>Minerales luminiscentes de la Mina Rica y la "Sala Negra" de Pulpí (Almería)</i></b> .....	333
María Esther MARTÍN GONZÁLEZ, Xiomara DUARTE RODRÍGUEZ, Pedro A. SALAZAR CARBALLO, María LÓPEZ PÉREZ, M. Candelaria MARTÍN LUIS - <b><i>Determinación de los niveles de gas radón en la Cueva del Viento (Tenerife, Islas Canarias): Estudio dinámico y valoración de riesgo radiológico</i></b> .....	345
Tamara MARTÍN POZAS, Soledad CUEZVA ROBLEÑO, Ángel FERNÁNDEZ CORTÉS, María GONZÁLEZ-PUMARIEGA SOLÍS, Elsa DUARTE MATÍAS, Marco De la RASILLA VIVES, Juan Carlos CAÑAVERAS JIMÉNEZ, David BENAVENTE, José Luis GOY GOY, Javier ELEZ VILLAR, Cesáreo SAIZ JIMÉNEZ, Caridad ZAZO CARDEÑA, Sergio SÁNCHEZ MORAL - <b><i>Impacto de un evento de inundación en la comunidad bacteriana de un ecosistema subterráneo somero (Cueva del Pindal, Asturias)</i></b> .....	359
Wenceslao MARTÍN ROSALES, Manuel LÓPEZ CHICANO, Ana Belén TORRES ASENSIO, Rosario MOYA DÍAZ - <b><i>Contribución al conocimiento de las condiciones ambientales naturales de la Gruta de las Maravillas como consecuencia de la Covid19</i></b> .....	373
Raquel MARTÍNEZ ÁLVAREZ, Mónica MELÉNDEZ ASENSIO - <b><i>Aplicación de técnicas de teledetección en el estudio de la generación de dolinas: Camargo (Cantabria)</i></b> .....	385
Laura MARTÍNEZ HARO, Cristina MEDINA BERMEJO - <b><i>Cómo la apertura de la Mina Rica y Geoda de Pulpí ha cambiado la industria del turismo en este municipio</i></b> .....	397
Salvadora MARTÍNEZ LÓPEZ, Carmen HERNÁNDEZ PÉREZ, María José MARTÍNEZ SÁNCHEZ, Ascensión BANEGAS GARCÍA, Imad EL JAMAQUI, Luis ARRUFAT MILÁN, Lucía Belén MARTÍNEZ MARTÍNEZ, Pedro ANDREO MARTÍNEZ, Carmen PÉREZ-SIRVENT - <b><i>Minas, aguas y lumbreras una asociación de interés geoquímico</i></b> ..	405

Andrea MOLERO MONSONÍS, María Belén MUÑOZ GARCÍA, Javier MARTÍN CHIVELET, María Jesús TURRERO JIMÉNEZ - <b>Caracterización de pátinas de color sobre espeleotemas en la Cueva de Don Juan (Jalance, Valencia)</b> .....	421
Raquel MORALES GARCÍA, Juan José DURÁN VALSERO, Sergio Raúl DURÁN LAFORET, Pedro Agustín ROBLEDO ARDILA - <b>El estudio geológico de la Cueva del Estrecho (Villares del Saz, Cuenca): una contribución a la puesta en valor del turismo subterráneo</b> .....	433
Lucía OJEDA RODRÍGUEZ, Iñaki VADILLO PÉREZ, Cristina LIÑÁN BAENA, José BENAVENTE HERRERA - <b>Evolución espacio-temporal de los gases CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> y sus relaciones isotópicas (<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C) en la atmósfera de la Cueva de Nerja (Málaga, España)</b> .....	445
María Leticia PACHECO CABRERA, María Esther MARTÍN GONZÁLEZ, Francisco MESA LUIS - <b>Estudio de estabilidad con escáner laser 3D, vigilancia y seguridad de la Cueva del Viento (Tenerife, Islas Canarias)</b> .....	459
José Luis GONZÁLEZ PIMENTEL, Irene DOMÍNGUEZ MOÑINO, Valme JURADO LOBO, Bernardo HERMOSÍN CAMPOS, Leonila LAIZ TROBAJO, Ana Teresa CALDEIRA, Cesáreo SAIZ JIMÉNEZ - <b>Las cuevas como recurso biotecnológico</b> .....	473
Sara GUTIÉRREZ PATRICIO, Valme JURADO LOBO, Leonila LAIZ TROBAJO, Alfredo LÁINEZ CONCEPCIÓN, Cesáreo SAIZ JIMÉNEZ, Ana Zélia MILLER - <b>Estudio microbiológico de las manchas coloreadas de la Cueva del Viento (Tenerife, España)</b> .....	485
Ana ORTAS, Mariano OLIVÁN, Rafael RUIZ, Amor OLOMI, Jordi BORRÀS, Miguel GIL, José Ignacio CANUDO SANAGUSTÍN, Isabel FANLO GONZÁLEZ, Víctor VIÑALS YÚFERA, Francisco LERA GARCÍA, Rafael LARMA LACASTA, Pablo MARTÍN RAMOS, José Antonio CUCHÍ OTERINO - <b>Aproximación al patrimonio minero de los valles de Bielsa y Chistau (Huesca)</b> .....	497
Vera PALMA, Nicasio Tomás JIMÉNEZ MORILLO, José María De la ROSA ARRANZ, Sara GUTIÉRREZ PATRICIO, José Antonio GONZÁLEZ PÉREZ, Beatriz CUBERO GARCÍA, Ana Teresa CALDEIRA, Francesco SAURO, Ana Zélia MILLER - <b>Caracterización molecular e isotópica de espeleotemas de tubos de lava de Lanzarote con interés para la astrobiología y la geoconservación</b> .....	509
Yolanda PALOMO ARRABAL - <b>Turismo Villanúa: evolución, resiliencia e innovación en tiempos de PANDEMIA. Experiencia en la cueva de las Güixas de Villanúa (Huesca)</b> .....	519
Gabriela RESHEF SCHWARZ - <b>Reserva Natural Cueva de las Estalactitas (Israel). Dirección y gestión</b> .....	531
Pedro Agustín ROBLEDO ARDILA, Rebeca ÁLVAREZ ALONSO, Juan José DURÁN VALSERO, Sergio Raúl DURÁN LAFORET, Raquel MORALES GARCÍA - <b>Cuevas turísticas litorales y Cambio Global: el impacto de las oscilaciones del nivel del mar sobre el sistema hidrogeológico y la problemática legal</b> .....	543

Andrés ROS VIVANCOS, María José MADRID BALANZA, Ángel ALCARAZ BERNAL - <b><i>Mina Cueva Victoria, Cartagena. Una visita minero-paleontológica</i></b> .....	555
Miguel Ángel RUIZ TEJADA, M. CRIADO, Juan José DURÁN VALSERO, Sergio Raúl DURÁN LAFORET, Raquel MORALES GARCÍA, Eulogio PARDO IGÚZQUIZA - <b><i>Documentación geométrica tridimensional mediante métodos avanzados en cavidades complejas: el caso de la Cueva de las Estegamitas (La Araña, Málaga)</i></b> .....	567
José Ángel SOLANILLA RODRIGO, Francisco Javier FERNÁNDEZ AMO, Juan OLMO, Lola GUIRAO FERNÁNDEZ, Andrés ROS VIVANCOS, José Luis LLAMUSÍ LATORRE - <b><i>Cueva del Puerto, Calasparra (Murcia) una cavidad hipogénica. Espeleogénesis y morfologías del recorrido turístico</i></b> .....	581
Aritza VILLALUENGA MARTÍNEZ, Jesús Francisco JORDÁ PARDO, Álvaro ARRIZABALAGA VALBUENA, Emmerick MOTTE DARRICAU, Nathalie VANARA, Joëlle DARRICAU - <b><i>Investigación arqueológica, explotación turística y conservación en una cueva clásica de la Prehistoria franco-cantábrica: la Grotte d'Isturitz (Saint-Martin d'Arberoue, Pyrénées-Atlantiques, Francia)</i></b> .....	593



## Evaluación dosimétrica por exposición a gas radón en la Mina Rica - Geoda de Pulpí (Almería)

José María CALAFORRA CHORDI <sup>(1,2)</sup>, Milagros CARRETERO TORTOSA <sup>(3)</sup>,  
Lucía MARTEGANI <sup>(1,2)</sup>, Fernando GÁZQUEZ SÁNCHEZ <sup>(1,2)</sup>,  
ÁNGEL FERNÁNDEZ-CORTÉS <sup>(1,2)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo de Investigación Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Departamento de Biología y Geología. Universidad de Almería. jmcalforra@ual.es, lu.martegani@gmail.com, f.gazquez@ual.es, acortes@ual.es

<sup>(2)</sup> Centro Andaluz de Seguimiento y Evaluación del Cambio Climático. Universidad de Almería.

<sup>(3)</sup> Geoda de Pulpí. Empresa Municipal del Suelo de Pulpí. 04640 Pulpí, Almería.  
milagros-carreterotortosa@gmail.com

---

### Resumen

En la Mina Rica de Pulpí (Almería) se lleva a cabo desde 2020 una estimación periódica y pormenorizada de los niveles-dosis de radiación ambiental recibidos por los guías turísticos, a partir de los datos de monitorización horaria de la concentración de gas radón en las diferentes salas y galerías por las que transcurren las visitas guiadas. Las variaciones registradas en la concentración de gas radón en la mina son muy importantes a lo largo del año, desde unos 100 Bq/m<sup>3</sup> en los meses de invierno a más de 4000 Bq/m<sup>3</sup> en los meses de verano. La concentración media anual de radón es de 1092 Bq/m<sup>3</sup> en las galerías inferiores de acceso a la Geoda, disminuyendo hasta 500 Bq/m<sup>3</sup> en zonas cercanas a los pozos de ventilación, con mayor intercambio aerodinámico con el exterior. A partir de los datos de tiempos de permanencia de cada guía en el interior de la mina y considerando las concentraciones máximas diarias, se ha constatado que las dosis anuales acumuladas por guía en el bienio 2020-2021 (con algunos periodos de cierre de la mina por la pandemia Covid) oscilan entre 1,4 y 3,5 mSv/año. De acuerdo al calendario de trabajo y temporización de las visitas preestablecido por los gestores de la mina, se estima que un régimen estándar de accesibilidad para un único guía turístico conllevaría una dosis anual acumulada inferior a 4 mSv/año, es decir inferior al límite de 6 mSv/año a partir del cual se debería aplicar un nivel alto de control frente a la exposición a la radiación natural. No obstante, es recomendable una limitación del tiempo máximo de permanencia en la mina por parte de cada guía a un rango entre 64 y 87 horas/mes, aproximadamente, durante el verano (de junio a septiembre).

**Palabras clave:** radón, dosis, minas turísticas.

## ***Dosimetric evaluation of exposure to radon gas at the Mina Rica - Geode de Pulpí (Almería)***

### **Abstract**

*At the Mina Rica mine in Pulpí (Almería), a periodic and detailed estimate of the levels-doses of environmental radiation received by the tourist guides is ongoing since 2020. It is based on the hourly monitoring of radon concentration in the galleries through the touristic galleries. The variations recorded in the radon concentration in the mine are very significant throughout the year, ranging from about 100 Bq/m<sup>3</sup> in the winter months to more than 4000 Bq/m<sup>3</sup> in the summer months. The average annual radon concentration is 1092 Bq/m<sup>3</sup> in the lower access galleries to the Geode, decreasing to 500 Bq/m<sup>3</sup> in areas close to the ventilation shafts with higher aerodynamic exchange with the outside. Based on the time spent by each guide inside the mine and considering the maximum daily concentrations, our results suggest that the accumulated annual doses per guide in the two-year period 2020-2021 (with some periods of mine closure due to the Covid pandemic) range between 1.4 and 3.5 mSv/year. In accordance with the work schedule and timing of visits pre-established by the mine managers, it is estimated that a standard accessibility regime for a single tour guide would lead to a cumulative annual dose of less than 4 mSv/year. This is below the limit of 6 mSv/year that determines a high level of control against the natural radiation exposure should be applied. However, it is advisable to limit the maximum time spent in the mine by each guide to a range between 64 and 87 hours/month, approximately, during the summer (June to September).*

**Keywords:** dose, radon, show mines.

## **Introducción**

Las visitas turísticas desarrolladas en ambientes confinados, como minas y cuevas, se consideran actividades laborales en las que los trabajadores están potencialmente expuestos a la inhalación de gases radiactivos como el radón (<sup>222</sup>Rn). La radiación por exposición a gas radón representa aproximadamente la mitad del promedio de radiación que el ser humano recibe por exposición a fuentes radiactivas naturales (UNSCEAR, 2008).

El nivel medio de concentración de radón en una atmósfera abierta es casi nulo (en torno a 10 Bq·m<sup>-3</sup>; Sesana *et al.*, 2003). Sin embargo, los ambientes subterráneos como cuevas, minas, túneles o catacumbas, pueden acumular altas concentraciones de radón debido a las bajas tasas de ventilación y renovación de aire (Gunn, 2003). Diversas revisiones bibliográficas, principalmente centradas en cavidades kársticas, indican unas concentraciones medias de radón de: 2,8 kBq·m<sup>-3</sup> (Halk *et al.*, 1997), 2,5 kBq·m<sup>-3</sup> (Cigna, 2005), o, recientemente, 6,2 kBq·m<sup>-3</sup> (Waring *et al.*, 2021).

A su vez, existe una extensa documentación sobre valores de dosis efectivas recibidas por los trabajadores (guías, personal de mantenimiento e investigación ,etc.) de este tipo de



ambientes subterráneos abiertos al turismo, obtenidas a partir de las concentraciones de radón en cuevas turísticas (Lario *et al.*, 2005, 2006; Sainz *et al.*, 2007; Landridge *et al.*, 2010; Alvarez-Gallego, *et al.*, 2015), catacumbas (Quarto *et al.*, 2014) y minas turísticas (Przylibski, 2001; Anjos *et al.*, 2010), entre otros muchos estudios. En algunos casos se han implementado acciones de mitigación con el fin de reducir la cantidad de radón inhalado por los turistas y por los trabajadores. Estas acciones han consistido en la instalación de sistemas de ventilación forzada a lo largo del recorrido turístico y en las zonas donde se desarrolla un mayor tiempo de permanencia (Fijalkowska-Lichwa, 2014). Sin embargo, el uso de estos medios para reducir los niveles de radón existentes no tiene fácil solución en cavidades naturales o en ambientes subterráneos con un delicado equilibrio ambiental y que requieren una conservación preventiva, por ejemplo, por albergar elementos decorativos (catacumbas) o minerales frágiles (p.e. galerías mineras con minerales hidratados). Por ello, un control sobre la exposición de las personas frente al gas radón puede ser la opción más favorable, en concreto la limitación del tiempo de permanencia y la restricción de entrada a zonas con concentraciones elevada de radón, así como establecer turnos y horarios de trabajo adecuados para cada trabajador para que no se alcancen los límites máximos establecidos.

De acuerdo a la legislación estatal sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes (Real Decreto 783/2001, de 6 de julio), así como en el Proyecto de Real Decreto por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes, los titulares de las actividades laborales de estos enclaves subterráneos deben realizar los estudios necesarios para evaluar la exposición de los trabajadores o de los miembros del público a esta radiación ambiental, así como la adopción de este tipo medidas de control (de tipo técnico o administrativo) destinadas a reducir las exposiciones.

En este estudio se presentan los resultados de la monitorización del gas radón en la Mina Rica (Pilar de Jaravía, Pulpí, Almería) en el bienio 2021-2022, que han permitido caracterizar su evolución temporal y el efecto que tienen las condiciones meteorológicas exteriores y de la mina en las variaciones de este gas en cada zona de la mina. A partir de estos registros, se han estimado las dosis efectivas de radiación ambiental que reciben los guías turísticos de la mina por exposición a gas radón, en función de los tiempos de permanencia de en cada sector de la mina.

## **Metodología**

### *Sistema de monitorización de la Mina Rica – Geoda de Pulpí*

La Geoda gigante de Pulpí es uno de los descubrimientos más significativos a nivel mundial, relacionados con el Patrimonio Geológico subterráneo. Además, se encuadra dentro de los vestigios de uno de los núcleos más importantes de la antigua minería del sureste peninsular. Ambos factores fueron determinantes en la decisión de su apertura al turismo, que se materializó en 2019 tras la finalización de la adecuación turística del entorno minero y de la Geoda. Desde esta fecha se lleva a cabo una actividad turística

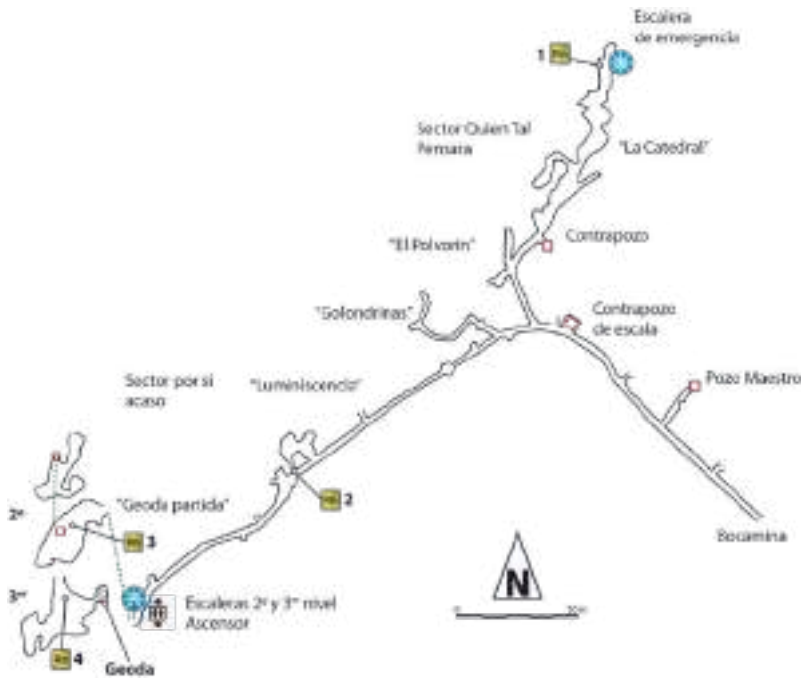


Figura 1. Localización de los dataloggers de radón instalados en Mina Rica. 1: Polvorín-Catedral, 2: Sala Luminiscencia, 3: Geoda Partida, 4: Entrada a la Geoda.

sostenible de este enclave subterráneo minero, basada en un control medioambiental en continuo y a tiempo real, y bajo las normas y directrices de ordenación y gestión que dicta su reciente declaración como Monumento Natural (Decreto 11/2022, de 15 de febrero, Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía).

El modelo actual de visitas a la mina consiste en grupo de 12-15 visitantes acompañados de un guía, con un total de 8-10 visitas diarias y una duración aproximada de 1 hora y 40 minutos, en la que se visitan tanto las galerías mineras como la geoda. A ésta última el visitante solo accede parcialmente al inicio de su entrada mediante una plataforma metálica que permite contemplar todo el volumen interior tapizado de cristales mediante una iluminación puntual controlada con temporizador por los guías. Desde marzo de 2020 y durante todo el periodo de estudio (2020-2021), los guías turísticos han realizado todas las visitas equipados con mascarillas FFP2, lo que limita la respiración de aerosoles presentes en el aire de la mina.

El sistema de control microambiental de la mina-geoda de Pulpí fue instalado unos meses antes de la apertura al turismo fechada el 5 de agosto de 2019, y cuenta con un conjunto de sensores de alta precisión (temperatura del aire, temperatura de los cristales, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono) tanto en el interior de la geoda como en la galería de acceso. Los sensores registran los parámetros ambientales automáticamente

cada 1 ó 15 minutos, dependiendo del sensor, y están conectados de forma inalámbrica mediante una red wifi a un servidor en cuya pantalla se pueden consultar las mediciones en todo momento. Además, se ha instalado un sistema de repetidores wifi a lo largo de la galería principal que hace posible el acceso al registro de datos almacenado en dicho servidor desde cualquier ubicación externa a la mina.

El sistema de control microambiental se completó con 4 monitores de radón Radon Eye +2 RD200PZ (Radon FtLab) ubicados estratégicamente en el interior de la mina en los siguientes puntos del recorrido turístico (figura 1): Polvorín-Catedral y Sala Luminiscencia, ambas en el primer nivel de galerías, y Geoda Partida y zona de entrada a la Geoda gigante, en el segundo y tercer nivel de galerías, respectivamente.

Cada monitor de radón está equipado con una cámara de ionización que permite la medición de la concentración de radón con un límite de detección de 0,5 cpm/pCi/l a 10pCi/l en un rango de medición de 0,1 a 255 pCi/l, con una precisión de  $< \pm 10\%$  y una exactitud  $< \pm 10\%$  (error mínimo  $\leq \pm 0,5$  pCi/l) a 10 pCi/l, teniendo en cuenta que 1 pCi/l equivale a 37 Bq/m<sup>3</sup>. Además de monitores se ha dispuesto de otro sensor con certificado de calibración específica, de la misma marca y modelo, que se ha utilizado para comprobar la exactitud de las medidas del resto de sensores instalados en la mina de acuerdo con las normas ISO/IEC17025:2017 sobre requerimientos generales para test y calibraciones y la ISO11665-5:2020 (Parte 5) sobre medida de la radioactividad del gas radón-222 en ambientes aéreos en continuo. El intervalo de medida de los monitores de radón es de 1 hora, permitiendo la visualización del valor instantáneo de la concentración en la pantalla de cada uno de ellos. Los datos de cada monitor de radón se almacena en la nube [www.radon-net.com](http://www.radon-net.com), lo que permite un control casi diario de los niveles de radiación ambiental por parte de los gestores de la mina.

Con objeto de evaluar el efecto de los cambios térmicos locales como parámetro clave en la ventilación de la mina y, por lo tanto, en las variaciones de concentración de radón, se utilizó la estación meteorológica de "La Pilica" situada en Águilas (Murcia) a 10 Km de la mina, perteneciente a la Red del Sistema de Información Agrario de Murcia (<http://siam.imida.es/>).

### *Parámetros y procedimientos de cálculo de dosimetrías por exposición a gas radón*

De acuerdo a las más recientes recomendaciones publicadas por la *International Commission on Radiological Protection - ICRP* (ICRP Publication 137: *Occupational Intakes of Radionuclides*, Part 3, de 2017), la dosis recibida por un individuo por exposición a gas radón ( $E_{WLM}$ ) se calcula en función de la concentración de este gas ( $C_{Rn}$ , expresado en Bq·m<sup>-3</sup>) y del tiempo (t) de exposición según la siguiente expresión (ICRP, 2017):

$$E_{WLM} = \sum (C_{Rn} \cdot F \cdot t) / 6.37 \cdot 10^5 \quad [1]$$

La dosis  $E_{WLM}$ , expresada en unidades WLM: *Working Level Month*, corresponde a la energía alfa potencial o energía alfa total emitida en la desintegración de los descendientes de

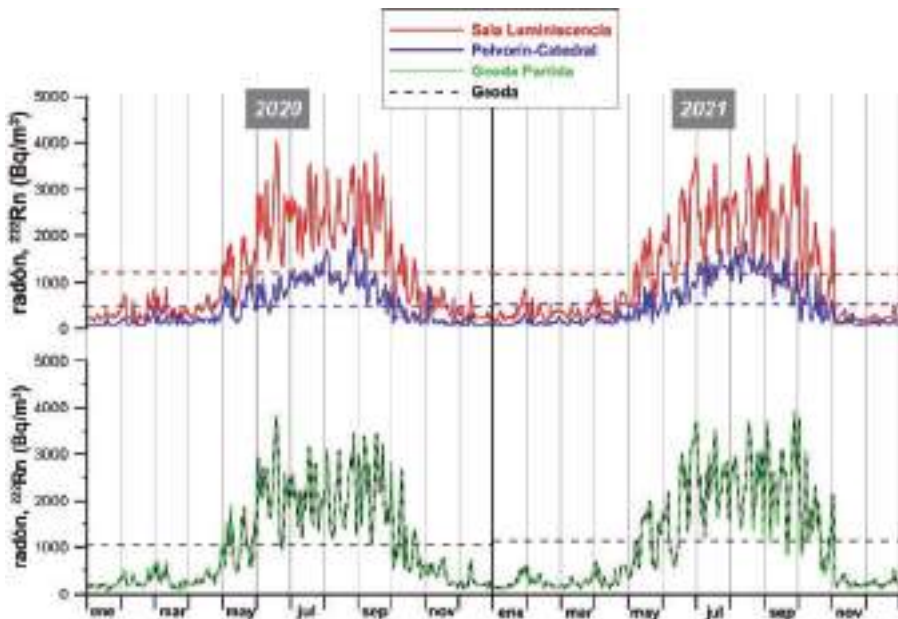


Figura 2. Evolución temporal de la concentración de radón en el aire en cada uno de los sectores de la mina-geoda de Pulpí durante el bienio 2020-2021. Las líneas discontinuas horizontales marcan la concentración media anual en cada sector de la mina.

vida corta del radón en su cadena de desintegración. Se define una concentración de 1 WL (Working Level) como aquella combinación de descendientes de radón en 1 m<sup>3</sup> de aire que resultan en una emisión de  $1.300 \cdot 10^8$  MeV de energía alfa, de forma que 1 WL corresponde a 3750 Bq/m<sup>3</sup> de concentración de gas radón en equilibrio radiactivo con sus descendientes. A su vez, se define el WLM como la exposición a una atmósfera de 1 WL durante un periodo de trabajo de 1 mes (170 h). El Factor de Equilibrio ( $F=0.2$  para minas, según ICRP, 2017 – Publication 137) corresponde a la ratio entre la concentración de radón equivalente en equilibrio radiactivo con sus descendientes (es decir, con la misma energía alfa potencial que los descendientes en el aire) y la concentración medida del gas radón.

En ambientes subterráneos mineros, la ICRP (2017) recomienda un valor de coeficiente de conversión de dosis de 11 mSv/WLM (3 mSv por  $\text{mJ} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ ), que actuaría de multiplicador del resultado de la ecuación [1] para el cálculo de la dosis efectiva ( $E$ , en mSv) recibida por los trabajadores debido a una exposición al <sup>222</sup>Rn y a sus descendientes. Este valor de coeficiente de conversión de dosis resulta de considerar un valor ( $f$ ) de fracción libre (asociada a los descendientes del radón de vida corta no adheridos a aerosoles) de 0.01 para minas, de acuerdo a lo indicado en las recomendaciones de la ICRP (Publication 137).

El tiempo de exposición ( $t$ ) de la ecuación [1] se ha calculado para cada guía y para cada visita diaria realizada en el bienio 2020-2021, a partir de los datos reales de accesos proporcionados por los gestores de la mina basados en los cuadrantes y calendario

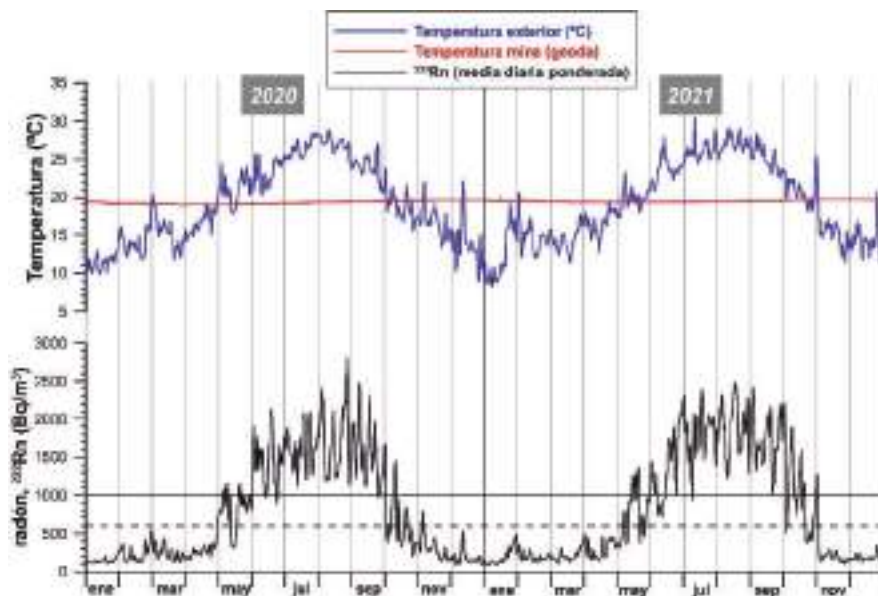


Figura 3. Evolución de la concentración medida diaria de radón en el bienio 2020-2021, ponderada en función de los tiempos de permanencia de los guías en cada sector de la mina durante el recorrido turístico guiado, y comparada con la relación de temperatura entre el exterior y el interior de la mina (temperatura medida en la geoda). Las líneas horizontales indican los límites inferiores de concentración a partir de la cual es preceptivo aplicar un nivel alto control (1000 Bq/m<sup>3</sup>; línea continua) y un nivel bajo de control (600 Bq/m<sup>3</sup>; línea discontinua).

laboral de los guías turísticos. Para la evaluación de la dosis efectiva se ha considerado la concentración media, mínima y máxima diaria, así como la siguiente distribución habitual del tiempo de permanencia en cada zona del recorrido turístico con el objetivo de conseguir un cálculo dosimétrico ponderado; Polvorín-Catedral y resto de galerías bien ventiladas: 66 minutos, Sala Luminiscencia: 8 minutos, Geoda Partida: 5 minutos y entorno de la Geoda: 21 minutos, computando un total de 1 h y 40 minutos en cada visita guiada.

## Resultados y discusión

### *Dinámica espaciotemporal del gas radón en la mina-geoda y niveles de exposición*

La figura 2 muestra la evolución de la concentración media diaria de radón en cada sector de la mina. Las variaciones de gas radón en la mina durante un ciclo anual son muy importantes, desde unos 100 Bq/m<sup>3</sup> en los meses de invierno a más de 4000 Bq/m<sup>3</sup> en los meses de verano. La estación que registra los valores más elevados es la estación de "Luminiscencia", con valores ligeramente superiores a los registrados en otros sectores

como el de la entrada a la Geoda y en la zona de la Geoda partida, mientras que la que registra valores menores es la estación de “Polvorín-Catedral”.

La figura 3 muestra la evolución de la concentración medida diaria de radón (ponderada en función de los tiempos de permanencia de los guías en cada sector de la mina) en relación a la evolución de temperatura del exterior y de la mina en el interior de la geoda. La temperatura media en el interior de la geoda es de 19.40 °C, variando en un estrecho rango entre 19.0 y 19.65 °C, mientras que la temperatura media en las proximidades de su acceso es de 18.5 °C. La variación temporal de gas radón en el interior de la mina está controlada por las diferencias de temperatura entre el exterior y la mina, que son las que activan el intercambio de aire entre la mina y el exterior por circulación convectiva. De este modo cuando la temperatura exterior supera a la temperatura interior en la mina, el sistema de galerías no ventila lo suficiente y el gas radón, más pesado que el resto de gases del aire, tiende a acumularse en el interior (meses de mayo a octubre). Por el contrario, cuando la temperatura media de la mina es superior a la temperatura en el exterior (de noviembre a abril), el aire comparativamente caliente de las galerías circula hacia las bocas superiores de conexión con el exterior disminuyendo el contenido en radón en el interior de la mina.

Por lo tanto, las previsiones meteorológicas referentes a las variaciones y tendencias de la temperatura exterior en relación al estrecho rango térmico mencionado para la mina, pueden ser utilizadas para predecir, con cierta fiabilidad, la concentración media de radón en la mina. La situación de las conexiones con el exterior y pozos es determinante en el grado de renovación del aire subterráneo y, por tanto, en los valores medios y máximos de radón registrados en cada zona de la mina. En las galerías superiores, el sector Polvorín-Catedral se encuentra bien ventilado por su proximidad a un pozo de ventilación, mientras que la Sala Luminiscencia se trata de una sala de explotación minera que se encuentra algo aislada de la galería principal de acceso. La Geoda partida y la Geoda gigante se encuentran en sectores a menor cota y, por tanto, menos conectados con la atmósfera exterior. Dentro del marco normativo referente a la protección frente a la exposición a la radiación natural, la Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011, del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), publicada en el BOE nº 22 de 26 de enero de 2012, establece que en aquellas actividades en las que los trabajadores estén expuestos a gas radón con una concentración media anual igual o superior a 600 Bq/m<sup>3</sup>, deben aplicar un nivel bajo de control.

Por encima de este nivel de radón debe además “aplicarse las correspondientes medidas de protección radiológica, en el caso de que una vez realizadas acciones de remedio no se consiguiera reducir la concentración de radón”. De forma previa, el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI), aprobado por Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, estableció las disposiciones relativas a las fuentes naturales de radiación. El nivel de referencia para las actuaciones indicadas en el artículo 63 del RPSRI corresponde a una concentración media anual de 1000 Bq/m<sup>3</sup>, por encima de esta concentración de radón deben aplicarse un nivel alto de control. En este nivel alto de control se aplicarán con carácter general los principios de protección radiológica

		$[^{222}\text{Rn}]$ , Bq/m <sup>3</sup>												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
2020	Mínima	84	116	138	136	506	1102	1305	1349	1154	368	158	95	84
	Media	139	213	255	258	806	1451	1619	1708	1557	653	306	172	761
	Máxima	224	375	462	474	1205	1829	1971	2103	2013	1069	542	296	2103
2021	Mínima	105	99	98	133	440	955	1492	1581	1324	714	163	115	98
	Media	187	185	191	292	738	1280	1837	1907	1706	1041	266	181	818
	Máxima	310	320	358	545	1114	1655	2191	2254	2148	1465	429	287	2254
Promedio		163	199	223	275	772	1365	1728	1807	1631	847	286	176	789

Tabla 1. Estadísticos mensuales y anuales de la concentración medida diaria de radón en el bienio 2020-2021, ponderada en función de los tiempos de permanencia de los guías en cada sector de la mina durante el recorrido turístico guiado.

operacional establecidos en el título IV del RPSRI, relativos a las medidas de vigilancia sanitaria de los trabajadores expuestos.

La media anual de la concentración de radón en la mina-geoda es superior a 1000 Bq/m<sup>3</sup> tanto en el sector Geoda-Geoda partida (1092 Bq/m<sup>3</sup>) como en la Sala Luminiscencia (1194 Bq/m<sup>3</sup>) (figura 2), disminuyendo a la mitad en las zonas más ventiladas del Polvorín-Catedral (500 Bq/m<sup>3</sup>), es decir, inferior a la concentración límite a partir de la cual se establece un nivel bajo de control frente a la exposición a la radiación natural.

Teniendo en cuenta la ponderación por tiempos de permanencia en cada sector de la mina durante las visitas guiadas, la concentración media de radón a la que estuvieron expuestos los guías en el periodo 2020-2021 fue 789 Bq/m<sup>3</sup>, variando entre 761 Bq/m<sup>3</sup> en 2020 y 818 Bq/m<sup>3</sup> en 2021 (Tabla 1). Estos valores determinan la necesidad de aplicar un nivel bajo de control y las correspondientes medidas de protección radiológica basadas en un seguimiento de los accesos de los trabajadores a la mina y del tiempo de permanencia en su interior. Si bien, durante el bienio 2020-2021, sí se registró un periodo entre 127 y 134 días/año con una concentración media ponderada superior al nivel de radón que marca la necesidad de un nivel alto de control frente a la exposición a la radiación natural (1000 Bq/m<sup>3</sup>) en verano -desde junio a septiembre- pero con pequeñas diferencias de días entre los años estudiados (figura 2 y tabla 1).

### *Dosimetría por exposición a gas radón*

En términos de dosis efectivas acumuladas en un año por exposición de trabajadores a radiación natural, y sin perjuicio de los límites de dosis acumulada recogidos en el artículo 9 del RPSRI, la Instrucción IS-33 del Consejo de Seguridad Nuclear establece los siguientes valores de dosis efectiva a los trabajadores cuya superación requiere de dispositivos de vigilancia y la adopción de medidas de control (de tipo técnico o administrativo) destinadas a reducir las exposiciones: < 1mSv/año: no es necesario control; 1-6 mSv/año: se debe aplicar un nivel bajo de control; y >6 mSv/año: se debe aplicar un nivel alto de control.

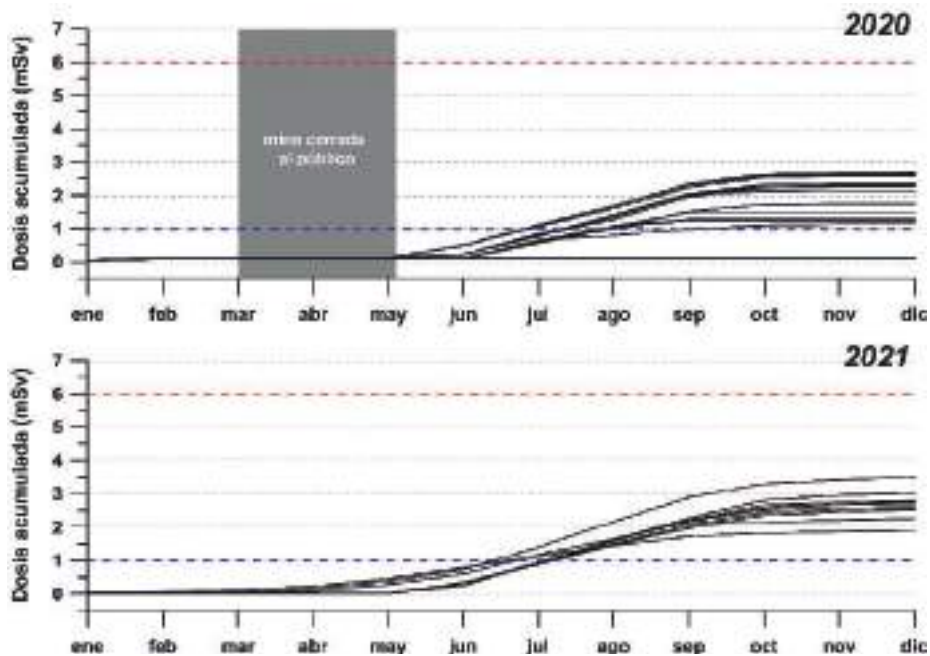


Figura 4. Evolución mensual de la dosis efectiva acumulada para los guías de la mina-geoda de Pulpí durante el bienio 2020-2021, en relación los valores de dosis acumuladas anuales que definen los dos niveles de control radiológico: bajo (1 mSv/año; línea azul discontinua) y alto (6 mSv/año; línea roja discontinua). Cada línea de dosis acumulada corresponde a un guía concreto (n=15).

De acuerdo con el RPSRI, a partir de este valor 6 mSv de dosis efectiva el lugar de trabajo (cavidad) se clasifica como Zona Controlada de Permanencia Limitada y los trabajadores expuestos dentro de la categoría A, con las implicaciones que ello conlleva de acuerdo a los principios fundamentales de protección operacional de los trabajadores expuestos. El proyecto de Real Decreto por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes, supone la transposición de la Directiva 2013/59/Euratom del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, de carácter vinculante a nivel estatal, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. Esta nueva normativa mantiene los criterios radiológicos y los mismos límites de dosis efectivas anuales y clasificación de zonas en función del riesgo de exposición, descritos en la normativa y recomendaciones anteriores, si bien establece que el límite máximo genérico de dosis efectiva para los trabajadores expuestos será de 20 mSv por año oficial.

Estos límites de dosis efectiva descritos sirven de referencia para las autoridades competentes y para los titulares de las actividades laborales afectadas por exposición a gas radón y, por lo tanto, son aplicables al caso de la actividad turística desarrollada en la mina-geoda de Pulpí. Bajo estas premisas, el diseño del régimen de visitas respecto al riesgo de exposición a gas radón de los guías de la mina-geoda debe tener como objetivo principal que la magnitud de las exposiciones no supere una dosis efectiva individual superior a 6 mSv por año oficial, de forma que solo sea necesaria la aplicación de un nivel



	Dosis máx. Anual (1 mSv/año)				Dosis máx. Anual (6 mSv/año)			
	2020		2021		2020		2021	
	nº horas	%	nº horas	%	nº horas	%	nº horas	%
<b>Ene</b>	108	>100	78	93	647	>100	467	>100
<b>Feb</b>	64	77	75	90	386	>100	452	>100
<b>Mar</b>	52	63	67	81	314	>100	405	>100
<b>Abr</b>	51	61	44	53	305	>100	265	>100
<b>May</b>	20	24	22	26	120	>100	130	>100
<b>Jun</b>	13	16	15	17	79	95	87	>100
<b>Jul</b>	12	15	11	13	73	88	66	79
<b>Ago</b>	11	14	11	13	69	82	64	77
<b>Sep</b>	12	14	11	13	72	86	67	81
<b>Oct</b>	23	27	16	20	135	>100	99	>100
<b>Nov</b>	44	53	56	67	267	>100	337	>100
<b>Dic</b>	82	98	84	>100	490	>100	505	>100
<b>Total</b>	<b>493</b>		<b>491</b>		<b>2957</b>		<b>2945</b>	

Tabla 2. Distribución mensual del tiempo máximo de permanencia aconsejable para no superar una dosis efectiva acumulada de 1 y 6 mSv/año (basado en los registros de 2020 y 2021). Para cada mes se especifica el % de horas de permanencia posibles del guía respecto número máximo de horas/mes que puede estar un guía dentro de la mina según los turnos de trabajo (83,5 horas/mes).

bajo de control. Este grado de control implica las tareas que se vienen realizando en la mina desde su apertura al turismo, que incluyen; 1) la vigilancia radiológica del ambiente de trabajo de acuerdo con lo indicado en el artículo 26 del RPSRI; y 2) la estimación anual de dosis efectivas individuales a partir de los resultados de la vigilancia radiológica en el ambiente de trabajo, además de realizar un registro y notificación de los resultados de dosis de los trabajadores de acuerdo a lo dispuesto en los artículos 34 a 38 del RPSRI.

La figura 4 muestra la evolución mensual de la dosis efectiva acumulada para los guías de la mina-geoda de Pulpí durante los años 2020 y 2021. Para la estimación de las dosis mensuales se han considerado el caso de exposición diaria más desfavorable a partir de la media de las concentraciones máximas diarias de radón. En el año 2020, 13 de los 15 guías con un acceso regular a la galería de la mina para realizar las visitas guiadas, superaron una dosis anual acumulada de 1 mSv. Los valores de dosis de estos guías no superaron los 3 mSv/año, con un promedio de 1.98 mSv/año tras un tiempo medio de exposición acumulada de 423 horas/año (equivalente a 254 visitas guiadas). En 2021, todos los guías (9) con un acceso regular a la galería de la mina para realizar las visitas guiadas, superaron una dosis anual acumulada de 1 mSv. Los valores de dosis de estos guías no superaron los 3.5 mSv/año, con un promedio de 2,67 mSv/año tras un tiempo medio de exposición acumuladas de 527 horas/año (equivalente a 316 visitas guiadas).

En los años 2020 y 2021, la mina-geoda de Pulpí no han tenido un régimen normal de apertura al turismo a lo largo de cada año debido a las restricciones por la pandemia Covid-19, de forma que ha habido algunos cierres temporales o bien limitación de los aforos, que han reducido tanto la cantidad de personas por grupo como la frecuencia

diaria de visitas. De acuerdo a las indicaciones de los gestores de la mina-geoda, la previsión de una accesibilidad plena a la mina para las visitas por parte de un mismo guía turístico (con una dedicación laboral de 40 horas semanales) se establece en 576 visitas al año, cantidad que asciende hasta 600 horas debido a otras entradas complementarias de apoyo en otras visitas guiadas. Teniendo en cuenta el calendario laboral de los guías (con 48 semanas al año y periodos vacaciones de 1-2 semanas en temporada alta y una semana como máximo en temporada alta) el reparto de esas 600 entradas para un guía supone 50 entradas al mes (83.5 horas/mes). A partir de los registros de medias de las concentraciones máximas diarias de radón a lo largo del bienio 2020-2021, se estima que este régimen estándar de accesibilidad para un único guía turístico conllevaría una dosis anual acumulada en un rango de 3,62 a 3,76 mSv/año, menor en cualquier caso que el límite de 6 mSv/año a partir del cual se debería aplicar un nivel alto de control.

La tabla 2 resume los tiempos máximos de permanencia recomendable en cada mes para no superar una dosis efectiva acumulada de 1 y 6 mSv/año, es decir ambos valores límite que determina un nivel bajo y alto de control radiológico, respectivamente. Para la estimación de las dosis mensuales se han considerado el caso de exposición diaria más desfavorable a partir de la media de las concentraciones máximas diarias de radón. En un escenario más restrictivo, asociado a la consecución de una situación en la que no es necesario ningún control radiológico (dosis acumulada < 1 mSv/año) las limitaciones en los accesos y tiempo de permanencia en la mina son muy importantes (por debajo de 15 horas/mes entre junio y septiembre), lo que hace inviable mantener este criterio de dosis acumulada teniendo en cuenta el calendario de las visitas y la dedicación laboral de los guías. En un escenario menos restrictivo, pero manteniendo un nivel bajo de control radiológico (dosis acumulada < 6 mSv/año), no es necesario limitar la accesibilidad y tiempo de permanencia en la mina de cada guía en el periodo entre octubre a mayo, si bien es recomendable una reducción del número de horas de permanencia de cada guía entre junio y septiembre, situándose éste entre 64 y 87 horas/mes (tabla 2).

## Conclusiones

La evaluación de los datos de concentración de radón en el bienio 2021-2022 en diferentes sectores de la mina-geoda de Pulpí ha permitido determinar la naturaleza y magnitud del riesgo radiológico para los trabajadores expuestos a este gas. Los resultados obtenidos suponen una herramienta de utilidad para los gestores de la mina a la hora de adoptar, en su caso, las medidas oportunas de control y limitación de accesos y permanencia de los trabajadores en el interior, o bien para el rediseño del régimen y recorrido de las visitas. El alcance de las medidas de prevención y de vigilancia, así como su naturaleza y calidad, deberán adaptarse en función de los riesgos vinculados al trabajo de los guías y al grado de exposición a las radiaciones ionizantes.

Se recomienda regular los tiempos de exposición de los trabajadores con el objetivo mantener la necesidad de un nivel de control bajo (establecido para dosis acumuladas inferiores a 6 mSv/año) y, por lo tanto, que la mina no sea clasificada como Zona Controlada de Permanencia Limitada de acuerdo a la normativa vigente en la materia. Este nivel de

control bajo implica la continuidad de la monitorización de los niveles de radón a lo largo del recorrido turístico, así como el cálculo pormenorizado de las dosis de radiación ambiental recibidas por cada guía. Igualmente, se recomienda el control en detalle de los accesos de cada guía, con especial atención a la limitación de accesos individuales en el periodo de verano (junio-septiembre), reduciendo el tiempo de permanencia en un 64-87% respecto a las horas mensuales potenciales (83,5 horas/mes, equivalente a 50 visitas guiadas cada mes).

Las líneas de investigación futuras en la mina-geoda de Pulpí en relación al estudio y seguimiento de los niveles de radioactividad ambiental, estarán centradas en la medición de la distribución de tamaño de aerosoles a escala nanométrica y de las concentraciones de actividad en el aire de los descendientes del radón de vida corta, con el objetivo de realizar una estimación específica para la mina-geoda del factor de equilibrio y de la fracción libre, ahondando así en la exactitud y especificidad de los estimaciones dosimétricas. Por otra parte, los esfuerzos deben de ir también encaminados a la realización de una simulación de las variaciones en concentración de radón en el tiempo en función de los cambios térmicos en el exterior en relación a la temperatura cuasi-constante de la mina, a través de un modelo lineal basado en ecuaciones diferenciales ordinarias entre ambos parámetros. Este modelo podría constituir una herramienta predictiva de los niveles de radiación ambiental en la mina, así como de gestión preventiva, por ejemplo, ante fenómenos meteorológicos extremos como olas de calor prolongadas o anómalas en su ocurrencia, que favorezcan las condiciones de aislamiento de la mina y, por lo tanto, el incremento sostenido de los niveles de radón.

## Agradecimientos

Este trabajo se encuadra dentro del Proyecto de transferencia de conocimiento UAL-Transfiere (LUMMIN - Luminiscencia Mineral) de la Universidad de Almería. Agradecemos la colaboración del Ayuntamiento de Pulpí por facilitar los recursos materiales y humanos para realizar la investigación.

## Referencias

- Álvarez-Gallego, M., García-Antón E., Fernández-Cortés, A., Cuezva, S., Sánchez-Moral, S. (2015). High radon levels in subterranean environments: monitoring and technical criteria to ensure human safety (case of Castañar cave, Spain). *Journal of Environmental Radioactivity*, 145: 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.03.024>.
- Anjos, R.M., Umisedo, N., da Silva, A.A.R., Estellita, L., Rizzotto, M., Yoshimura, E.M., Velasco, H., Santos, A.M.A. (2010). Occupational exposure to radon and natural gamma radiation in the La Carolina, a former gold mine in San Luis Province, Argentina. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101: 153-158. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.09.010>
- Cigna, A.A. (2005). Radon in caves. *International Journal of Speleology*, 34: 1-18. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.34.1.1>.
- Fijalkowska-Lichwa, L. (2014). Short-term radon activity concentration changes along the Underground Educational Tourist Route in the Old Uranium Mine in Kletno (Sudety Mts., SW Poland). *Journal of Environmental Radioactivity*, 135: 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.03.014>

- Gunn, J. (2003). Radon in caves. *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, London, G.B., Fitzroy Dearborn (an imprint of Taylor & Francis Books, Inc.), pp. 617–619.
- Halk J., Csige I., Hunyadi I., Varhegyi A., Geczy G. (1997). Radon transport in fractured porous media-experimental study in caves. *Environment International*, 22: S433–S437. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(96\)00143-2](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(96)00143-2).
- ICRP (2017). ICRP Publication 137: Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3: Annals of the ICRP, v. 46, no. 3–4, p. 1–486. <https://doi.org/10.1177/0146645317734963>
- Langridge D., Stokes R.P., Jackson C.P. (2010). Monitoring of radon gas in caves of the Yorkshire Dales, United Kingdom. *Journal of Radiological Protection*, 30(3): 545-556. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.09.010>.
- Lario, J., Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Cuezva S., Soler, V. (2005). Radon continuous monitoring in Altamira Cave (Northern Spain) to assess user's annual effective dose. *Journal of Environmental Radioactivity*, 80: 161–174. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.06.007>.
- Lario, J., Sánchez-Moral, S., Cuezva S., Taborda, M., Soler, V. (2006). High Rn-222 levels in a show cave (Castañar de Ibor, Spain): proposal and application of management measures to minimize the effects on guides and visitors. *Atmospheric Environment*, 40: 7395–7400. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.046>.
- Przylibski, T.A. (2001). Radon and its daughter products behaviour in the air of an underground tourist route in the former arsenic and gold mine in Złoty Stok (Sudety Mountains, SW Poland). *Journal of Environmental Radioactivity*, 57: 87–103. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(01\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00012-1).
- Quarto, M., Puglise, M., Loffredo F., Zambella, C., Roca, V. (2014). Radon measurements and effective dose from radon inhalation estimation in the Neapolitan catacombs. *Radiation Protection Dosimetry*, 158(4): 442-446. <https://doi.org/10.1093/rpd/nct255>.
- Sainz, C., Quindós, L.S., Fuente, I., Nicolás, J., Quindós, L. (2007). Analysis of the main factors affecting the evaluation of the radon dose in workplaces: the case of tourist caves. *Journal of Hazardous Materials*, 145: 368-371. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.033>.
- Sesana, L., Caprioli, E., Marcazzan, G.M. (2003). Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere. *Journal of Environmental Radioactivity*, 65 (2): 147-160. [https://doi.org/10.1016/s0265-931x\(02\)00093-0](https://doi.org/10.1016/s0265-931x(02)00093-0).
- UNSCEAR-United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008). Report to the General Assembly, Vol. I. Sources of Ionizing Radiation, 20 pages.
- Waring, CL., Hankin, SI., Solomon, SB., Long, S., Yule, A., Blackley, R., Werczynski, S., Baker, AC. 2021. Cave radon exposure, dose, dynamics and mitigation. *Journal of Cave and Karst Studies*, 83 (1): 1-19. properties of atmosphere. *Journal of Environmental Radioactivity*, 65 (2): 147-160. <https://doi.org/10.4311/2019ES0124>.

# Funcionamiento, organización y gestión de la atracción turística y Monumento Natural de Mina Rica y la Geoda gigante de Pulpí (Almería)

Milagros CARRETERO TORTOSA <sup>(1)</sup>, Jesús MORILLAS RAMOS <sup>(1)</sup>,  
Francisco Javier FERNÁNDEZ AMO <sup>(2)</sup>, Juan Bautista LÓPEZ RUIZ <sup>(3)</sup>,  
José María CALAFORRA CHORDI <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Geoda de Pulpí. Empresa Municipal del Suelo, Ayuntamiento de Pulpí  
milagros-carreterotortosa@gmail.com, jmorillasr@gmail.com

<sup>(2)</sup> TECMINSA Técnicas Mineras de Santa Marta S.L. francis@tecmineras.com

<sup>(3)</sup> Ayuntamiento de Pulpí. jbloperu@pulpi.es

<sup>(4)</sup> G.I. Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Centro Andaluz de Estudio y Seguimiento del Cambio Global.  
Universidad de Almería. jmcalaforra@ual.es

---

## Resumen

Situada en la falda oriental de la Sierra del Aguilón, en Pilar de Jaravía (Pulpí, Almería) se encuentra Mina Rica, una mina de una belleza espectacular que alberga la Geoda de Pulpí, un atractivo turístico sinigual de un gran valor geológico. Para poder disfrutar de la belleza de este entorno minero, se han realizado una serie de actuaciones como la rehabilitación de la mina (desescombro de galerías, revisión y mejora de entibados, escaleras de acceso a la geoda, escaleras de salida de emergencia, sistema de iluminación...) pero también se ha tenido que formar a un equipo de guías y trabajadores, que son el verdadero motor de esta mina. Para ello, se programó un curso que constó de varios módulos formativos que abarcaron diversas temáticas como la historia del municipio de Pulpí, historia de la minería almeriense, geología general, mineralogía y cristalografía, aspectos de ingeniería de minas, seguridad, salud y protección civil, atención al público, etc. El curso lo realizaron 50 personas. En la actualidad, el personal sigue un proceso de formación continua para adaptarse a las novedades referidas tanto a nuevas adecuaciones de la mina como al avance de las investigaciones científicas, además de los correspondientes reciclajes formativos. En estos momentos, el equipo lo forman 21 trabajadores, entre guías turísticos, oficina y administración, tienda y personal de mantenimiento. Las jornadas de trabajo tienen una duración de 5 horas por turno, en el caso de los guías, durante el cual realizan dos visitas al interior de la mina. También se dispone de talleres para niños en los que se les enseña a identificar minerales, mediante técnicas de visu, bateos para separar pirita, así como otros talleres que están en proceso de desarrollo. Las infraestructuras han ido evolucionando desde la apertura al público y siguen en proceso de evolución.

**Palabras clave:** infraestructuras, formación, Geoda de Pulpí, Mina Rica, personal.

## **Operation, organization and management of the tourist attraction and Natural Monument of Mina Rica and the Giant Geode of Pulpí (Almería).**

### **Abstract**

*Located on the eastern slope of the Sierra del Aguilón, in Pilar de Jaravía (Pulpí, Almería) is Mina Rica, a mine of spectacular beauty that houses the Pulpí Geode, a unique tourist attraction of great geological value. In order to enjoy the beauty of this mining environment, a series of actions have been carried out such as the rehabilitation of the mine (clearing of galleries, revision and improvement of shoring, access stairs to the geode, emergency exit stairs, lighting system...) but it has also been necessary to train a staff of guides and workers, who are the real engine of this mine. To this end, a course was programmed consisting of several training modules covering various topics such as the history of the municipality of Pulpí, the history of mining in Almería, general geology, mineralogy and crystallography, aspects of mining engineering, safety, health and civil protection, customer service, etc. The course was attended by 50 people. At present, the staff is undergoing a continuous training process to adapt to new developments in the mine and to the progress of scientific research, as well as the corresponding training refresher courses. At present, the team is made up of 21 workers, including tour guides, office and administration, shop and maintenance personnel. The work days last 5 hours per shift, in the case of the guides, during which they make two visits to the interior of the mine. There are also workshops for children in which they are taught to identify minerals, using visu techniques, and to separate pyrite, as well as other workshops that are in the process of being developed. The infrastructures have been evolving since opening to the public and are still in the process of evolution.*

**Keywords:** *infrastructure, Mina Rica, Pulpí Geode, personnel, training.*

## **Introducción**

El conjunto que forman la Mina Rica y la Geoda de Pulpí constituye en la actualidad uno de los atractivos geoturísticos más importantes del sureste español debido a la importancia patrimonial que tiene la mina, en lo que se refiere al patrimonio geominero que alberga en el interior y, en especial, al descubrimiento de un fenómeno geológico único como es la Geoda de Pulpí. Se encuentra situado en la pedanía de El Pilar de Jaravía, en el T.M. de Pulpí, en la provincia de Almería, cerca del límite con la Comunidad Autónoma de Murcia. Desde su apertura al público ha constituido un impulso turístico en la región.

## **Enclave geológico**

El yacimiento de la Mina Rica se encuentra en unas rocas carbonatadas (dolomías) de edad triásica que, en afloramiento, destacan sobre unos relieves más suaves constituidos

por filitas paleozoicas en la falda oriental de la Sierra del Aguilón. Las dolomías se encuentran compartimentadas y presentan un contacto tectónico (zonas de cizalla) con las filitas que las rodean. La mineralización, que fue objeto de explotación, la conforman óxidos de hierro (goethita y hematites), carbonatos de hierro (siderita y ankerita) y sulfuros (galena argentífera).

La mineralogénesis responde a un proceso metasomático en el cual, las dolomías fueron reemplazadas por los carbonatos de hierro, principalmente ankeritas, que constituyeron la mineralización más importante de la mina, posteriormente procesos hidrotermales generaron las mineralizaciones de sulfuros de plomo y plata (Martínez Frías, 1998; Morales Ruano, 1994; Palero *et al.*, 2015).

## **Puesta en valor de Mina Rica y la Geoda de Pulpí**

La Geoda de Pulpí se encuentra en el interior de la Mina Rica, cuya explotación fue abandonada en 1969. La geoda fue descubierta en diciembre de 1999 por un grupo de mineralogistas en una de sus expediciones a esta mina. Tras el conocimiento del descubrimiento de la geoda y la importancia y singularidad que tenía, la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, el Ayto. de Pulpí y la Universidad de Almería decidieron protegerla e intentar estudiar la manera de hacerla visitable. No es hasta 2017 cuando se realizan los proyectos de posible adecuación para su acondicionamiento y valorización. La inauguración de la adecuación turística de la mina y apertura al público se produjo el 5 de agosto de 2019, veinte años después de su descubrimiento, tras la realización de numerosos proyectos e investigaciones científicas (Gázquez *et al.*, 2022).

La cronología de las actuaciones del acondicionamiento de la Mina Rica puede resumirse en los siguientes hitos (Fernández Amo y Solanilla, 2020):



*Figura 1. Izquierda: galería principal colmatada de lodos y escombros. Derecha: entibados en la galería principal en la actualidad (fotos: TECMINSA)*

- Extracción de lodos y escombros de la galería principal (unas 700 Toneladas) en 2018, con rebaje en algunos tramos para conseguir una altura media de las galerías quedó tras esta actuación en 1,80 metros (figura 1, izq.). Sostentamiento provisional de algunos tramos de la galería principal, debido al mal estado en el que se encontraba.
- En 2019 se realizan los entibados definitivos (figura 1, der.) sustituyendo los provisionales, y se realizan los accesos a distintos niveles de la Mina Rica, diseñando y construyendo las escaleras de acceso que comunican el primer de la Mina Rica con el Segundo, Tercer Nivel y la entrada a la Geoda. En total son 164 escalones los que hay que salvar para llegar a la Geoda, todos ellos en diversos tramos de escaleras metálicas de diversa tipología (caracol o rampa), adecuándolas a los diferentes espacios por donde discurren.
- Se diseña y construye la escalera de emergencia, situada en la llamada “Catedral de Pulpí”, en el sector “Quien Tal Pensara”. También se hace la instalación eléctrica de la mina, se ilumina, se introduce fibra óptica a lo largo de todo el recorrido de la mina, para su monitorización y por último se musealiza para su apertura el 5 de agosto de 2019.
- En 2020 se instala un ascensor para hacer más accesible el acceso a la Geoda, desde el Primer Nivel al Segundo Nivel, donde se vence una escalera de caracol de 15 metros, que dificultaba la subida para algunos visitantes de más edad o de movilidad más reducida. Este ascensor solo se utiliza en casos realmente necesarios. Es hidráulico y el tiempo de subida y bajada no permite ser utilizado por todos los integrantes del grupo.
- Se acondiciona la galería de Colas de Golondrina. Dicha galería posee un importante valor geológico, patrimonial e histórico debido a los restos de la actividad minera que en ella se encuentran (utensilios, huellas y firmas de los mineros), y a la presencia de una geoda con macrocristales transparentes de yeso y otros elementos de interés geológico (mineralizaciones, drusas, etc.). Esta galería se musealiza empleando restos de utensilios y objetos de los mineros encontrados y preservados en las obras de acondicionamiento.
- En 2022 se instalan estructuras de madera, con techo de media caña, en el camino que hay que recorrer desde la explanada hasta la bocamina para ofrecer sombra en los días más calurosos del verano.
- También en este 2022, se está construyendo un edificio que albergará el nuevo centro de recepción de visitantes, tienda, restaurante, etc.

Recientemente, tras la redacción de la Memoria correspondiente (Fernández Amo y Solanilla, 2022) se declaró mediante Decreto 11/2022, de 15 de febrero, Monumento Natural de Andalucía a la Geoda de Pulpí y Mina Rica del Pilar de Jaravía de Almería con





*Figura 2. Declaración de Monumento Natural de Andalucía.*

la aprobación de las normas y directrices para su ordenación y gestión (Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, de 18-02-2022) (figura 2).

## **Curso de formación del personal de La Geoda de Pulpí**

Para preparar al equipo de trabajadores de La Geoda de Pulpí se programó un curso que constó de varios módulos formativos que abarcaron diversas temáticas. El curso se realizó a lo largo del primer semestre de 2019.

Las temáticas tratadas durante el curso fueron:

- Historia del municipio de Pulpí.
- Historia de la minería almeriense.
- Geología general.
- Mineralogía y cristalografía.
- Patrimonio geológico y minero de la Mina Rica.
- Aspectos de ingeniería de minas y de seguridad. -Cursos de salud y protección civil.
- Atención al público.
- Prácticas reales de guiado en el interior de la mina.

El curso lo realizaron 50 personas entre las que se hizo una selección. En la actualidad, el personal sigue un proceso de formación continua para adaptarse a las novedades referidas tanto a nuevas adecuaciones de la mina como al avance de las investigaciones científicas, además de los correspondientes reciclajes formativos.

## **Turnos de trabajo**

La mina se encuentra abierta durante todo el año. Se trata de un turismo anual, no estacional. Se abre todos los días de la semana, en turnos de mañana y tarde, excepto los lunes, que se cierra para realizar tareas de mantenimiento. Se recibe una media de 200 personas al día. Hasta la fecha actual, han visitado la geoda más de 170.000 personas.

Actualmente, la plantilla está compuesta por 21 trabajadores, entre guías turísticos, oficina y administración, tienda y personal de mantenimiento.

El personal de mantenimiento tiene una jornada laboral de 8 horas al día, 5 días a la semana. El resto del personal (oficina, tienda y guías), en función del número de horas de contrato, ejercen su actividad en turnos de mañana y tarde. Cada turno tiene una duración de 5 horas.

Los guías, en cada turno realizan dos visitas. Cada visita tiene una duración aproximada de 2 horas desde que reciben al grupo hasta que salen de la mina.

## **¿Cómo es la visita?**

Son visitas guiadas por personal cualificado, seleccionado del curso de formación realizado.

Se trata de grupos reducidos, máximo 15 personas, en los que se ha querido dar prioridad a la calidad de la visita antes que la cantidad de visitantes por grupo. El precio es de 22 € por adulto y 10 € por niño (entre 8 y 16 años, ambos inclusive). No pueden entrar menores de 8 años. Cada media hora comienza una visita.

Cuando se trata de visitas organizadas para grupos, de más de 15 personas, el precio se reduce a 15 € por persona, pero se sigue manteniendo el máximo de 15 visitantes por grupo.

Se dispone de audioguías en varios idiomas: inglés, francés, alemán y neerlandés. En este caso también van acompañados de un guía. No se puede hacer la visita por libre.

Por su seguridad, tienen que venir con calzado deportivo y cerrado, tanto de la puntera como del talón. No se puede entrar en la mina con bolsos ni mochilas. La temperatura en el interior de la mina oscila entre 17 °C y 20 °C durante todo el año.

El guía ejerce de fotógrafo y realiza a los visitantes las fotografías en varios puntos de la mina. Después se les envían por correo electrónico, por tan solo un euro por persona. Se

les adjunta, además de sus fotografías, otras de lugares de la mina que han visto en el recorrido. Si se llevan una fotografía en papel (coste 3 €) se les adjuntan todas las fotos gratuitamente a un correo electrónico. Con la medida de no dejar hacer fotografías a los visitantes se consigue una mayor dinamización de la visita y se evitan retrasos.

En cualquier caso, quien quiera hacer sus fotografías puede contratar una visita de ese tipo fuera de grupos. La información de ese tipo de visita está recogida en la web y se pueden aclarar dudas contactando con las oficinas.

Si alguien no puede realizar la visita completa por alguna circunstancia, hay personal de apoyo que les acompaña hasta la salida de la mina.

Las entradas se pueden adquirir por teléfono (950962727), a través de la página web [www.geodapulpi.es](http://www.geodapulpi.es) o por email ([informacion@geodapulpi.es](mailto:informacion@geodapulpi.es)).

## **Descripción del recorrido durante la visita**

La visita comienza en el centro de recepción de visitantes, donde se encuentran ubicadas las oficinas-tienda y el parking de vehículos. El guía recibe a su grupo y comienza ubicando al visitante y dando un paseo hasta llegar a la bocamina. En ese paseo bajan por una cuesta donde reciben la explicación de lo que van viendo a su paso (qué minerales se extraían de la mina, cuánto tiempo estuvo en explotación, para qué servían cada uno de los edificios mineros que, a día de hoy, se mantienen en el lugar, implantación de la vía del tren a causa de la minería...). Al llegar a la bocamina se les ofrecen redecillas y cascos para ponerse antes de entrar en ella. La mina tiene iluminación artificial por lo que no se necesitan frontales en los cascos. Se recuerdan las normas de seguridad y se comienza con la primera fotografía que se realiza durante el recorrido.

Al entrar en la mina comienza una visita en la que se les va explicando cómo trabajaron los mineros, turnos de trabajo que tenían, ropa y calzado que utilizaban, herramientas, métodos de explotación que realizaban, así como lo referente a la geología (fallas, rocas y minerales que hay en Mina Rica, importancia de cada mineral, qué es una geoda, formación de la Geoda de Pulpí, etc.), buena parte de estas explicaciones recogidas en Calaforra y Ferrer (2017). como libro guía. Hay una sala donde se muestran minerales luminiscentes en las propias paredes de la mina. Al final de la visita y como colofón pueden ver la geoda.

## **¿Cómo se ve la Geoda?**

Cuando se llega al tercer nivel y tras una explicación de qué es una geoda, por qué es tan peculiar la de Pulpí, cómo se ha formado, etc., se les da a los visitantes las instrucciones para ver la Geoda Gigante, para protegerla, por tanto, preservarla. Estas pautas son:

- Quitarse el casco (no la redecilla).



*Figura 3. Fotografía que muestra lo que contemplan los visitantes al asomarse a la Geoda.*

- Ponerse mascarilla.
- Ponerse unos protectores en las manos.

En ese momento, con ayuda del guía, introducen medio cuerpo por una cavidad que hay en la pared (entre el tercer y cuarto nivel) y, una vez posicionados en el lugar correcto, el guía enciende las luces instaladas en el interior de la geoda. Los visitantes contemplan a su izquierda una cavidad de 8 metros de largo por 2 metros de ancho y 2 metros de alto, aproximadamente, totalmente tapizada de cristales de yesos seleníticos (figura 3).

Los visitantes de la Geoda de Pulpí van pensando en ver una geoda y se encuentran con una mina espectacular. La mina ha pasado a ser uno de los mayores atractivos que tiene la visita, la combinación de un increíble y singular patrimonio geológico con un patrimonio minero único y muy bien conservado. Se trata de una experiencia que no deja a nadie indiferente.

Debido a la singularidad, buen estado de conservación y a una protección, conservación y valorización ejemplar realizada por el Excmo. Ayuntamiento de Pulpí, la Mina Rica y la Geoda de Pulpí han sido declaradas Monumento Natural de Andalucía, a propuesta del propio Ayto. de Pulpí, se trata de un Monumento Natural de carácter mixto (geológico y ecocultural). Las instalaciones de las minas de Pilar de Jaravía ya fueron declaradas BIC (Bien de Interés Cultural) en el año 2004.

La declaración de Mina Rica se debe a que, desde el ámbito patrimonial geológico, la mina alberga decenas de geodas y drusas con macrocristales de yeso, destacando la

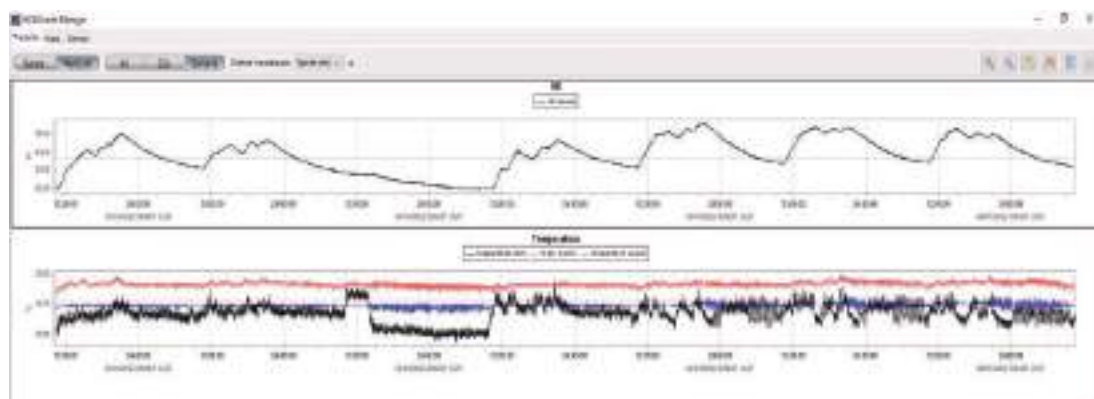


Figura 4. Monitorización en tiempo real y con conexión a internet y alarmas automáticas de valores críticos del interior de la geoda.

Geoda Gigante, la Geoda Partida o la Gran Drusa. Además, a lo largo del recorrido se pueden ver numerosos elementos de interés como plegamientos, superficies de falla, neoformación de minerales como "barbas de yeso", fenómenos de karstificación con la presencia de espeleotemas, precipitación de la efímera epsomita y de otros sulfatos y sulfuros complejos.

Desde el ámbito patrimonial minero se preservan numerosas estructuras y elementos de interés como sostenimientos mineros, pozo maestro con parte de la estructura original preservada, cesteros, pilares verticales, llaves de sostenimiento, cueles, etc., desde el ámbito patrimonial mineralógico destacan los cristales de yeso de extraordinario tamaño y pureza, cristales de celestina aciculares incluidas o no en yesos, cristales de barita y siderita, etc.

La Geoda de Pulpí es considerada un patrimonio singular a nivel mundial ya que su transparencia y estado de conservación la convierten en una auténtica joya de la naturaleza.

Para preservar ese buen estado, tanto la geoda como la mina se encuentran monitorizadas. En el interior de la geoda se han instalado sensores de temperatura, CO<sub>2</sub> y humedad relativa, al igual que en algunas zonas de la mina, a la cual hay que añadir la presencia de medidores de radón. El control de los datos recogidos de estos sensores se realiza desde la Universidad de Almería (figura 4).

## Actividades complementarias a realizar

La visita a Mina Rica y a la Geoda de Pulpí se puede complementar con una visita al Castillo de San Juan de los Terreros, batería defensiva que hoy se utiliza como centro de interpretación del litoral andaluz y en el que se encuentra la visita virtual de la geoda,

mediante sistema de Oculos® de visión en 3D. También se puede ver una exposición de minerales y rocas y otra de utensilios hechos con esparto. Para quien visita la Geoda de Pulpí tiene la entrada gratuita a dichas instalaciones (excepto la visita virtual que no está incluida).



*Figura 5. Sala de luminiscencia en Espacio Escénico de Pulpí (fotos: Francisco Hoyos).*



*Figura 6. Talleres de bateo (izquierda) y explotación mineralógica (derecha).*

Además se pueden programar rutas de senderismo por el municipio de Pulpí, con unos paisajes maravillosos.

En enero de 2022 se abrió una sala de minerales luminiscentes en el Espacio Escénico de Pulpí con más de 1.000 muestras de dichos minerales (Fernández Amo y Calaforra, 2022; Martegani *et al.*, 2022) (figura 5). Un lujo poder admirar ese espectáculo de color. Con la entrada de la geoda sale más económico.

Otra oferta que tenemos en la Geoda de Pulpí son talleres para niños en los que jugando se adentran en el mundo de la geología. Aprenden a batear pirita (figura 6, izq.), buscar y reconocer con ayuda de unas tablas que les facilitamos qué minerales han encontrado (figura 6, der.).

## Conclusiones

La apertura de La Mina Rica y la Geoda de Pulpí al público ha supuesto un desafío tanto en lo que concierne a su rehabilitación como al sistema de organización y gestión de las visitas.

Se ha querido dar más importancia a la calidad de las visitas que a la cantidad, pero siempre teniendo en cuenta y primando la conservación del patrimonio geominero y en especial a la Geoda por lo que se ha dispuesto un sistema de monitorización de parámetros ambientales tanto en el interior de la mina como en la propia Geoda.

Actualmente, se sigue un proceso de formación continua a los trabajadores que adapta los contenidos de la visita a las nuevas investigaciones y a nuevos atractivos y actividades que están en proceso de desarrollo para ofrecer a los clientes una experiencia turística inolvidable.

## Referencias

- Calaforra, J.M., Fernández Cortes, Á., Moreno, R. (2001) Memoria del proyecto de estudio y valoración ambiental de la Geoda de Pulpí. Universidad de Almería - Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, (informe inédito).
- Calaforra, J.M., Ferrer, V. (2017). *La Geoda Gigante de Pulpí. Pilar de Jaravía (Almería)*. ISBN 13: 978-84-941725-8-8.
- Fernández Amo, F.J., Calaforra, J.M. (2022). *La luminiscencia en minas y cuevas españolas como atractivo Geoturístico*. En: J.M. Calaforra y J.J. Durán (eds.), *Minas y Cuevas: Patrimonio Geológico y Turístico*, VIII Congreso Español sobre Cuevas y Minas Turísticas, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. Pulpí (Almería).
- Martegani, L., Gázquez F., Fernández Cortés, A., Gisbert, J., Carretero, M., Morillas J. Fernández Amo, F.J., Calaforra, J.M. (2022). *Minerales luminiscentes de la Mina Rica y la "Sala Negra" de Pulpí (Almería)*. En: J.M. Calaforra y J.J. Durán (eds.), *Minas y Cuevas: Patrimonio Geológico y Turístico*, VIII Congreso Español sobre Cuevas y Minas Turísticas, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. Pulpí (Almería).
- Gázquez, F., Montserín, A., Martegani, L., Fernández Cortés, A., García Guinea, J., Rull, F. Calaforra, J.M. (2022). *Dos décadas de investigaciones científicas en la Geoda Gigante de Pulpí (Almería, SE España)*. En: J.M. Calaforra y J.J. Durán (eds.), *Minas y Cuevas: Patrimonio Geológico y Turístico*, VIII Congreso Español sobre Cuevas y Minas Turísticas, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. Pulpí (Almería).
- Fernández Amo, F.J., Solanilla Rodrigo, J.A. (2020). *Memoria para la Declaración como Monumento Natural de Andalucía de la Geoda de Pulpí y Mina Rica de Pilar de Jaravía (Pulpí, Almería)*. Ayuntamiento de Pulpí y

- Consejera de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible Junta de Adanlucía (ver Decreto 11/2022, de 15 de febrero, Boletín Oficial de la Junta de Andalucía de 18-02-2022).
- Fernández Amo, F.J., Solanilla Rodrigo, J.A. (2022). *Proyecto de Obras de accesos y acondicionamiento de la Mina Rica de Pulpí y Geoda de Pulpí para visitas turísticas*. Ayuntamiento de Pulpí (informe inédito).
- Martínez Frías, J. (1998). An ancient Ba–Sb–Ag–Fe–Hg bearing hydrothermal system in SE Spain. *Episodes*, 21, 248–251.
- Morales Ruano, S. (1994). Mineralogía, geoquímica y metalogía de los yacimientos hidrotermales del SE de España (Aguilas–Sierra Almagrera). PhD Thesis, Universidad de Granada.
- Palero, F., Canals, A, Van Driessche, A., García Ruíz, J.M. (2015). Interpretando la Mina Rica (Pulpí, Almería): Estructura, mineralogía y geoquímica. *Macla*, 20: 113-114.



## Los habitantes invisibles de la Cueva de Nerja

Patricia CASTILLO MARTÍNEZ <sup>(1)</sup>, Pablo BARRANCO VEGA <sup>(1)</sup>,  
Yolanda Del ROSAL PADIAL <sup>(2)</sup>, Cristina LIÑÁN BAENA <sup>(2,3)</sup>, Ángel FERNÁNDEZ CORTÉS <sup>(1)</sup>,  
Alberto TINAUT RANERA <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Dpto. Biología y Geología. CECOUAL. CITE-IIB. Universidad de Almería. Ctra. Sacramento s/n. 04120. La Cañada, Almería. España. pcm412@ual.es, pabloarranco@ual.es, acortes@ual.es

<sup>(2)</sup> Fundación Cueva de Nerja. Instituto de Investigación. Ctra. de Maro s/n. 29787, Nerja, Málaga. España. yolanda@cuevadenerja.es, cbaena@cuevadenerja.es

<sup>(3)</sup> Dpto. Ecología y Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. 29071. Málaga. España.

<sup>(4)</sup> Dpto. Zoología. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. 18071. Granada. España. hormiga@ugr.es

---

### Resumen

La Cueva de Nerja (Málaga, España) está declarada Bien de Interés Cultural, con categoría de Zona Arqueológica. Se ha muestreado, desde julio de 2017 hasta julio de 2019 para evaluar la variación de la entomofauna con respecto a los muestreos efectuados en 2000-2002. Se han diseñado, específicamente para este estudio, unas trampas de caída cebadas no invasivas respecto al sedimento arqueológico. Se situaron 60 puntos de muestreo, 20 trampas en las Galerías Turísticas (GT), 16 en las Galerías Altas (GA) y 24 en las Galerías Nuevas (GN). Se han capturado 11.786 ejemplares de artrópodos. El material está en proceso de identificación específica, si bien se ha agrupado ya en 46 taxones (muchos insectos a nivel de especie, y otros a nivel de orden, como los ácaros). Tanto el número de capturas, como la diversidad de los grupos taxonómicos (determinado mediante el índice de Shannon:  $H'$ ), evidencian diferencias entre las tres zonas de la cueva. Así, GT abarca el 74,97% de la fauna colectada, con 8.821 individuos y un valor de  $H'$  de 1,46; GA el 11,20%, con 1.324 ejemplares y un valor de  $H'$  de 1,38 y GN el 13,82%, con 1.631 ejemplares y  $H'$  de 1,51. Las GT poseen una abundancia de artrópodos entre cinco y casi siete veces más que las otras galerías. Las GA son la que menos fauna poseen y también menos diversidad. Es llamativo que las GN, con una abundancia pequeña, presentan la mayor diversidad de la cavidad. Los valores de  $H'$  son superiores a los obtenidos en el estudio anterior debido al incremento en el número de taxones capturados. En general, todos los valores del índice de Shannon son inferiores a 2, lo que indica ecosistemas con una diversidad baja, característico de ambientes cavernícolas. El análisis geoestadístico realizado para conjugar la presencia de entomofauna en la cueva mediante la variación temporal del número de capturas en cada trampa, evidencia la existencia de cinco focos con mayor abundancia de especímenes (tres en GT y dos en GN); de ellos, tres son también puntos de máxima variación (dos en GT y uno en GN). Por otro lado, la tipología de algunas especies, como los dípteros fóridos, sugieren zonas de conexión con el exterior en las GN.

**Palabras clave:** artrópodos, cueva Nerja, distribución espacial, trampas no invasivas.

## ***Invisible inhabitants in Nerja Cave***

### **Abstract**

*Nerja Cave (Málaga, Spain) has been declared as Cultural Interest Site, with a category of Archaeological area. It has been sampled from July 2017 to July 2019 to evaluate the variation of the entomofauna compared to 2000-2002 samplings. Non-invasive baited pitfall traps with respect to the archaeological sediment have been specifically designed for this study. 60 sampling points were placed, 20 traps in the Tourist Galleries (GT), 16 in the High Galleries (GA) and 24 in the New Galleries (GN). 11.786 specimens of arthropods have been captured. This material is still in the process of specific identification, although it has already been grouped into 46 taxa (many insects at the species level, and others at the order level, such as mites). Specimen captures and taxonomic groups diversity (determined by the Shannon index:  $H'$ ), show differences between the three areas of the cave. Thus, GT reaches 74,97% of the collected fauna, with 8.821 individuals and  $H'$  value of 1,46; GA 11,20%, with 1.324 specimens and  $H'$  value of 1,38 and GN 13,82%, with 1.631 individuals and  $H'$  of 1,51. GT possess an abundance of arthropods between five and almost seven times more than the other galleries. GA shows the least fauna and less diversity. It is remarkable that NG has small abundance but presents the greatest diversity of the cavity. The  $H'$  values are higher than those obtained in the previous study due to the increase in the number of taxa captured. In general, all values for Shannon index are less than 2, indicating ecosystems with low diversity, characteristic of cave environments. Geostatistical analysis has been carried out to combine the presence of entomofauna in the cave through the temporal variation of the number of captures in each trap. It shows the existence of five sites with greater abundance of specimens (three in GT and two in GN). Three of them are also points of maximum variation (two in GT and one in GN). On the other hand, the typology of some species, such as the phorid dipterans, suggest areas of connection with the outside in the GNs.*

**Keywords:** *arthropods, Nerja Cave, non-invasive traps, spatial distribution.*

## **Introducción**

La Cueva de Nerja se ubica en el municipio de Nerja, entre las faldas de la Sierra Almirajara y los Acantilados de Maro. Declarada Monumento Natural y Bien de Interés Cultural en 2006, alberga un yacimiento arqueológico de considerada relevancia en el Mediterráneo occidental. Es uno de los monumentos más visitados de España, con una afluencia de casi medio millón de personas al año. La cavidad en conjunto tiene 4.823 metros de desarrollo horizontal, contando la longitud de todas sus galerías, con una superficie de 35.000 m<sup>2</sup>, presentando una distancia lineal de 700 metros en una franja de 200 metros de ancho.

A efectos prácticos, la Cueva de Nerja se divide en tres tramos: Galerías Turísticas (GT), Galerías Altas (GA) y Galerías Nuevas (GN). De ellas, tan sólo es visitable la zona correspondiente a GT. Si situamos como cota  $\pm 0$  la entrada, se queda como plano más

bajo la Sala del Cataclismo (en GT) con una cota de -30,6 metros, siendo la Sala de la Montaña (en GN), con una cota de +38,67 metros, el plano más alto de la cavidad.

Las GT presentan luz artificial desde primera hora de la mañana hasta el cierre de la cueva por lo que una de las características más importante para el tipo de fauna existente en este tipo de hábitat, la ausencia de luz, está muy alterada. El resto de la cavidad, GA y GN, es un sector actualmente habilitado exclusivamente para investigadores. Aunque en estas salas también se ha dispuesto de luz artificial (por lo que la fauna de la zona también se puede ver afectada), su intensidad es bastante menor que en las GT y la actividad meramente puntual a lo largo del año. Además, se está procediendo a su desmantelamiento. Para conocer las variaciones abióticas de la cavidad, existen una serie de sensores en diferentes puntos que permiten registrar las condiciones ambientales y evaluar su variación en el tiempo.

Los primeros datos sobre la fauna de esta cavidad datan de inicios de los años 60 (Cobos, 1961), con algunas incursiones y publicaciones esporádicas durante los cuarenta años siguientes (Wallace, 1985). El primer estudio sistemático de la entomofauna en la cavidad se desarrolla en el bienio 2000-2001 (Del Rosal *et al.*, 2009). En estas prospecciones se recolectaron un total de 26 especies, de las cuales se describieron dos endemismos: el seudoescorpión *Chtonius nerjaensis* y el dipluro *Plusiocampa baetica*. Además, se proporcionan mapas con la distribución de estas especies a lo largo de la cueva, tanto en la zona turística como en las Galerías Altas y Nuevas. Por tanto, este estudio representa una buena base para evaluar, veinte años después, cuál ha sido la dinámica de la fauna de esta cavidad y su posible relación con las visitas y el cambio climático.

## Material y métodos

### *Toma de muestras*

Como ya se ha indicado, la Cueva de Nerja alberga un yacimiento arqueológico con evidencias de sociedades prehistóricas diseminadas por toda la cavidad. Esta circunstancia ha condicionado el trampeo mediante trampas de caída habitualmente empleadas en la prospección de fauna cavernícola; por lo que se han diseñado trampas específicas que no necesitan ser enterradas y no alteran la integridad del sustrato. Las hemos denominado trampas "tipo túmulo".

La recolección de fauna se ha realizado en el período comprendido desde julio de 2017 hasta julio de 2019, utilizando tanto captura directa (a vista) de algunos ejemplares, como trampeo sistemático bimestral. El empleo combinado de ambos métodos de captura, trampas y a vista, permite coleccionar un mayor espectro de especies (Balestra *et al.*, 2021). No obstante, ambos han de realizarse al mismo tiempo, pues hay especies depredadoras, como muchas arañas, que no caen en las trampas. Por el contrario, las trampas actúan durante más tiempo y en ausencia del recolector.

Las trampas tipo túbulo se han confeccionado con un embudo de poliuretano al que se le ha seccionado la porción estrecha para conferirle la forma de túbulo (figura 1). A este nivel se ancla una tapadera del vial recortada, que sirve de rosca, mediante sellado con silicona. En esta rosca se instala el vial de 100 ml. Como líquido de captura y conservante se ha empleado una solución compuesta por propilenglicol-cerveza en una proporción 4:1. El uso de este conservante se ha generalizado en los trampeos de fauna invertebrada. Tiene la ventaja de que no macera el material y lo preserva en óptimas condiciones incluso para posteriores estudios genéticos. Las trampas se han cebado con sobrasada, poniendo un soporte de alambre acerado en la trampa para sujetar el cebo suspendido, para evitar que los artrópodos puedan acceder físicamente al mismo, y se han dejado actuar durante dos meses. Se han dispuesto un total de 60 trampas repartidas por toda la cavidad, un tercio en la zona visitable (GT) y dos tercios en la zona no turística distanciadas unas de otras un mínimo de diez metros (20 en GT, 16 en GA y 24 en GN); excluyéndose las áreas de grandes caos de bloques de las GA y GN (figura 1). Todas las muestras se han procesado en el laboratorio de Entomología de la Universidad de Almería separándose los diferentes grupos taxonómicos y conservándose en alcohol a 700 para su posterior identificación taxonómica.



## Análisis de datos

Para el análisis espacial de la población de artrópodos y de su variación temporal en la Cueva de Nerja se ha empleado técnicas geoestadísticas de interpolación espacial mediante kriging (Gringarten y Deutsch, 2001) a partir del número de individuos recolectados en la red irregular de puntos/trampas de muestreo. La desviación típica en el número de capturas en cada punto de muestreo se ha utilizado como estadístico para delimitar las zonas de la cueva en función del mayor o menor grado de variación

temporal de las poblaciones de entomofauna. Dada la dirección preferencial, Sur-Norte, que marca el desarrollo la Cueva de Nerja, se ha optado por el uso de un único modelo de semivariograma lineal con pendiente unitaria y con ratio de 1,5 para la interpolación espacial iterativa, de forma que ésta se ajusta en gran medida a la distribución anisotrópica de la red de puntos de muestreo. En esta dirección de búsqueda de pares puntos, se ha establecido además una tolerancia angular de 85°, de forma que para el proceso iterativo de interpolación espacial de cada zona se engloban al mayor número posible de puntos de muestreo aledaños. En un análisis exploratorio inicial de los datos se observó una clara tendencia decreciente en el número de capturas desde la entrada turística, por lo que también se consideró una deriva lineal en la construcción del variograma que define la correlación espacial en el número de capturas. Para la interpolación espacial se estableció una red regular con una distancia media de 0,5 m entre nodos, consiguiendo así una resolución espacial óptima en la cartografía generada. Por último, en el modelo de interpolación creado se han impuesto barreras (*breakline* con valores cero para el número de capturas) para considerar las zonas no muestreadas al oeste de galerías nuevas.

La diversidad de los grupos taxonómicos se ha evaluado mediante el índice de Shannon (H').

## Resultados y discusión

Se han capturado 11.786 ejemplares de artrópodos. Una parte del material está aún en proceso de identificación específica, si bien se ha agrupado ya en 46 taxones (muchos insectos a nivel de especie, y otros a nivel de orden, como los ácaros). En la tabla 1 se indican el total de las capturas realizadas y su porcentaje para cada uno de los taxones diferenciados y en cada una de las galerías. La incidencia de fauna a lo largo de la cueva presenta diferencias muy marcadas. Las GT arrojan un total de 8.859 individuos, lo que representa casi el 75% de las capturas. Mientras que en las GA se han capturado 1.352 ejemplares y 1.639 en la GN, lo que representa aproximadamente el 11% y el 14% respectivamente.

Con relación a las categorías taxonómicas presentes en cada una de las galerías, se produce el mismo efecto, con porcentajes de 44, 17 y 14, respectivamente, para cada una de las galerías. Las GT son, con diferencia, las que presentan mayores registros de fauna, tanto cuantitativa como cualitativamente, siendo las otras dos zonas de la cavidad más similares. Este hecho ya se puso en evidencia en los muestreos realizados a inicio del siglo XXI (Del Rosal *et al.*, 2009), donde se apuntaba como origen a la gran disponibilidad de materia orgánica disponible a causa de las visitas. No obstante, existe otro factor determinante que condiciona directamente esta circunstancia, precisamente la conexión con el exterior. El análisis de las especies que aparecen en cada galería proporciona una información muy relevante sobre las condiciones ambientales particulares en éstas y confiere especial significación a la distribución y localización de determinados taxones. El 54% de los ejemplares capturados en las GT corresponden al psicóptero *Psyllipsocus ramburii* Selys-Longchamps, 1872 que constituye el 24% en GA y tan sólo el 1,16% en GN. Se trata de una especie domicola cosmopolita extremadamente variable

REINO	Clase/Subclase	Orden	Familia	Especie	GALERÍAS TURÍSTICAS		GALERÍAS ALTAS		GALERÍAS NUEVAS		TOTAL	
					T1, T43, T80	T2, T13, T87, T81	T16, T26	n	%	n	%	
					n	%	n	%	n	%	n	%
ARTHROPODA	ARACHNIDA/ACARI	ORIBATEA			674	7.61	13	0.98	0	0.07	693	5.60
		MEDICHOXATA			154	6.02	24	1.78	16	1.27	194	4.58
	ARACHNIDA	ARANEAE	Cribellidae	Cribellus sp.	1	0.01	1	0.07	0	0.00	2	0.04
			Phalangidae	Phalangis sp.	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01
			Parasitidae	Parasitus sp. 2	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01
	MOLUSCOSCOLOPEDIA	ONLIQANDA	Phalangidae	Coenobius gossuili	1	0.01	1	0.07	0	0	2	0.02
		Chironomidae	Chironomus nebulosus	20	0.14	0	0	0	0	20	0.08	
	CRUSTACEA	BOFOIDA	Amphipoda	Chironomus (Chironomus) brevis	0	0	0	0	0	0	0	0
			Chironomidae	Amphipoda (Chironomus) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01
			Amphipoda	Amphipoda (Chironomus) brevis	3	0.04	4	0.28	0	0	7	0.08
	CHILOPODA	SCUTICOCORPORA	Scolopendridae	Scolopendra cecidaria	48	0.54	19	1.74	0	0	67	0.49
		SPILURA	Carabidae	Muscolopoda brevis	11	0.13	0	0	0	0	11	0.11
	ESTOMINATA	POLYEMBOLA	Carabidae	Carabidae (Muscolopoda) brevis	16	0.18	18	1.5	119	7.48	153	1.13
			Embiopidae	Embiopidae (Muscolopoda) brevis	5	0.06	0	0	0	0	5	0.05
			Embiopidae	Embiopidae (Muscolopoda) brevis	8	0.09	2	0.15	205	11.54	215	1.62
	INSECTA	COLEOPTERA	Psephenidae	Psephenus (Psephenus) brevis	4	0.05	124	9.17	17	1.24	145	1.12
			Chironomidae	Chironomus (Chironomus) brevis	138	1.75	813	60.34	16	1.20	967	6.75
			Chironomidae	Chironomus (Chironomus) brevis	12	0.17	28	2.02	203	15	278	2.12
			Chironomidae	Chironomus (Chironomus) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01
Chironomidae			Chironomus (Chironomus) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01	
Chironomidae			Chironomus (Chironomus) brevis	5	0.06	0	0	0	0	5	0.04	
DIPTERA		Chironomidae	Chironomus (Chironomus) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01	
		Chironomidae	Chironomus (Chironomus) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01	
		Chironomidae	Chironomus (Chironomus) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01	
		Chironomidae	Chironomus (Chironomus) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01	
		Chironomidae	Chironomus (Chironomus) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01	
		Chironomidae	Chironomus (Chironomus) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01	
HYMENOPTERA	Formicidae	Formicidae (Formicidae) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01		
	Formicidae	Formicidae (Formicidae) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01		
LIPIDOPTERA	Lepidoptera	Lepidoptera (Lepidoptera) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01		
	Lepidoptera	Lepidoptera (Lepidoptera) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01		
TRICHOPTERA	Trichoptera	Trichoptera (Trichoptera) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01		
	Trichoptera	Trichoptera (Trichoptera) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01		
PSOCOPTERA	Psocoptera	Psocoptera (Psocoptera) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01		
	Psocoptera	Psocoptera (Psocoptera) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01		
ZEPHYPTERA	Zephyptera	Zephyptera (Zephyptera) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01		
	Zephyptera	Zephyptera (Zephyptera) brevis	1	0.01	0	0	0	0	1	0.01		
ANIMALIA	OLIGOCHEATA				0	0	18	1.07	8	0.07	26	0.18
					1850		1557		1079		4486	

Tabla 1. Total de capturas durante el periodo de muestreo para cada uno de los grupos taxonómicos.

y frecuente en ambientes cavernícolas (Baz, 2004). La mayoría de las capturas de esta especie están constituidas por hembras, lo que indica poblaciones partenogenéticas (Peck y Christiansen, 1990). Prefiere ambientes secos dentro de la cueva y se alimenta de restos orgánicos (Peck, 1995). Los ejemplares encontrados se corresponden con la forma troglodytes, que está adaptada a la vida troglófila. La segunda especie en importancia en GT es *Petaloptila malacitana* Barranco, 2010, donde representa algo más del 20%, descendiendo al casi el 6% en GA y tan sólo el 0,24% en GN. Se trata de una especie troglófila (Barranco y Molina-Pardo, 2021) endémica de cavidades malagueñas y que puede ser empleada como bioindicadora; su presencia en esta cavidad va a ser objeto de un estudio específico. El tercer grupo en importancia en estas galerías son los ácaros con 674 ejemplares (de los que ya se han diferenciado 13 morfotipos) que representan casi el 14% de las capturas. Estos arácnidos disminuyen su presencia en las otras dos zonas de la cavidad. Tanto en GA, como en GN, el grupo taxonómico más abundante son los colémbolos, que representan más del 50% de la fauna en ambas zonas, seguido del psicóptero antes mencionado en GA y de los dípteros fóridos en GN. Este último grupo,

también es un bioindicador de conexiones con el exterior. Los troglobios endémicos de la Cueva de Nerja como el dipluro *Plusiocampa baetica* Sendra, 2004 y el pseudoescorpión *Chthonius nerjensis* Carabajal, García y Rodríguez 2001 parecen distribuirse de forma opuesta en la cavidad. Así el primero aparece a lo largo de toda ella, si bien el mayor número de capturas se produce en GN, las galerías más profundas donde llega a representar casi el 20% de las capturas. Por el contrario, el pseudoescorpión solo se ha capturado en GT y con una representación de tan sólo 10 ejemplares (0,11%). Algo similar ocurre con el coleóptero *Platyderus speleus* Cobos, 1961 descrito de esta cavidad pero hoy día conocido de otras localidades del sur peninsular y no necesariamente en cavidades según Anichtchenko (2009), sólo aparece en las GT, en un número también bajo de individuos, 4. Aunque esta especie ya no sea por tanto endémica de esta cavidad y no mantenga el carácter troglóbico que en principio se le adjudicaba, llama la atención la existencia exclusiva de *Chthonius nerjensis* y *Platyderus speleus* en las GT y no en el conjunto de la cavidad, como ocurre con *Plusiocampa baetica* y *Petaloptila malacitana*.

En la figura 2 se han representado sobre el perfil de la planta topográfica, las capturas acumuladas a lo largo de toda la cavidad en relación con la situación de los puntos de muestreo. La gráfica en la parte inferior de la figura, indica los valores de captura acordes con la distribución lineal de las trampas. Los picos corresponden a las capturas en cada una de las trampas. El máximo valor de capturas se produce en la zona de entrada de la cavidad, en las trampas colocadas al inicio de la zona de acceso, a nivel del punto de muestreo 58 y también en los dos más próximos (trampas 59 y 60). En esta zona los valores de captura oscilan entre 900 y 1000 ejemplares. A nivel del punto 48 existe también un máximo en la Sala denominada "Fantasmas", con unos valores que oscilan entre 400 y 500 individuos capturados. El tercer máximo en las GT se localiza a nivel de la

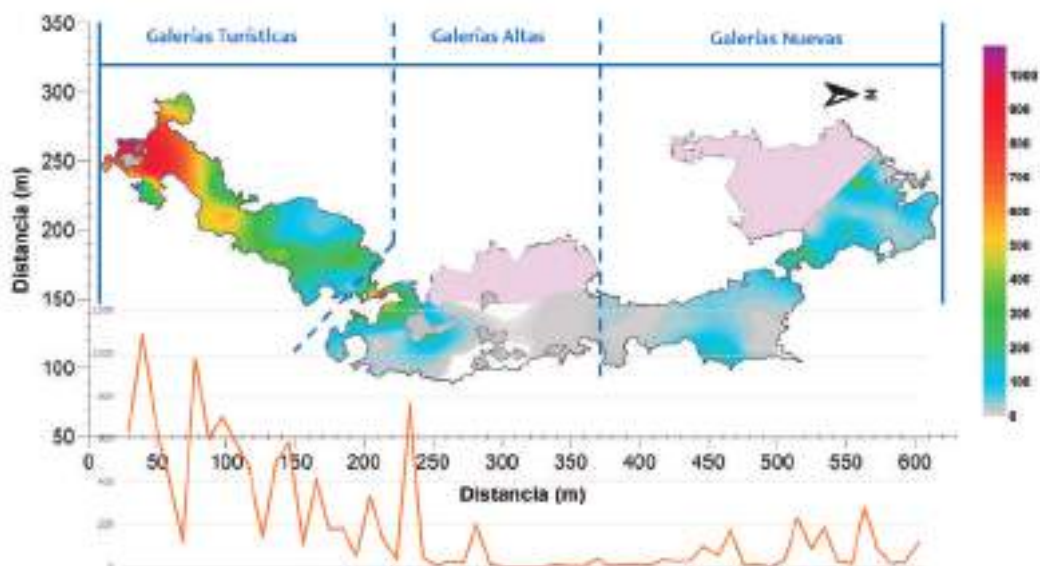


Figura 2. Distribución espacial de las capturas en la cavidad y capturas acumuladas a lo largo de las trampas.

trampa 41. La zona de transición entre las GT y GA es una zona de acumulación de fauna, en la zona denominada "luz roja" que es donde se ha ubicado el punto 2, con valores también muy elevados, 700-800 ejemplares y que se extiende hasta el punto 6. A partir de ahí, en la mayor parte de las GA y hasta la mitad de las GN la abundancia de fauna es muy escasa, esta zona denominada "Sala de la Inmensidad" aparece como un enorme vacío. Hacia el segundo tercio y última sala de GN, aparecen tres picos de acumulación de individuos, destacando un máximo en la zona que conecta la "Sala de la Lanza" con la "Sala de Montaña", donde se produce una acumulación de individuos que oscila 200-300 individuos y otro al final de esta gran sala, con una acumulación que oscila entre los 300 y 400 ejemplares.

La figura 3 ilustra las zonas de mayor variación faunística en la cavidad. Se han detectado tres lugares que corresponden a los de máxima variación y que coinciden con algunos de los sitios de máxima abundancia. La zona con la máxima variación corresponde a la zona de entrada a la cueva, en este punto se produce un gran flujo de fauna. El segundo lugar con mayor variación temporal se localiza en el mencionado "luz roja", la zona de acceso de las GT a GA. El tercer punto de mayor variación se localiza al fondo de las GN, coincidiendo con el pico correspondiente al fondo de la "Sala de Montaña", donde el valor de la variación de ejemplares es de 60-80 individuos. Estos tres lugares señalados de máxima variación deben indicar puntos de flujo de fauna. Las especies que ocasionan estas dinámicas locales son diferentes según la zona, en general son *Psyllipsocus ramburii* y *Petaloptila malacitana* en los dos primeros casos y *Lepidocyrtus flexicollis* en el tercero. Estas tres especies presentan un comportamiento troglófilo en la cavidad. Por lo general, la fauna de las cuevas es escasa salvo cuando existe aporte de nutrientes. Así, las cavidades que poseen colonias de murciélagos, presentan zonas de enorme abundancia siempre que estas colonias se mantengan en el tiempo. En la Cueva de Nerja no existen actualmente grandes aglomeraciones de estos mamíferos, aunque hay restos de acumulación de guano antiguo en algunos lugares de la cavidad, pero que

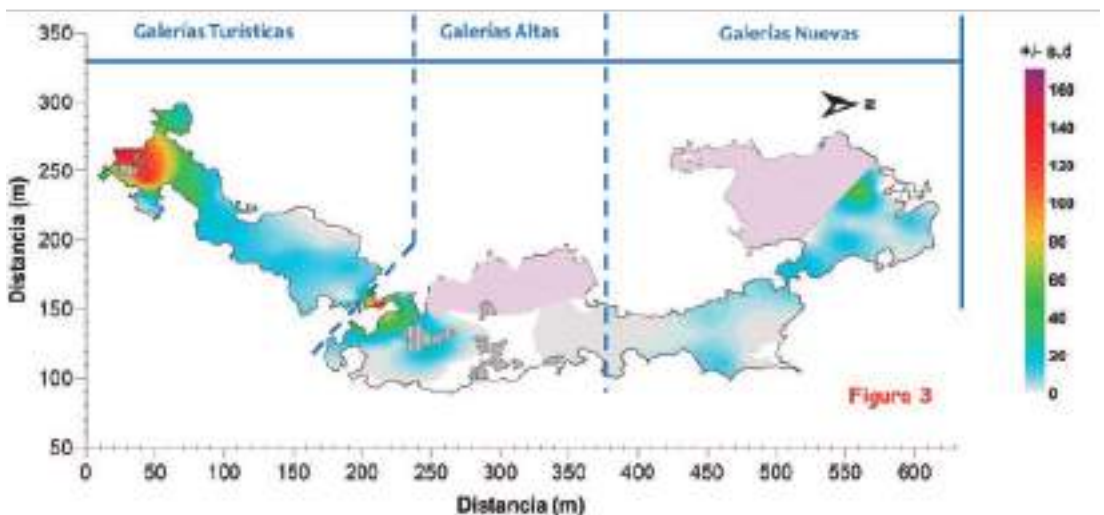


Figura 3. Variación temporal del total de las capturas en la cavidad



no presentan acumulación profusa de fauna, probablemente debido a la pérdida de nutrientes con el paso del tiempo.

Cuando se comenzó el muestreo sistemático bimestral mediante las trampas de caída tipo túmulo, durante los dos primeros muestreos no se produjeron apenas capturas. Éstas comenzaron a partir del tercero y se han mantenido de forma regular y más o menos constante hasta el final del periodo de muestreo el segundo año. Esta circunstancia se ha interpretado como que es necesario un periodo de naturalización de estas estructuras con el entorno. De igual modo no se ha podido determinar una correlación fenológica general del periodo de muestreo con las capturas. Así, los máximos y mínimos de capturas para las diferentes galerías no han sido coincidentes y han fluctuado de forma diferentes en las tres áreas de la cavidad.

En este estudio, como ya se realizó en la primera aproximación faunística de la cavidad (Del Rosal *et al.*, 2009), se ha evaluado la diversidad mediante el índice de Shannon ( $H'$ ) para cada una de las salas. Este índice pondera el número de especies presentes en cada zona con respecto al total de las encontradas en la cavidad. Se ha determinado  $H'$  utilizando las diferentes categorías taxonómicas que se han establecido hasta el momento. Se han evidenciado diferencias de diversidad entre las tres zonas de la cueva. Así, GT han arrojado el 74,97% de la fauna colectada con 8.821 individuos y un valor de  $H'$  de 1,46, GA 1.324 ejemplares (11,20%) con un valor de  $H'$  de 1,38 y GN con 1.631 (13,82%) y  $H'$  de 1,51. Las GT poseen una abundancia de artrópodos entre cinco y casi siete veces más que las otras galerías. Las GA son la que menos fauna poseen y también menos diversidad. Es llamativo, que las GN, con una abundancia pequeña, presentan la mayor diversidad de la cavidad. Los valores de  $H'$  son superiores a los obtenidos en el estudio anterior debido al incremento en el número de taxones capturados. Los valores definitivos de diversidad se obtendrán una vez que el material pendiente de identificación a nivel específico sea completado. Como ya se ha apuntado, hasta el momento se han caracterizado unos trece morfotipos de ácaros, por lo que este grupo va a ser determinante en el conjunto de la diversidad final de la cavidad. En general, todos los valores del índice de Shannon son inferiores a dos, lo que indica ecosistemas con una diversidad baja, característico de ambientes cavernícolas. También de forma general los índices de diversidad en las cavidades suelen ser mayores en la zona de entrada e inferiores en las zonas profundas (Balestra *et al.*, 2021).

## Conclusiones

Queda patente la altísima abundancia de las galerías turísticas con respecto al resto de la cavidad, debida a la materia orgánica procedente de las visitas, a la conexión con el exterior y, probablemente, a la construcción de un acceso permanente.

Los ácaros representan un grupo taxonómico de importancia cuya identificación a nivel específico puede suponer una variación del índice de Shannon en las tres galerías de la cavidad.

Algunas de las especies detectadas en Galerías Nuevas pueden ser bioindicadores de una conexión al exterior, como son los dípteros fóridos y el grillo *Petaloptila malacitana*.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Fundación Cueva de Nerja la financiación de los muestreos para la realización de este estudio durante el trienio 2017-2019.

## Referencias

- Anichtchenko, A. (2009). Redescrición de *Platyderus speleus* Cobos, 1961 (Coleoptera, Carabidae) y propuesta de nuevas sinonimias. *Arquivos entomológicos*, 2: 33-37.
- Balestra, V., Lana, E., Carbone, C., De Waele, J., Manenti, R., Galli, L. (2021). Don't forget the vertical dimension: assessment of distributional dynamics of cave-dwelling invertebrates in both ground and parietal microhabitats. *Subterranean Biology*, 40: 43-63.
- Barranco, P., Mayoral, J.G., Ruiz-Portero, C., Amate, J., García-Pardo, J., Piquer, M., Ortega, D., Salavert, V., Ruiz Avilés, F., Lara, M.D., Tinaut, A. (2004). Fauna endokárstica andaluza. En B. Andreo y J.J. Durán (Eds.): Investigaciones en sistemas kársticos españoles. Editorial: Instituto Geológico y Minero de España. *Serie Hidrogeología y Aguas subterráneas*, 12. I.S.B.N.: 84-7840-551-8, pp. 351-366. Madrid.
- Barranco, P., Molina-Pardo, J.L. (2021). Cuticular structures in micropterous crickets (Orthoptera, Gryllidae, Gryllomorphae, Petaloptilini, Gryllomorphiini). *Insects*, 12, 708, 1-21.
- Baz, A. (2004). Catálogo provisional de los Psocópteros de Andalucía. *Boletín Asociación española de Entomología*, 27: 13-39.
- Cobos, A. (1961). Exploración entomológica a la cueva de Nerja (Málaga). Consejo Superior de Investigaciones Científicas. *EOS*, 37: 125-133.
- Del Rosal Padial, Y., Lara Ojeda, M.D., Tinaut Ranera, J.A., Garrido Luque, A. (2009). La entomofauna de la Cueva de Nerja (Málaga). En: *Juan José Durán Valsero y Jerónimo López Martínez (Eds.), Cuevas turísticas: cuevas vivas*. ISBN 978-84-613-3730-9, pp. 91-100. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. Madrid.
- Gringarten, E., Deutsch, C.V. (2001). Teacher's aide: Variogram Interpretation and Modeling. *Mathematical Geology*, 33 (4): 507-534.
- Peck, S. B. (1995). The cave fauna of Alabama. Part II: The Insects., *NSS Bull.*, 57: 1-19.
- Peck, S. B., Christiansen, K. (1990). Evolution and zoogeography of the invertebrate cave faunas of the Driftless Area of the Upper Mississippi River Valley of Iowa, Minnesota, Wisconsin, and Illinois, U.S.A. *Can. J. Zool.*, 68: 73-88.
- Wallace Moreno, M. (1985). *Estudio de la fauna cavernícola de la Cueva de Nerja*. En Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad de Excursionistas de Málaga (eds.) Málaga: La Cueva de Nerja: 28-35.

# Comment réaliser un projet parfait dans une grotte touristique?

Alexander CHRAPKO <sup>(1)</sup>, Michel RENDA <sup>(2)</sup>

(1) Directeur Général de la Société Cave Lighting. ac@cavelighting.de

(2) Chef de projet Cave Lighting (France, Espagne, Italie et Portugal). mr@cavelighting.de

---

## Resumen

### ¿Cómo hacer un proyecto perfecto en una cueva turística?

Cave Lighting, con sede en Herborn (Hessen), es una empresa derivada del proyecto "Cave LightingTM " de GermTec GmbH & Co KG. La empresa se fundó en 2006. Tras visitar una cueva turística en el sur de Alemania, dos espeleólogos tuvieron la idea de desarrollar y utilizar una iluminación nueva y exclusiva para estas cuevas. Los fundadores de Cave Lighting, como espeleólogos, conocían muy bien el mundo subterráneo, pero no tenían casi idea de cómo eran las cuevas turísticas. El diseño de la iluminación llevó 3 años y a finales de 2008 se instaló la primera variante de la instalación de Cave Lighting, pero el estudio del mundo de las cuevas abiertas al público llevó mucho más tiempo y continúa hasta hoy. En los últimos 16 años Cave Lighting ha podido adquirir mucha experiencia y mejorar constantemente. Lo que nos distingue de nuestros competidores es la alta calidad de nuestros productos, una fuerte orientación al cliente y un alto grado de flexibilidad para satisfacer sus necesidades.

**Palabras clave:** cuevas turísticas, iluminación, lampenflora

### ***How to make a perfect project in a show cave?***

#### ***Abstract***

*Cave Lighting, based in Herborn (Hesse), is a spin-off of the "Cave LightingTM" project of GermTec GmbH & Co KG. The company was founded in 2006. After visiting a tourist cave in southern Germany, two cavers had the idea to develop and use a new and exclusive lighting for these caves. The founders of Cave Lighting, as cavers, knew the underground world very well, but had almost no idea what tourist caves were. The design of the lighting took 3 years and at the end of 2008 the first variant of the Cave Lighting installation was installed, but the study of the cave world receiving the public took much longer and is still going on to this day. During the last sixteen years Cave Lighting has been able to gain a lot of experience and constantly improve. What distinguishes us from our competitors is the high quality of our products, a strong customer orientation and a great flexibility to meet their needs*

**Keywords:** *lighting, show caves, lampenflora*

## **Grottes touristiques et congrès, organisations**

Cave Lighting Team a rapidement constaté que pour réaliser un projet dans les grottes, il faut comprendre les grottes, c'est-à-dire leur organisation, leur structure, leur gestion et leurs besoins. Ces informations n'ont été décrites nulle part et ne peuvent être obtenues qu'en visitant les grottes et en discutant avec la direction et le personnel.

Ainsi, en 16 ans, l'équipe Cave Lighting a installé son système d'éclairage dans plus de 100 grottes de 30 pays du monde. En outre, nous avons effectué des démonstrations d'éclairage dans pratiquement toutes les grottes et avons conseillé leurs responsables en matière d'éclairage LED et de solutions possibles.

Au fil des ans, Cave Lighting a su former et s'entourer d'équipes compétentes composées de spéléologues confirmés, de spécialistes de l'éclairage des grottes et de scénographes pour le côté artistique.

En étant présent à de nombreux congrès à travers le monde, Cave Lighting a pu être au plus proche des gestionnaires de sites souterrains touristiques et ainsi prendre connaissance de la problématique et des difficultés spécifiques qu'ils rencontrent.

Cave Lighting est aussi à l'initiative de congrès (Grotte de Han/Lesse, Belgique ect.) avec chaque fois des thématiques différentes liées à l'univers des grottes recevant du public.



*Figure 1. Cave Lighting team*



*Figure 2. Lampenflora dans une grotte du sud de l'Europe.*

C'est à partir de ce pool d'informations qu'est née la base de compétences de Cave Lighting, dont aucune autre entreprise au monde ne peut se prévaloir.

## **Projets réalisés**

100 grottes éclairées par CL dans 30 pays différents et des projets à venir.

Avec plus de 100 grottes touristiques éclairées dans le monde, CL a rencontré presque tous les problèmes auxquels ces lieux sensibles et extrêmes sont confrontés : humidité, inondations, etc. Grâce à cette expérience, CL est en mesure de proposer des solutions.

Aujourd'hui, tous ces projets témoignent de la qualité et de la durabilité des produits et services de Cave Lighting CL. Nous sommes particulièrement fiers de l'étendue de notre service : assistance au client, installation et suivi du client une fois le projet terminé.

## **Quels sont les problèmes et quelles solutions y apporter?**

*Lampenflora. Considérations sur les nouvelles techniques d'éclairage.*

Les grottes étant naturellement plongées dans l'obscurité totale, les organismes qui peuplent les écosystèmes des grottes ont évolué de manière à prospérer dans l'obscurité

totale. Par conséquent, tout éclairage artificiel, quel qu'il soit, constitue une nuisance du point de vue de l'écosystème. L'éclairage artificiel entraîne la croissance d'une flore invasive opportuniste (lampenflora) au détriment du biotope naturel de la grotte. Des organismes tels que les cyanobactéries, les algues et les bryophytes (mousses) parviennent donc à se développer dans des endroits où ils ne pourraient pas apparaître naturellement. Cela a pour effet d'évincer la microfaune naturelle de la grotte. Notre proposition présente plusieurs points forts, tels que:

- L'éclairage général est minimal et parfaitement orienté.

Grâce à la gestion par section, les lampes ne s'allument que lorsque les groupes de visiteurs passent. Le système de gestion permet de contrôler (allumer/éteindre/varier) différentes sections à l'aide de boutons-poussoirs ou de télécommandes, de sorte que seule la zone où se trouve le groupe est éclairée. La sélection des luminaires par adressage et la focalisation de la lumière par des lentilles optiques permettent d'éclairer uniquement les éléments présentant les caractéristiques les plus visibles, le reste de la grotte restant dans l'obscurité.

Cela met encore plus en valeur la beauté de chaque formation tout en minimisant le temps d'éclairage total.

Le chemin de visite est balisé par des lampes de secours à faible intensité lumineuse, placées à faible hauteur ou sur les mains courantes.

La répétition régulière de ces petits luminaires permet d'éviter l'utilisation d'éclairages de secours ponctuels d'une puissance lumineuse plus élevée et garantit un cheminement sûr en cas de panne de courant.

Dans ce cas, l'intensité de la lumière émise à la surface des parois de la grotte peut être maintenue en dessous du seuil où la flore envahissante se développe.

- La chaleur dégagée par l'éclairage est contenue:

Les lampes LED ont une puissance électrique beaucoup plus faible que les lampes traditionnelles, ce qui entraîne un dégagement de chaleur moins important et un éclairage plus ciblé.

Leur utilisation, qui se fait en outre sur demande, permet donc de ne pas augmenter la température à leur proximité ou dans le faisceau.

Les éventuels dépôts parasitaires sont donc fortement réduits.

- La longueur d'onde de la lumière est maîtrisée :

Une stratégie pour limiter la croissance des organismes photosynthétiques opportunistes consiste à éclairer la grotte avec des longueurs d'onde qui ne sont que très peu absorbées par la chlorophylle.

Les variantes de la chlorophylle, que l'on trouve surtout dans les plantes de surface, les mousses, les algues et les cyanobactéries, absorbent la lumière rouge et bleue et seulement faiblement la lumière jaune.

Dans la mesure du possible, si la pigmentation naturelle des murs la rend intéressante, il faut donc privilégier la lumière jaune.

Comme une lumière plus blanche favorisera toujours la croissance de la flore, on ne peut pas considérer la LED comme la panacée à cet égard.

Néanmoins, compte tenu des contraintes liées aux autres technologies alternatives possibles, les LED sont actuellement considérées comme la meilleure solution pour les grottes qui sont déjà éclairées artificiellement.

Nous proposons de remplacer toutes les sources lumineuses existantes par des éclairages LED.

Les LED (Light Emitting Diode ou diode électroluminescente) présentent des caractéristiques (chaleur quasi nulle, absence de rayonnement UV et IR, entre autres) qui les recommandent comme la meilleure solution pour l'éclairage dans les grottes, tant du point de vue écologique que du point de vue de la valorisation.

De plus, cette technologie se prête parfaitement à une gestion performante (allumage/extinction/gradation) et permet d'obtenir une large palette de blancs et de teintes.

La modernisation du système d'éclairage et la sécurisation de la grotte mettront clairement en valeur les beautés de la grotte et amélioreront considérablement la qualité de la visite. Le tout contribuera également à préserver les formations de la grotte. L'accent sera également mis sur la faune qui y vit.

### *Consommation d'énergie et coût d'entretien*

Une grande partie des grottes touristiques dans le monde se sont ouvertes au public au siècle dernier. Elles ont changé plusieurs fois leur système d'éclairage au fur et à mesure des progrès, mais la plupart d'entre elles n'ont pas encore optées pour les nouvelles technologies de cette dernière décennie.

Les éclairages incandescents dont elles sont équipées consomment énormément d'énergie et produisent énormément de chaleur. Dans le contexte actuel de dérèglement climatique de recherche d'économie d'énergie et de protection de l'environnement, cela représente une aberration.



Figure 3. Cheminement en FRP (Fibre Plastique Renforcée) grotte de Herbstlabyrinth Allemagne)

En outre, ces anciennes lampes à incandescence, très fragiles, peu étanches, ont besoins d'être renouvelées très souvent engendrant des coûts supplémentaires en achat et maintenance.

- Solution: les lampes LED

Ces deux dernières décennies l'apparition des lampes LED représente une révolution dans l'éclairage en général et particulièrement dans les grottes.

Les lampes LED ont la particularité de pouvoir être allumées et éteintes instantanément, et ce des centaines de milliers de fois sans dommage.

Elles permettent également une gradation facile, si nécessaire.

Elles ne peuvent donc être utilisées que lorsque cela le justifie, en adaptant leurs performances.

Les temps d'allumage sont limités, ce qui, outre leur faible consommation, en fait un bon choix en termes d'économie d'énergie. Leur durée de vie est très élevée (50 000 heures), surtout dans les endroits où la température est constamment basse, ce qui est le cas dans les grottes.

Les coûts d'entretien et de remplacement sont donc très faibles et, de facto, économiques.

### *Gestion de l'éclairage. Confort des visiteurs*

Les lampes d'ancienne génération n'étaient pas conçues pour être programmées, et la plupart du temps installées trop près des parois ce qui favorisait le développement de la lampenflora. Leur puissance était exagérée, le but étant de donner un maximum de



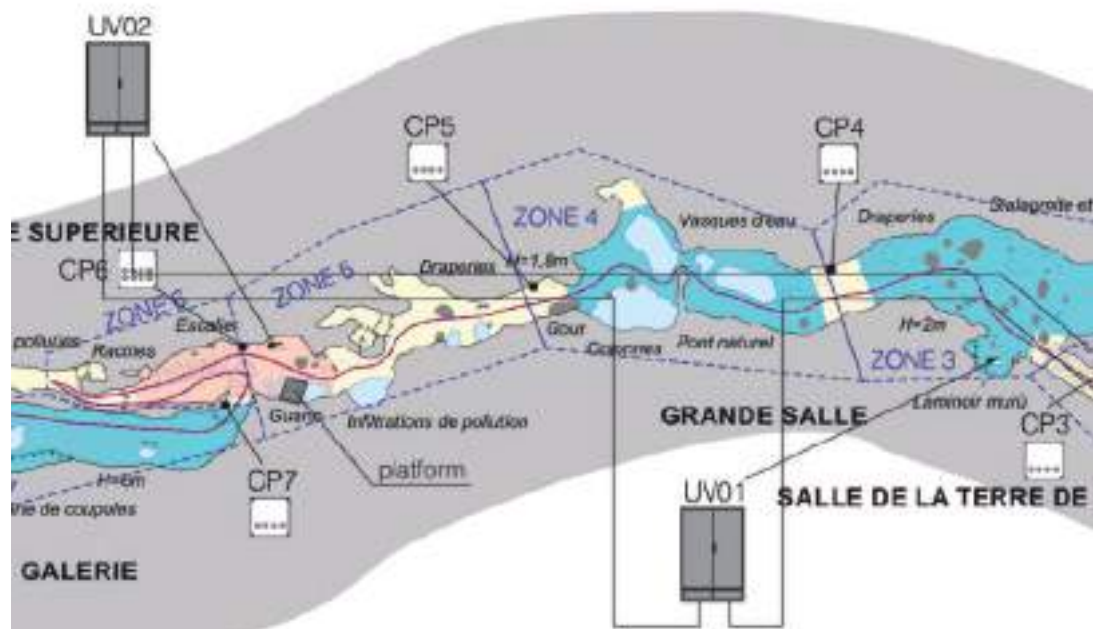


Figure 4. Organisation des zones d'éclairage; grotte de Domme (France).

lumière. Cette technique allait à l'encontre du confort du visiteur qui dans bien des cas avait une gêne lumineuse. Le manque de possibilité de gestion de ces éclairages hormis par des protocoles comme DMX, faisait qu'elles restaient allumées toute la journée.

- Solution: la gestion de l'éclairage

Avec la nouvelle technologie la gestion de l'éclairage est rendue possible lampe par lampe. Elle permet de redonner au site un aspect plus attractif pour le visiteur, de le plonger dans une ambiance plus caverneuse. La position et la puissance ajustée des éclairages vont contribuer au confort des visiteurs qui ne seront nullement éblouis.

### *Sécurité des visiteurs*

La plupart du temps, les grottes sont trop éclairées et le cheminement reste dans l'obscurité, provoquant une gêne importante pour les visiteurs, leurs yeux ayant du mal à s'adapter aux changements brusques d'intensité. Par ailleurs, en cas de coupure de courant ceux-ci restent dans le noir.

- Solution: l'éclairage

L'éclairage de secours doit être assuré afin de permettre l'évacuation, en toute sécurité, des visiteurs en dehors de la grotte en cas de coupure de courant.

Les exigences sont les suivantes :

Des alimentations de secours (indépendantes) placées dans les coffrets électriques fournissent pendant 60 minutes (ou plus si besoin) une source d'énergie.

Cette source alimente l'éclairage de balisage et/ou de secours

Ce système doit être résistant à l'eau et à humidité (minimum IP67) Ce système peut également être redondant.

Ce système ne peut-être rajouté par la suite, il doit être défini lors de la phase de définition de l'installation.

- Les projets comprennent:

L'évaluation de la localisation.

L'amélioration de la sécurité du parcours des visiteurs tout en respectant les mesures de conservation.

L'amélioration de la protection de la grotte et de son patrimoine.

La mise en valeur des beautés de la grotte et l'élaboration de "spectacles" visuels et audiovisuels.

Outre la sécurisation du site, l'objectif principal sera de le rendre plus attractif pour les touristes et d'augmenter l'offre culturelle.

La réalisation du plan de la grotte avec la disposition des tableaux électriques, la définition des zones d'éclairage

Le concept de la visite axée sur les zones les plus remarquables

La définition des spécificités qui doivent être mises en lumière séparément,

Le choix du type de visite : avec un guide avec ou sans audioguide pour les étrangers, sans guide avec ou sans audioguide, ou les trois avec disposition saisonnière.

- Une fois les décisions prises, CL peut commencer par:

L'Installation d'un système d'éclairage LED qui va réduire jusqu'à 80% la facture d'énergie

Installation en basse tension (24 V) pour la sécurité des visiteurs

La gestion de l'éclairage grâce à un protocole de gestion spécialement conçu pour les environnements extrêmes comme les grottes

La mise en valeur de la grotte par des éclairages adéquats (puissance, température de couleur, angle de diffusion de la lumière etc)

Rendre la visite le plus confortable et la plus sécurisante possible pour les visiteurs en faisant en sorte que le cheminement soit suffisamment éclairé, mais pas trop pour ne pas dégrader l'éclairage de la grotte,



*Figure 5. Ambiance Lumineuse grotte de Domme (France).*

Faire en sorte que le visiteur ne soit ébloui par aucun point lumineux, que ce soit dans la sens de la visite ou à contre sens.

Protection et respect de la grotte et de son environnement.

Forte réduction de la lampenflora grâce à un positionnement judicieux des luminaires, à une gestion cohérente des zones à éclairer, et à la gestion des groupes de visiteurs

CL va s'employer à réduire au maximum l'impact de l'installation en cachant au maximum les armoires électriques, les câbles, et autant que possible, les luminaires.

### *Fibre optique et monitoring*

L'installation de la fibre optique, dès le début du projet peut-être un élément important pour la gestion de la lumière

Via le réseau fibre optique, différents paramètres internes à la grotte pourraient également être supervisés.

Ces paramètres sont les suivants: température, humidité, niveau d'eau, vitesse de l'air, porte d'accès ouverte etc.

## **Conclusion**

La flore lampante est et restera un problème récurrent si les mesures proposées ne sont pas mises en œuvre.

Mesures importantes pour éviter la flore de la lampe

Réduction de l'intensité lumineuse (par exemple : par un éclairage LED réglable en continu). Réduction la durée totale de l'éclairage. La lumière ne devrait être allumée que lorsque des visiteurs sont présents. Les zones sensibles ne devraient pas être éclairées du tout ou seulement localement (commutation locale).

Distinguer l'éclairage de la grotte (pour augmenter l'attractivité) de l'éclairage du sentier (pour des raisons de sécurité) afin d'éviter un éclairage excessif dans la grotte exploitée.

Subdivision de la grotte en différentes zones d'éclairage en fonction de la visite guidée. Unité centrale pour la commande et la surveillance de l'éclairage.

La distance entre le luminaire et l'objet éclairé doit être suffisamment grande (2 m). Sélection d'optiques appropriées avec des LED.

Planification de l'éclairage par un expert pour éviter la lampenflora.

Moyens de collecte et d'évacuation de l'eau de nettoyage

En ce qui concerne la construction des grilles : l'accumulation de particules de saleté et la contamination ultérieure par les visiteurs peuvent être évitées en plaçant des couvertures de protection (bâches) sous les sentiers et en les nettoyant régulièrement.

Former les guides à l'utilisation du système d'éclairage afin de s'assurer que les options de commutation sont réellement utilisées.

Élimination écologique de lampenflora (un avis d'expert biospécifique doit être obtenu au préalable).

## References

- Heil, O., Chrapko, A.. Lampenflora dans les grottes aménagées. [www.cavelighting.de](http://www.cavelighting.de).  
Vashkevich V. (2017). Technical Aspects Regarding the Equipment of Show Caves with Modern LED Systems. LED Professional, 59  
Middleton, G. (2017). Cave Lighting Workshop, Grottes de Han, Belgium. ACKMA Journal, 114.

# Mapas y cortes geomorfológicos, elementos clave de la divulgación geológica en cuevas turísticas

Sergio Raúl DURÁN LAFORET <sup>(1)</sup>, Juan José DURÁN VALSERO <sup>(2)</sup>,  
Raquel MORALES GARCÍA <sup>(2)</sup>, Pedro Agustín ROBLEDÓ ARDILA <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA), Edificio de Investigación Ada Byron, Arquitecto Francisco Peñalosa, 18, 29010, Málaga. sduran@uma.es

<sup>(2)</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Calle Ríos Rosas 23, 28003, Madrid. jj.duran@igme.es, r.morales@igme.es

<sup>(3)</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Administración Periférica del Estado, Carrer de Felicià Fuster, 7. 07006, Palma de Mallorca. pa.robledo@igme.es

---

## Resumen

Una pieza fundamental de la divulgación geológica realizada en cuevas turísticas es la explicación de la espeleogénesis (formación de la cavidad), así como la ordenación espaciotemporal de los elementos arquitectónicos que las componen, tales como espeleotemas, rellenos detríticos o las propias morfologías erosivas que presentan los techos y las paredes de las salas y galerías de las cuevas. El modelo de "visita escénica", desarrollado durante décadas y mantenido hasta la actualidad presenta ciertas limitaciones a la hora de presentar conceptos espaciotemporales con rigurosidad científica ya que, normalmente, se realiza empleando como vector de comunicación únicamente algunos elementos singulares de las cuevas. Las cuevas han sido testigo de relaciones desde los albores de la humanidad, con numerosos cambios a lo largo de la historia. El turismo subterráneo ha evolucionado coherentemente y, aun así, continúa creciendo y evolucionando. En el marco del turismo subterráneo del siglo XXI, y de acuerdo con el paradigma del turismo sostenible, que tiene por base las experiencias, la tecnología, la investigación científica, la conservación del patrimonio, la educación y la divulgación, en este trabajo se presentan una serie de ejemplos de mapas y cortes geomorfológicos, realizados en distintas cavidades repartidas a lo largo de la geografía española. En estos ejemplos se han tratado de representar los sucesivos episodios de disolución, de precipitación y de sedimentación que caracterizan los paisajes endokársticos, de forma que se puedan diferenciar, ordenar y entender dichos procesos, y a su vez, emplearlos como elementos clave en la divulgación. Mediante el uso de los cortes geomorfológicos, es posible identificar con precisión los elementos geológicos presentes en el interior de las cuevas, representativos de dichos procesos geológicos, para, en consecuencia, exponer esta información de manera asequible a las personas que realicen la visita a las cavidades turísticas.

**Palabras Clave:** cortes geomorfológicos, divulgación científica, endokarst, espeleogénesis, geomorfología.

## **Geomorphological maps and cross-sections, key elements of geological divulgation in show caves**

### **Abstract**

*A key part of the geological divulgation carried out in show caves is the explanation of the speleogenesis (formation of the cave), as well as the chronological spatial and temporal ordering of the architectural elements that cover the caves, such as speleothems, detrital sediments, or the erosive morphologies themselves that are present in the ceilings and walls of the halls and galleries of the caves. The "scenic visit" model, developed for decades and continued up to now presents some limitations when introducing spatial and temporal concepts with scientific rigour, that is a consequence of only using the architectural elements of the caves as a communication vector. Caves have witnessed cultural relationships ever since the dawn of humanity, and the relationship with caves and humans has experienced uncountable changes throughout history. Underground tourism has consequently evolved, and it is still growing and evolving. In the framework of the underground tourism of the 21st century, and the sustainable tourism, that has as foundation experiences, technology, scientific investigation, heritage conservation, education, and divulgation; in this work a series of geomorphologic maps and sections are presented, carried out in several caves scattered throughout the Spanish geography. In these examples, the sequential episodes of dissolution, precipitation and sedimentation that characterise karstic landscapes is represented. This way, those processes can be separated and ordered, and consequently, used as key elements in the scientific divulgation. Through the use of these geomorphological sections, it is possible to identify precisely the elements located inside of caves that best represent those dissolution and precipitation processes so that, consequently, that information can be properly explained to the people that visit the caves.*

**Keywords:** *endokarst, geomorphologic sections, geomorphology, scientific divulgation, speleogenesis.*

### **Introducción**

El estudio de las morfologías presentes en ambientes kársticos, tanto superficiales como subterráneos, es complejo. El karst en general presenta una gran heterogeneidad de formas y de procesos geológicos. Además, las formas del relieve kárstico se presentan tanto en superficie (morfologías exokársticas), como en profundidad (morfologías endokársticas), muchas veces estrechamente interrelacionadas. Las formas exokársticas suelen ser más fácilmente identificables, al estar en superficie, ya sea por métodos de teledetección (Pardo *et al.*, 2014), o mediante observación directa de las mismas, utilizando las técnicas clásicas de la geomorfología kárstica.

Sin embargo, la caracterización de las morfologías endokársticas es más complicada, y, por tanto, su estudio, es más difícil. Esto es debido a varios factores, entre ellos, la limitada accesibilidad del medio subterráneo. Las formas endokársticas son el resultado

de la sucesión temporal de procesos erosivos y deposicionales en el subsuelo kárstico, dando lugar a la arquitectura que define el modelado actual de una cavidad natural.

Estos procesos que conforman los paisajes endokársticos son complejos y deben ser estudiados y ordenados en el tiempo, estableciendo una secuencia evolutiva para el correcto entendimiento de su geomorfología. Unas de las herramientas más útiles para la representación de estos elementos son los mapas y los cortes geomorfológicos.

## ¿Qué son los cortes y mapas geomorfológicos?

Los estudios geomorfológicos se sirven como herramientas básicas de dos elementos: los mapas geomorfológicos y los cortes geomorfológicos. Un mapa geomorfológico de una cueva es una cartografía bidimensional que recoge en la planta topográfica la ubicación de los distintos elementos, naturales y antrópicos presentes en la cavidad. Por lo general, los mapas geomorfológicos son escasos en las cuevas turísticas, y suelen ser realizados con fines de investigación, más que divulgativos. Existen algunos ejemplos en la literatura científica de mapas geomorfológicos en cavidades turísticas españolas (Arrese González, 2009; Jiménez-Sánchez *et al.*, 2004).

Por otro lado, un corte geomorfológico es una representación de un espacio tridimensional en uno de dos dimensiones. Se podría considerar como la síntesis de un corte geológico tradicional y de una sección espeleológica. Un corte geomorfológico se representa en un plano vertical que atraviesa un espacio subterráneo natural, accesible al ser humano.

Normalmente, se llevan a cabo aprovechando las secciones espeleológicas preexistentes, que se realizan perpendiculares a la dirección principal de la cavidad. Aquellas

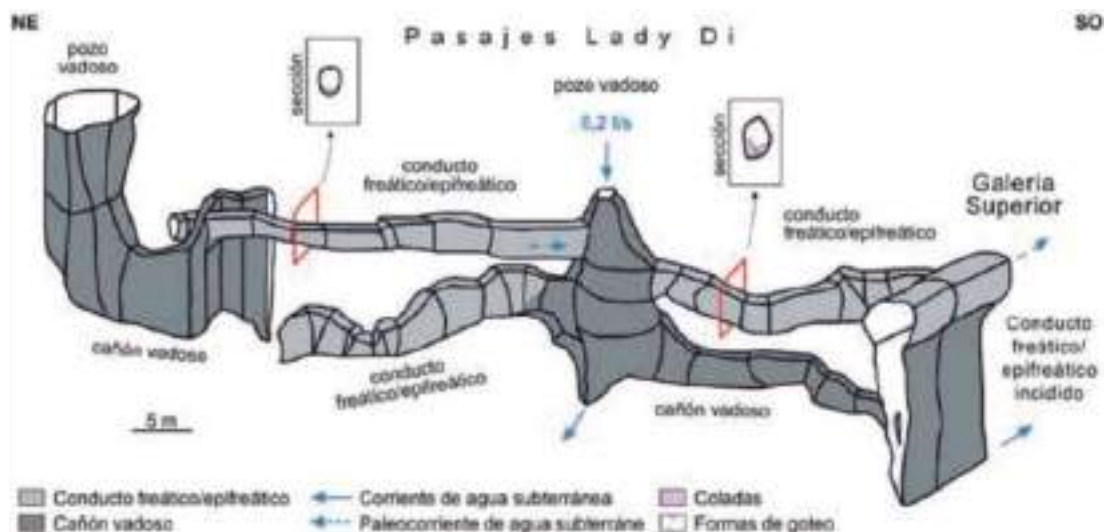


Figura 1. Ejemplo de secciones en una representación tridimensional de una cavidad con galerías de distintas morfologías (Jiménez-Sánchez *et al.*, 2019).

representaciones de planos verticales paralelos a la dirección principal de la cavidad se suelen denominar alzados o perfiles longitudinales.

De esta forma, se representa en el corte el espacio ocupado por el vacío de la cavidad, con la geometría correspondiente a la zona en la que se encuentre la sección, como se puede observar en la figura 1. Además, a esto se le debe añadir la litología correspondiente a la roca en la que se abre la cavidad, con las estructuras geológicas observables (buzamiento, fracturación, etc.), de igual forma que se haría en un corte geológico.

Sin embargo, una de las características fundamentales de un corte geomorfológico endokárstico es que, además, se representan las distintas formas y elementos que se encuentran en el interior de la cavidad, ya sean formas erosivas o deposicionales y, en el caso de las cavidades turísticas, también las antrópicas.

Al final, se obtiene un corte sintético en el que aparecen representados, al menos, los siguientes elementos: los materiales en los que se abre la cavidad y su estructura, la geometría erosiva primaria de la cavidad; y los distintos elementos deposicionales que se encuentran en el interior de esta, que representan su evolución geológica a lo largo del tiempo.

Como muchas de las estructuras que se encuentran en las cavidades no tienen por qué encontrarse exactamente en el plano vertical representado por el corte, habitualmente se realiza una proyección de los elementos cercanos más importantes sobre el plano, de forma que este tenga una mayor representatividad.

## **El valor científico y divulgativo de los cortes y los mapas geomorfológicos**

En el marco del turismo subterráneo del siglo XXI, las visitas turísticas en cavidades no deben estar limitadas a la actividad contemplativa de las formas y los elementos arquitectónicos que las decoran (en muchas ocasiones, sin entenderlos), sino que debe ofrecerse una visita que proporcione información y conocimiento de calidad a aquellas personas que deseen conocer más sobre la realidad del mundo subterráneo.

Para ello, una de las herramientas de mayor utilidad, son los cortes geomorfológicos de cavidades, ya que ofrecen una gran cantidad de información sintética de una forma visual, que puede ser complementada con explicaciones in situ, con gran versatilidad por parte de quien lo explica, y pueden ser enseñados en una variedad de formatos fácilmente intercambiables.

Uno de los valores más destacados que presentan los cortes geomorfológicos es la capacidad para representar varios aspectos de manera sencilla, ya sean características geológicas intrínsecas de la roca donde se ha desarrollado la cavidad (tales como la litología, la orientación y el buzamiento de la estratificación o la fracturación), junto con





*Figura 2. Realización de mediciones in situ con cinta métrica para ubicar espeleotemas en una de las secciones de la Cueva del Estrecho, Villares del Saz (Cuenca).*

aspectos geomorfológicos propios de la espeleogénesis de la cavidad, como las formas erosivas, los espeleotemas y los depósitos detríticos.

Identificar estos elementos y representarlos espacialmente permite analizar qué procesos los originaron, proporcionando información importante para el estudio de la espeleogénesis y la evolución de la cavidad. Además, la realización de estos cortes geomorfológicos ofrece la posibilidad de encontrar nuevas formas o elementos en la cavidad no descubiertos hasta el momento, ya que la metodología de elaboración de dichos cortes geomorfológicos implica un amplio tiempo de dedicación y de realización de mediciones concretas en el interior de la propia cueva (figura 2).

Finalmente, los cortes geomorfológicos son herramientas fácilmente utilizables por otras disciplinas científicas, ya que pueden ayudar a situar nueva información, ya sea de carácter arqueológico, paleontológico, geológico, hidrogeológico o paleoclimático e integrar esta información en un contexto geomorfológico amplio del territorio donde se sitúa la cavidad y en la evolución temporal de la misma (Robledo-Ardila *et al.*, 2018).

## **Casos de estudio**

A continuación, se detallan algunos ejemplos en los que se han empleado cortes geomorfológicos para el estudio de diversas cuevas habilitadas para el turismo en España. En cada una de ellas, la finalidad de los cortes es diferente, aunque en todos los casos son aplicables para su uso divulgativo.



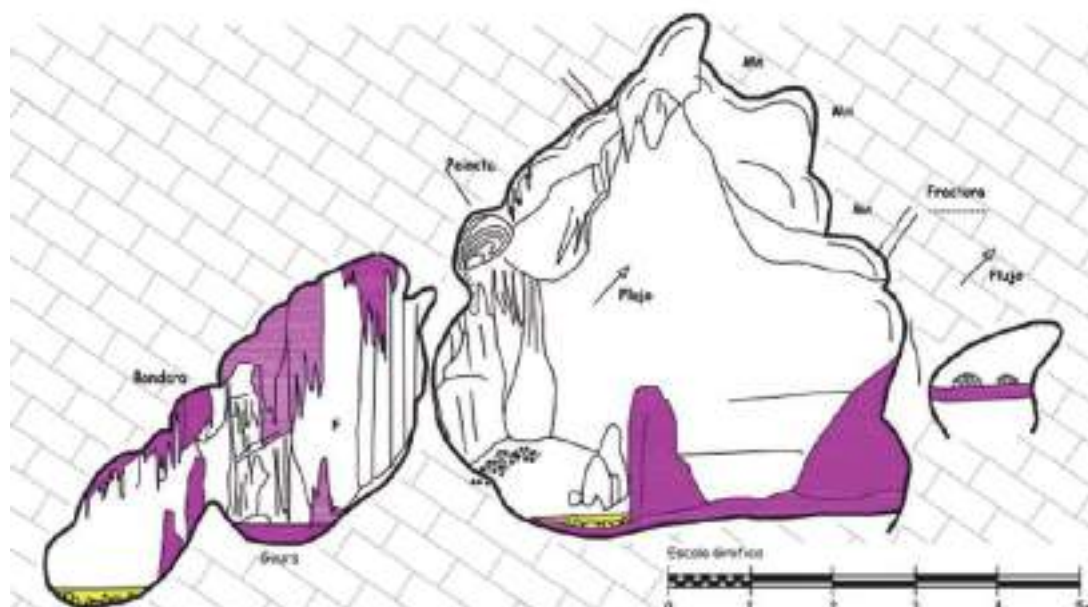


Figura 4. Borrador de un corte geomorfológico complejo de la Sala del Arco, en la Cueva de las Estegamitas.

### Sucesión de procesos erosivos y sedimentarios (Cueva de las Estegamitas, Málaga)

La Cueva de las Estegamitas es una cueva hipogéica del litoral andaluz, ubicada en el barrio de La Araña, en el extremo oriental del término municipal de Málaga. Se trata de una cueva cuya espeleogénesis se encuentra vinculada a una interfase antigua entre el agua dulce del acuífero calizo y el agua salada de origen marino. Es por tanto, una cueva de las denominadas como *flank margin cave*.

Es uno de los mejores ejemplos de cuevas con morfologías erosivas características de la hipogénesis litoral, por lo que la realización de cortes geomorfológicos que representen fielmente dichas morfologías es totalmente necesario.

Las cavidades hipogéicas presentan lo que se denomina como *Morphologic Suite of Rising Flow* (Klimchouck, 2009), es decir, un Cortejo Morfológico de Flujos Ascendentes, un conjunto de morfologías que evidencian el origen hipogéico de estas cavidades, entre las que se destacan, por su abundancia, las cúpulas en techos, y paredes.

En el estudio de este tipo de cavidades, es fundamental distinguir entre los procesos erosivos y los procesos de precipitación, ya que los primeros son los que se emplean como evidencia del origen de la cavidad. Estas diferencias se plasman perfectamente en los cortes geomorfológicos realizados.

En el ejemplo de la figura 4, un corte geomorfológico de la Sala del Arco de la Cueva de las Estegamitas, se pueden observar tres secciones principales, divididas por pequeñas particiones erosivas. En esta sección se observan suelos planos, representativos de suelos estalagmíticos y *gours*. La distribución de las cúpulas, en este caso, alineadas de forma ascendente hacia el E-SE, son indicadores de la dirección preferencial del flujo que las ha formado. Los espeleotemas más característicos de esta sala, producto de diversos procesos de precipitación característicos de las últimas etapas evolutivas de la cavidad, aparecen representadas con profusión.

### *Representación de los principales elementos arquitectónicos de la cavidad (Cuevas de Villares del Saz, Cuenca)*

El conjunto de cavidades ubicado en Villares del Saz (Cuenca): la Cueva del Estrecho, la Cueva de la Moneda y la Cueva de las Palomas, presenta una amplia variedad de características que son fácilmente representables de manera integral en cortes geomorfológicos sencillos. En este caso, se ha trabajado de manera preferencial en la Cueva del Estrecho (figura 5), pero interpretándolas como un mismo conjunto, al tratarse de cuevas cercanas con un posible origen común.

En primer lugar, presentan litologías diferentes en los suelos y en los techos de la cavidad, que, además, como consecuencia, proporciona morfologías y deformaciones distintas, que aparecen representadas en dichos cortes geomorfológicos.

Respecto a los elementos deposicionales del interior de la cavidad, no es una cueva con abundantes espeleotemas, aunque los existentes son muy característicos. Representar su tipología y su ubicación en los cortes es, por tanto, importante para una correcta descripción visual de la cavidad. Las distintas estalagmitas y estalactitas que se encuentran,

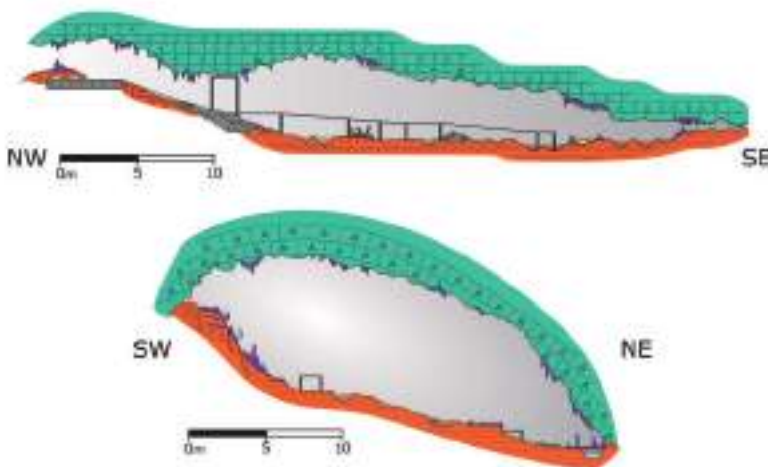


Figura 5. Cortes geomorfológicos de la Cueva del Estrecho, en Villares del Saz, Cuenca (Durán et al., 2022)

así como banderas y otras tipologías aparecen perfectamente representadas en color morado en los cortes realizados.

Algunos de los elementos que se encuentran desplazados y así han sido identificados, ya sean bloques caídos o conjuntos estalactíticos o estalagmíticos rotos, aparecen representados en color gris, para diferenciarlos de aquellos elementos ubicados en su posición original.

En los cortes geomorfológicos de esta cavidad no aparecen fracturas condicionantes de la espeleogénesis del sistema, ya que el control estructural principal que presenta es de tipo dúctil, un gran pliegue anticlinal regional que conforma la sierra donde se ubica la cueva.

Además, al tratarse de cavidades con restos arqueológicos muy importantes de diversa índole (silos, cerámica, restos óseos), su posición se puede indicar con facilidad en los cortes, de forma que sean fácilmente identificables, y pueden ser en consecuencia, protegidos. En estos cortes, se representan en color marrón y amarillo respectivamente.

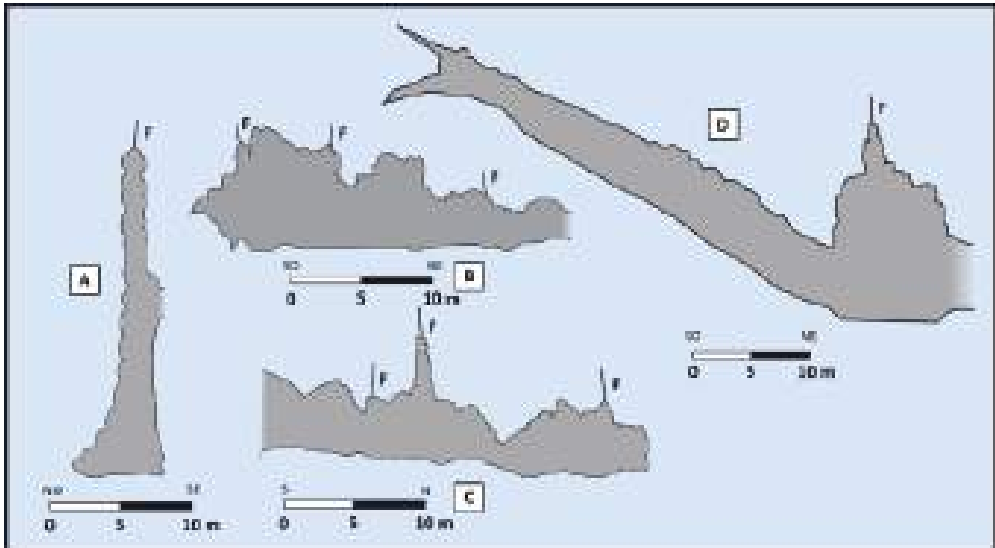
Finalmente, al tratarse de una cueva habilitada para el turismo, existen una serie de elementos que es necesario representar, como la losa de hormigón que se encuentra en la entrada habilitada a la cavidad y la pasarela junto con los soportes, que permite la visita turística al interior de la cavidad. Esto, además, permite tener una serie de referencias para identificar más fácilmente los elementos representados en los cortes geomorfológicos.

### *Génesis de la cavidad (Cueva de Ardales, Málaga)*

La Cueva de Ardales o de Doña Trinidad, es una de las cavidades turísticas más conocidas e importantes de Andalucía. Se trata de la primera cueva habilitada para el uso turístico de España, cuya visita estaba asociada a los Baños de Carratraca, ubicados en las cercanías de la cavidad. La presencia de importantes hallazgos arqueológicos en su interior la posiciona como una pieza fundamental en la prehistoria de la Península Ibérica.

Geológicamente, ha sido ampliamente estudiada, estableciendo su posición en el acuífero y su contexto hidrogeológico, en relación con los manantiales que drenan el sistema en el que se encuentra. Sin embargo, no fue hasta el estudio geomorfológico en profundidad de las morfologías presentes en la cavidad, y la realización de una serie de cortes geomorfológicos de las distintas salas y galerías, cuando se estableció con mayor exactitud su espeleogénesis, su cronología y su evolución (Durán *et al.*, 2021).

De los cortes geomorfológicos realizados, se han extraído unos esquemas en los que únicamente se han representado las formas erosivas de la cavidad, sintetizados en la Figura 6. Se observa la tipología de las salas y galerías y, sobre todo, el rasgo más llamativo, las morfologías erosivas de techos y paredes, con un claro control estructural, referente a la fracturación presente en el macizo. Estas morfologías erosivas son principalmente bóvedas o cúpulas, vinculadas al origen hipogénico de la cueva.



*Figura 6. Cortes geomorfológicos de algunas de las salas y galerías de la Cueva de Ardales (Durán - Laforet et al., 2022).*

El papel que han tenido la elaboración de los cortes geomorfológicos en el estudio de la espeleogénesis de la cavidad ha sido fundamental, ya que han ofrecido una visión sintética de todos los aspectos geomorfológicos que, con anterioridad, se observaban como fenómenos aislados y que, al ser complementados con los patrones espaciales de la cueva, junto con el trazado laberíntico que presenta y las evidencias hidrogeoquímicas estudiadas, han permitido establecer el origen hipogénico de esta cavidad.

## **Integración en el discurso divulgativo y otras aplicaciones**

Los mapas y cortes geomorfológicos son, como se ha podido observar, una herramienta útil para el entendimiento de la génesis y evolución de las cavidades, así como para su descripción física científica. Además, sirven para el posterior desarrollo y análisis de una amplia variedad de estudios en múltiples ámbitos científicos, ya sean geológicos, arqueológicos, hidrogeológicos o paleontológicos, y aportan una gran cantidad de información utilizable para la divulgación, en el caso de las cuevas turísticas. Podemos, por tanto, establecer las siguientes conclusiones:

1. Las cuevas turísticas deberían contar con estudios geomorfológicos modernos, al menos, del sector habilitado para las visitas, expresándose en un mapa geomorfológico de la planta de la cavidad y en una serie de cortes geomorfológicos transversales y longitudinales, representativos de los lugares de mayor interés del recorrido turístico.

2. Los cortes geomorfológicos son herramientas muy sencillas y económicas, con un gran contenido científico expresado de forma sintética, reconocible y entendible por los gestores de las cuevas y el público en general.
3. Los cortes geomorfológicos deben ser introducidos en el discurso científico y divulgativo de las cuevas turísticas, por lo que los guías de las cuevas deben ser formados para su entendimiento y utilización con las visitas.
4. La metodología de desarrollo de cortes geomorfológicos es aplicable a prácticamente toda la totalidad de las cuevas, ya sean turísticas o no, y proporcionan una información integrada del conjunto de los elementos geológicos de las cavidades.
5. La elaboración de cortes geomorfológicos no sustituye al análisis pormenorizado y detallado de algunas de las formas y elementos que componen las cavidades, sino que ofrecen una perspectiva conjunta y sintética de los más destacados
6. Con las herramientas adecuadas y el trabajo de administraciones públicas, organismos científicos y empresas, es posible establecer un tejido comunicativo para que los cortes geomorfológicos sean herramientas fáciles de entender y útiles para el público general.
7. El conocimiento espeleológico y topográfico, junto con los estudios geomorfológicos del exokarst, son fundamentales para la elaboración de mapas y cortes geomorfológicos y para el desarrollo de nuevas metodologías.
8. La digitalización y la introducción de mapas y cortes geomorfológicos en Sistemas de Información Geográfica (SIGs) son necesarios a la hora de estudiar de manera integral las cavidades y gestionar adecuadamente las cuevas turísticas.

## Referencias

- Arrese, B. (2009). *Geomorfología, evolución geológica y condiciones ambientales actuales de la Cueva de Nerja, Málaga*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid, 304 pp.
- Durán Laforet, S.R., Durán Valseo, J.J., Morales García, R., Robledo Ardila, P.A. (2022). Evidence of past and present cave hypogenesis in the Serrezuela de Carratraca Massif (Málaga, Southern Spain). "3rd Eurokarst. The European Conference on Karst Hydrogeology and Carbonate Reservoirs". AIH, junio de 2022, Málaga.
- Durán Valseo, J.J., Durán Laforet, S.R., Morales García, R.M., Robledo Ardila, P.A. (2021). Sobre el origen hipogénico de la Cueva de Ardales, otras cavidades de la Serrezuela y su relación con las aguas sulfurosas de los Baños de Carratraca (Málaga) *Takurrunna: Anuario de Estudios sobre Ronda y La Serranía*, 10-11, 205-218. Málaga
- Durán Valseo, J.J., Morales García, R., Durán Laforet, S.R., Guisado, J.C., Bernárdez, M.J. (2022). *Paseo geológico por la Cueva del Estrecho y su entorno. Cuevas hipogénicas y grandes pliegues*. Instituto Geológico y Minero y Diputación provincial de Cuenca. 18 pp.
- Jiménez Sánchez, M., Ballesteros, D., García Sansegundo, J., Giral, S., Meléndez Asensio, M., Domínguez Cuesta, M.J., Rodríguez Rodríguez, L. (2019). Caracterización geomorfológica y geocronológica de cavidades kársticas en el Parque Nacional de los Picos de Europa: investigación y transferencia. En: *Armengual Ramis, J.F. (coord.) Proyectos de Investigación en Parques Nacionales 2013-2017*, 79-93.

- Jiménez Sánchez, M., Durán, J.J., López-Martínez, J., Martos, E., Arrese, B. (2004). Estudios geomorfológicos en cavidades kársticas de España. *Investigaciones en sistemas kársticos españoles. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y aguas subterráneas*, 12, 333-349.
- Klimchouk, A. (2009). Morphogenesis of hypogenic caves. *Geomorphology*, 106, 100-117.
- Robledo, P.A., Durán Valsero, J.J. (2012) *Cartografía geomorfológica de las galerías de la visita de turismo-pasarela y espeleoaventura de la cueva El Soplao (Cantabria, España)*. Instituto Geológico y Minero de España. Informe técnico. 24 pp. Madrid.
- Robledo, P.A., Durán Valsero, J.J., Morales García, R. (2018). Geomorfología de la cueva de s'Aigo, Cala Blanca, Menorca. En: *Robledo, P.A., Durán, J.J. (Eds.) Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 79-94.
- Pardo Igúzquiza, E., Durán Valsero, J.J., Luque Espinar, J.A., Martos Rosillo, S. (2014). Análisis del relieve kárstico mediante el modelo digital de elevaciones. Aplicación a la Sierra de las Nieves (provincia de Málaga). *Boletín Geológico y Minero*, 125(3), 381-389.



# Descubrimiento de un conjunto excepcional de estegamitas en una nueva cavidad aparecida en el interior de una cantera de calizas en La Araña, Málaga, Sur de España

Sergio Raúl DURÁN LAFORET <sup>(1)</sup>, Juan José DURÁN VALSERO <sup>(2)</sup>,  
José Enrique SÁNCHEZ PÉREZ <sup>(3)</sup>, Iñaki VADILLO PÉREZ <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad de Málaga, Facultad de Ciencias, Campus de Teatinos, 29071 Málaga.  
sduran@uma.es, vadillo@uma.es

<sup>(2)</sup> Instituto Geológico y Minero de España IGME-CSIC, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid.  
jj.duran@igme.es

<sup>(3)</sup> Sociedad Excursionista de Málaga, C/ República Argentina 9, 29016 Málaga.  
jesanchez@asedeb.es

---

## Resumen

Las estegamitas son un tipo muy particular de espeleotemas, descritas por primera vez en el año 1991 en una cueva australiana de la región de Nullarbor. Desde ese momento, se han reconocido muy escasos conjuntos de estegamitas en cavidades de otros lugares del planeta: Puerto Rico y Eslovaquia. El origen de las estegamitas está ligado a la presencia de suelos estalagmíticos, formados posiblemente sobre sedimentos detríticos y fracturados por procesos de hinchamiento, vinculados a la presencia de agua estacional en los mismos. Las fracturas sirven de vía de ascensión del agua capilar, que va formando un doble depósito concéntrico, en forma de abanico, separado por un plano central, coincidente con el plano de fractura.

La cueva de las Estegamitas (llamada inicialmente Cueva de la Maravilla Blanca y Cueva FYM) es una cavidad kárstica, abierta en calizas jurásicas del Complejo Maláguide de la Cordillera Bética, descubierta en el año 2021 en uno de los frentes de cantera de la fábrica de cemento ubicada en la barriada de La Araña, en el extremo oriental de la ciudad de Málaga (sur de España). En su interior se ha descubierto un amplio conjunto de estegamitas de variados tamaños (la mayor tiene una altura de unos 180 cm por unos 100 cm de ancho), con la particularidad de que se encuentran activas en la actualidad. Este hecho ha propiciado el que se encuentren ejemplares en distintas fases de formación, desde su inicio hasta prácticamente su abandono por el aporte hídrico, pudiendo establecerse con detalle una hipótesis genética y evolutiva con base científica. El conjunto de estegamitas descubierto en la cueva de las Estegamitas es, posiblemente, único en el mundo, por su actividad, número, diversidad y belleza. Constituye un elemento geológico de excepcional interés de ámbito internacional que debe ser estudiado y protegido adecuadamente.

**Palabras clave:** cuevas litorales, espeleotemas por capilaridad, estegamitas, lugar de interés geológico, patrimonio geológico.

## ***Discovery of an exceptional assemblage of stegamites in a new cave that appeared inside a limestone quarry in La Araña, Málaga, southern Spain***

### **Abstract**

*Stegamites are a very particular type of speleothem, described for the first time in 1991 in an Australian cave in the Nullarbor region. Since then, very few stegamite assemblages have been recognized in cavities in other parts of the planet: Puerto Rico and Slovakia. The origin of the stegamites is linked to the presence of stalagmitic floors, possibly formed on detrital sediments and fractured by swelling processes, linked to the presence of seasonal water in them. The fractures serve as a pathway for the ascent of capillary water, which forms a double concentric deposit, in the shape of a fan, separated by a central plane, coinciding with the fracture plane. Cueva de las Estegamitas (initially called Cueva de la Maravilla Blanca and Cueva FYM) is a karstic cavity, opened in Jurassic limestone of the Maláguide Complex of the Cordillera Bética, discovered in 2021 in one of the quarry fronts of the factory of cement located in the neighborhood of La Araña, at the eastern end of the city of Malaga (southern Spain). Inside, a large set of stegamites of various sizes has been discovered (the largest is about 180 cm high by about 100 cm wide), with the particularity that they are currently active. This fact has led to the finding of specimens in different phases of formation, from their beginning to practically their abandonment due to the water supply, being able to establish in detail a scientifically based genetic and evolutionary hypothesis. The set of Stegamites discovered in the cave of the Stegamites is possibly unique in the world, due to its activity, number, diversity and beauty. It constitutes a geological element of exceptional international interest that must be adequately studied and protected.*

**Keywords:** *capillarity speleothems, flank margin caves, geological heritage, geosites, stegamites.*

## **Introducción**

La Cueva de las Estegamitas fue descubierta, accidentalmente, en el curso de las labores mineras que lleva a cabo la cantera de caliza que la empresa Financiera y Minera posee en La Araña (Málaga), para la producción de cemento en la fábrica anexa. La apertura de la boca artificial de acceso debió producirse en algún momento de la primavera de 2021, aunque la noticia no saltó a los medios de comunicación hasta el verano de ese año (figura 1). Desde ese momento, las autoridades (Junta de Andalucía) tomaron cartas en el asunto, realizando una serie de escritos de técnicos en arqueología y medio ambiente y solicitando informes a la Empresa, adoptando además medidas cautelares de paralización del frente de cantera donde se ubica la cueva hasta la emisión de los informes administrativos correspondientes. Las fotografías que se publicaron en diversos medios de comunicación crearon un importante impacto mediático y generaron una



Figura 1. Fotografía difundida tras el descubrimiento de la cueva, en verano de 2021, entonces denominada en los medios de comunicación "cueva de la Maravilla Blanca".

gran atención por parte de diversos colectivos (investigadores, espeleólogos, ecologistas) y de la sociedad en general.

Un equipo de investigadores del Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) y de la Universidad de Málaga (UMA), junto con un equipo de espeleólogos del Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga (GES de la SEM), han llevado a cabo durante tres meses, del 10 de abril al 10 de julio de 2022, una serie de labores de exploración, topografía e investigación en el interior de la cueva, con unos resultados inesperados y espectaculares. La exploración realizada ha permitido determinar que la cueva posee un trazado laberíntico, del tipo "*flank margin cave*" (en el sentido de Mylroie y Carew, 1990). Tiene una orientación general este-oeste, y una serie de ramificaciones orientadas según las direcciones principales de fracturación (NE-SO y NO-SE aproximadamente). La topografía llevada a cabo (tradicional y 3D) ha establecido un desarrollo horizontal de 1.303 metros y un desnivel de 32 metros respecto a la cota de la entrada de la cueva (+6 m y -26) (figura 2), lo que la convierte en la cueva accesible de mayor desarrollo del municipio de Málaga (existe otra, cuya entrada está tapada en la misma cantera y de la que se desconoce su estado actual, la cueva de la Cuerda) y la décimonovena de todas las cavidades malagueñas por longitud.

Desde el punto de vista geológico, la cueva presenta en su interior una serie de características que la hace única. Por un lado, posee unas morfologías de cueva hipogénica litoral extremadamente bien conservadas, la mejor de todo el litoral andaluz. Por otro lado, la cantidad y variedad de los espeleotemas que existen en sus techos, paredes y suelos, sobre todo los de aquellos tipos menos frecuentes (excéntricas de gran tamaño,



Figura 2. Esquema 3D de la topografía de la cueva de las Estegamitas (realizada por la Sociedad Excursionista de Málaga). La distancia entre los puntos más alejados de la cavidad es de aproximadamente unos 200 metros. Las estegamitas se concentran fundamentalmente en la zona marcada con una elipse de color rojo, aunque aparecen puntualmente en otras zonas de la cueva.

“mariposas”, discos o escudos, *pool fingers*), es absolutamente excepcional, siendo la cueva que mejor representa este tipo de concreciones de toda la provincia de Málaga. Por último, se ha descubierto un conjunto de estegamitas, una variedad enormemente inusual de espeleotemas, solo conocidas en cavidades de tres lugares del mundo, con más de cien ejemplares, en perfecto estado de conservación, muchas de ellas activas, en formación actualmente, de variadas dimensiones y morfologías, algunas de ellas de un metro y medio de altura. Este trabajo da cuenta de este último aspecto de la cavidad, el descubrimiento de este excepcional conjunto de estegamitas y su importancia como lugar de interés geológico de importancia internacional.

## Situación de la cueva y marco geológico

La Cueva de las Estegamitas es una cavidad kárstica de reciente descubrimiento, localizada en una explotación minera a cielo abierto que beneficia un afloramiento de calizas jurásicas del Complejo Maláguide en el denominado “Cantal Chico”, junto a la pedanía de La Araña, en el extremo oriental del municipio de Málaga.

La cueva de las Estegamitas se encuentra en el barrio de La Araña, en el extremo oriental del término municipal de Málaga, sur de España (figura 3), en el interior de una explotación minera a cielo abierto que beneficia un afloramiento de calizas jurásicas del Complejo Maláguide para la fabricación de cemento en una fábrica aneja. Se emplaza en un macizo rocoso carbonático denominado Cantal Chico, una zona con un gran desarrollo de formas endokársticas (Durán, 1996), con más de 200 cuevas conocidas, algunas de ellas desde el siglo XIX.

Muchas de estas cuevas tiene una gran relevancia arqueológica (cueva Navarro IV, con excepcionales pinturas rupestres paleolíticas, declarada BIC por la Junta de Andalucía (Sanchidrián, 1981); Raja del Humo y covachos conexos, con importantes yacimientos arqueológicos preneandertales y neandertales (Ramos *et al.*, 2003); Hoyo de la Mina, hoy



Figura 3. Localización de la Cueva de las Estegamitas

desaparecida, con un yacimiento postpaleolítico de gran importancia (Such, 1920), entre otras).

El conjunto de cavidades se abren en una serie de rasas marinas erosivas escalonadas, que se alternan con paleocantilados marinos, entre las cotas 140-120 m s.n.m y el nivel del mar actual (Ferre *et al.* 2003), sin que se descarte la presencia de cavidades sumergidas por debajo del mismo.

Los materiales carbonáticos en los que se abre la cavidad corresponden al complejo Málagaide de la Cordillera Bética y son de edad Jurásica, con removilizaciones olitostromicas terciarias (Serrano *et al.*, 1995). En el entorno inmediato de la cavidad se alternan calizas blancas de facies masivas y brechoides, con abundantes mineralizaciones de pirolusita (óxidos de manganeso).

## Las estegamitas, un tipo muy particular de espeleotemas

La primera mención a las estegamitas como un tipo particular de espeleotemas es el trabajo de Webb (1991). En dicho año, este espeleólogo australiano descubrió en dos cuevas (Matilda y Gorange Cave) de la Llanura de Nullarbor, al sur de Australia, unas "extrañas crestas en los suelos de ambas cuevas". Las bautizó como estegamitas, por su parecido con las crestas presentes en el lomo de los dinosaurios conocidos como estegosaurios. Los *Stegosaurus* (del griego "lagarto con tejado" o "lagarto cubierto," por la doble fila de placas óseas que poseían a lo largo de la espalda) son un tipo de dinosaurios tireóforos que vivieron en el Jurásico, en Norteamérica y Europa, muy populares desde los primeros hallazgos fósiles en el siglo XIX.

Las primeras estegamitas descubiertas presentaban una serie de características diagnósticas: 1. Se encontraban siempre sobre suelos estalagmíticos; 2. Estaban formadas mayoritariamente por calcita negra, teñida de ese color por lo que presumiblemente

podían ser pequeñas cantidades de materia orgánica, aunque este aspecto no estaba confirmado; 3. Presentaban, casi siempre, una fractura a lo largo del ápice de la cresta.

Webb (1991) ofrecía, además, una serie de detalles adicionales sobre la composición (presencia de yeso en algunas capas blancas intercaladas con la calcita negra), textura interna (laminación horizontal, salvo en la cercanía de la fractura central, que aparecía a 45º) y dimensiones (entre 5 y 100 cm de ancho, 5 y 130 cm de alto y 30 y 160 cm de largo), de las estegamitas descritas, así como apuntaba un posible mecanismo genético. Consideraba que la génesis era similar a la de los discos o escudos, es decir, ligada a la actuación de soluciones (acuosas) forzadas a través de las fracturas del suelo, a favor de las cuales surgían “de manera similar a la lava de los volcanes”, dando lugar a las crestas de calcita. Sin embargo, establecía una clara diferencia entre ambos tipos de espeleotemas (discos o escudos y estegamitas) por la distinta estructura interna de los mismos, concéntrica en los primeros y en forma de capas horizontales en las segundas.

También aportaba dos cuestiones adicionales de interés: la presencia de “estegamitas secundarias”, vinculadas a fracturas posteriores a las iniciales y que formaban un cierto ángulo con las primeras y más desarrolladas; y la posible relación de los cambios composicionales de las láminas de las estegamitas con variaciones en las condiciones climáticas, muy especialmente la posibilidad de la formación de yeso durante periodos secos.

Desde entonces hasta la actualidad, solo se han descrito este tipo de espeleotemas en otros dos lugares del planeta: en el Sistema Esqueleto, en la isla de Mona, Puerto Rico, un único ejemplar (Kambesis *et al.*, sin fecha) y en unas cuevas de Eslovaquia (Stankovic y Cílek, 2005).

Las estegamitas son, por tanto, un tipo muy especial de espeleotemas, de los más escasos y raros existentes en las cuevas de todo el mundo (figura 4). La característica fundamental



Figura 4. Estegamitas descritas en diversas cuevas del planeta: las tres en blanco y negro son de cuevas australianas (Webb, 1991), mientras que la de abajo en el centro es de Puerto Rico (Kambesis *et al.*, sin fecha) y la de la derecha, de Eslovaquia (Stankovic y Cílek, 2005).

de las estegamitas es, además de su forma peculiar, el hecho de crecer desde el suelo, pero a diferencia de las estalagmitas, muy comunes en las cuevas, no lo hacen por el agua de goteo, sino por capilaridad, o sea por el agua que asciende desde el suelo a favor de fracturas, como se describirá en el apartado dedicado a la génesis y evolución.

## Las estegamitas descubiertas en Málaga

El conjunto de estegamitas de la cueva de las Estegamitas constituye un hallazgo excepcional, por su número, variedad morfológica y estado de conservación. En este sentido, posiblemente es el conjunto de mayor interés conocido hasta el momento de este tipo de espeleotemas.

Aunque aún no ha podido llevarse a cabo el inventario detallado de todas las estegamitas presentes en la cavidad, el número de ejemplares identificados supera ampliamente el centenar. Una de las características más destacadas del conjunto es que se encuentran agrupadas en un sector de la cueva (en el entorno de la denominada Sala de Día y espacios adyacentes), aunque existen algunos ejemplares aislados en otros lugares de la cavidad. La mayor parte de las estegamitas son activas, es decir se observa que el crecimiento se está produciendo en la actualidad. Se encuentran ejemplares correspondientes a todas las etapas de su evolución, desde el inicio, con formaciones incipientes, a partir de fracturas (muchas de ellas curvas) existentes en el suelo estalagmítico, hasta las estegamitas de mayor tamaño, bien desarrolladas, con alturas de hasta 180 cm, típicas de etapas de madurez (figura 5).

La mayor parte de las estegamitas presentan color blanco o amarillento, similar al caramelo; dada su posición relativa respecto al resto de espeleotemas y depósitos



Figura 5. Estegamitas del interior de la cueva homónima. De arriba a la izquierda hacia abajo a la derecha se aprecian estegamitas en distintas fases de su evolución, desde las facturas del suelo estalagmítico inicial hasta las estegamitas de gran tamaño, de dimensiones métricas.



*Figura 6. Banded interior of one of the halves of a stegomite.*

detríticos presentes en la cueva, forman parte con seguridad de las últimas generaciones (las más modernas) que se han formado, aunque su datación absoluta aún está pendiente.

Un aspecto interesante de estas estegamitas es que ha podido ser observada su estructura interna con claridad. Alguno de los ejemplares destruidos en las etapas iniciales de apertura de la cueva fue abandonado por los expoliadores, partido por la mitad, en el piso de una de las galerías. La observación detallada de las dos mitades permite establecer un patrón de crecimiento concéntrico, diferente al descrito en las estegamitas australianas por Webb (1991).

Efectivamente, en la figura 6 puede verse claramente el bandeo semicircular, centrado en el punto medio inferior (parte de debajo de la estegamita en la fotografía), presumiblemente el lugar de porte de la solución acuosa que originó el espeleotema. El grosor de las diferentes láminas y las diferencias de coloración están relacionadas con variaciones en las condiciones ambientales, aspecto actualmente en estudio mediante análisis de isótopos estables y otras técnicas.

## **Génesis y evolución de las estegamitas**

Tanto Webb (1991) como Stankovic y Cílek (2005) coinciden en asignar un origen común a las estegamitas australianas y eslovacas: formadas por soluciones acuosas ascendentes a través de fracturas existentes en el suelo de las cavidades. Sin embargo, existen diferencias en los detalles entre ambos autores. Mientras que para el primero de ellos las estegamitas se diferencian claramente de los discos o escudos y su origen está siempre vinculado a la presencia de suelos estalagmíticos, para los segundos autores, las estegamitas forman parte de un conjunto de espeleotemas mucho más amplio (y confuso), entre los que se encuentran los denominados "angel wings", "sinter drums", "weeping willows", "geyser stalagmites" y otras formas similares; aunque las distinguen de los escudos o discos, contemplan también como estegamitas algunas formas que crecen desde las paredes. Consideran que son espeleotemas formados por capilaridad, con el agua con



frecuencia bajo alta presión, inyectada a favor de fracturas por lo general de alto ángulo, ascendiendo directamente desde la roca en la que se abre la cueva o desde espelotemas preexistentes, en las paredes o suelos de la cavidad.

- En nuestra opinión, las estegamitas constituyen claramente un tipo particular y específico de espeleotemas, que se caracterizan básicamente por presentar las siguientes características:
- Se forman a partir de fracturas, rectas o curvas, verticales o subverticales, que afectan al suelo estalagmítico de la cueva.
- Presentan morfologías distintas, en función de su estadio evolutivo, pero por lo general cuando alcanzan un estado de madurez, son similares a crestas semicirculares o elipsoidales, a veces ligeramente apuntadas, con predominio del desarrollo vertical respecto a las otras dos dimensiones, en particular la anchura.
- Están formadas por dos partes, simétricas, separadas por una discontinuidad central, cuya geometría coincide con la fractura original. Esta discontinuidad puede o no ser observable en el ápice de la estegamita y a lo largo de su borde, dependiendo de la actividad de la misma.
- La estructura interna está formada por una serie de capas concéntricas, que irradian a partir de un punto central de la base, presumiblemente el punto principal de inyección de la solución acuosa que constituye la alimentación hídrica de la estegamita.

En el caso de la cueva de las Estegamitas, hay un elemento adicional que nos ha permitido establecer una propuesta de modelo genético y evolutivo coherente, que se muestra en la figura 7. Es la presencia, por debajo del suelo estalagmítico, de un paquete de sedimentos detríticos, cuyo papel es fundamental para la generación de las fracturas y para el mantenimiento de la actividad hídrica a lo largo de la evolución de las estegamitas. Efectivamente, la presencia de arcillas en los sedimentos detríticos, permite formular la hipótesis de que los mecanismos de hinchamiento, mediante la humectación de las mismas, pueden ser la causa de la fracturación del suelo estalagmítico, por el incremento de volumen. De igual manera, la capacidad de retención del agua de estos sedimentos (a modo de un acuífero confinado en miniatura) permite explicar la carga hidráulica necesaria para que la capilaridad juegue su papel a favor de una superficie de fractura o un punto de debilidad a lo largo de la misma.

Las ocho fases que se han identificado para explicar el origen y la evolución de las estegamitas de la cueva malagueña son:

1. Origen de la cavidad mediante la acción de aguas subterráneas de la zona de mezcla de aguas dulce y marina en un momento de alta parada del nivel del mar.

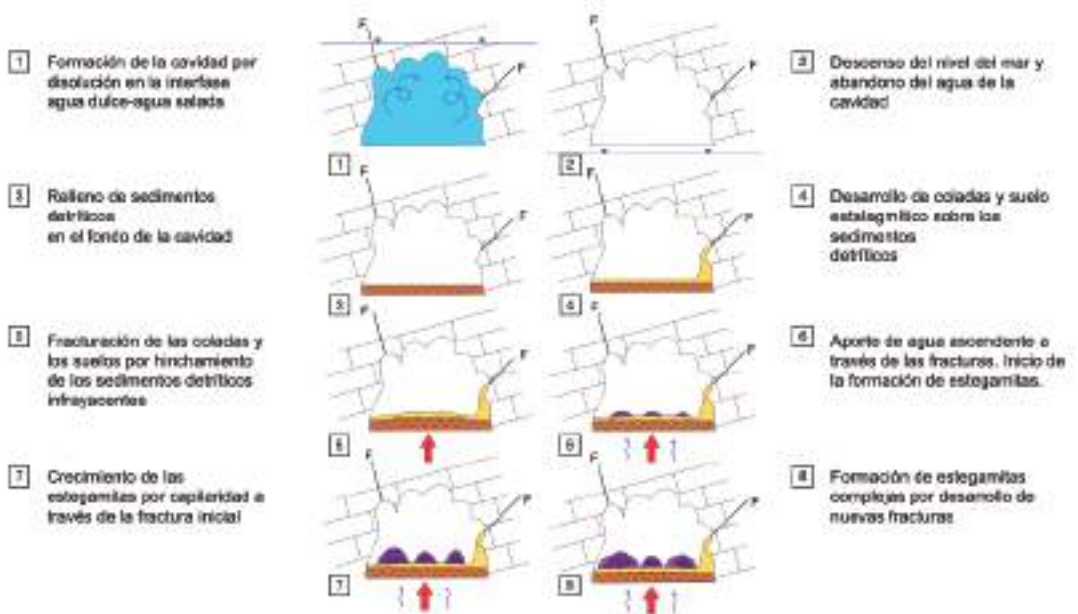


Figura 7. Hipótesis genética y evolutiva de las estegamitas de la cueva de las Estegamitas de la Araña (Málaga).

- Vaciado de la cavidad por descenso del nivel del mar y, consiguientemente, el nivel freático.
- Relleno de sedimentos detríticos en la parte bajas de las salas y galerías, de origen tanto marino como continental.
- Desarrollo de una o varias generaciones importantes de espeleotemas, configurando un suelo estalagmítico rígido de un cierto espesor.
- Fracturación de los suelos estalagmíticos por variaciones de volumen (hinchamiento y deshinchamiento) ocasionadas por la fracción fina (arcillas) de los sedimentos detríticos de la base de la secuencia sedimentaria del relleno.
- Aporte de agua capilar "a presión" a favor de las fracturas generadas, con aperturas submilimétricas. Inicio de la formación de las estegamitas, con los depósitos de carbonatos de neoformación generados por precipitación a lo largo de las fracturas, nucleados a favor de los puntos de inyección.
- Crecimiento de las estegamitas hasta alcanzar su punto de equilibrio, en el cual la presión del agua capilar impide su desarrollo en la vertical.
- En algunos caos, la creación de nuevas fracturas, a veces sobre una estegamita anterior, genera estegamitas complejas, con varias direcciones de crecimiento y diferentes estadios evolutivos, creando geometrías complejas.



Figura 8. Fragmento apical de la conocida como Gran Estegamita, roto, en el suelo de la cavidad (fecha aproximada de la imagen, entre el 11 y el 15 de julio de 2022).

## Consideraciones finales

El descubrimiento del conjunto de las estegamitas en la cueva de las Estegamitas de La Araña, Málaga, constituye un hito excepcional en la historia de la investigación de este tipo de espeleotemas, cuya identificación hasta el momento ha sido muy escasa en el conjunto de cavidades del planeta. En este sentido, la cueva de las Estegamitas se constituye como un Lugar de Interés Geológico de importancia internacional, susceptible de ser incorporado en el Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG) (García-Cortés *et al.*, 2019). En concreto, debe constituir uno de los geositios representativos del contexto geológico denominado "Sistemas kársticos en carbonatos y evaporitas de la Península Ibérica y Baleares" (García-Cortés *et al.* 2000).

Debido a la situación de la cueva en el interior de una cantera actualmente activa, el riesgo potencial de afección a la cueva y su contenido es elevado, si no se toman las medidas pertinentes para su conservación. En este sentido, algunos de sus elementos más representativos de la cavidad, como una de las estegamitas de mayor tamaño y calidad, han sufrido daños importantes con posterioridad a nuestras investigaciones (figura 8), que se suman a los ocasionados por expoliadores ilegales (buscadores de cristalizaciones de calcita para su venta a coleccionistas) durante las primeras etapas de la aparición de la cavidad en el frente activo de la cantera.

En el momento actual continúan realizándose numerosos trabajos derivados de la fase de campo llevada a cabo anteriormente. Entre estos trabajos, se encuentra la realización de una réplica de una de las estegamitas arrancada y fracturada por los expoliadores. Esta experiencia servirá como base para la posible restauración de algunos de los elementos destruidos en la cavidad y su recuperación in situ.

De igual manera, la administración competente debería, teniendo en cuenta los resultados de las investigaciones llevadas a cabo hasta el momento, valorar la posibilidad de proteger la cueva, su contenido y su entorno, bajo alguna de las figuras definidas en la Ley 2/1989, del 18 de julio, por la que se aprueba el Inventario de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía.

En algunos casos anteriores, la Comunidad Autónoma andaluza ha utilizado algunas de las figuras contempladas en dicha ley, para proteger a cavidades singulares o conjuntos de cavidades. Por ejemplo, el Karst en yeso de Sorbas, en la provincia de Almería, que fue declarado Paraje Natural en el año 1989.

De la misma manera, un grupo de cuevas han sido protegidas bajo la figura de Monumento Natural, como la Cueva de las Ventanas, en la localidad de Píñar, Granada, declarada en el año 2001; en el mismo año, la Cueva de los Murciélagos de Zuheros, en Córdoba; la Cueva de Ambrosio, en Vélez Blanco, Almería, en 2010; la Cueva del Agua de Tíscar, Jaén, declarada en 2019; la Cueva de Hundidero de Montejaque, Málaga, declarada en 2019; o la Geoda de Pulpí y Mina Rica del Pilar de Jaravía, en la provincia de Almería, localizada dentro de una explotación minera subterránea abandonada, y declarada en el año 2022.

## Agradecimientos

Al profesor Rafael Fernández Rubio, por su recomendación para la realización de las investigaciones geológicas llevadas a cabo en la cueva. A la empresa Financiera y Minera por la autorización para la realización de las mismas y las facilidades ofrecidas sobre el terreno. A todos los compañeros y compañeras del equipo de trabajo del Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), de la Universidad de Málaga (UMA) y de la Sociedad Excursionista de Málaga (SEM).

## Referencias

- Durán, J.J. (1996). *Los sistemas kársticos de la provincia de Málaga y su evolución: contribución al conocimiento paleoclimático del Cuaternario en el Mediterráneo Occidental*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 406 pp.
- Ferre, E., Cortés, M., Ramos, J., Senciales, J.M., Lozano, M.C., Vera, J.L., Aguilera, R. y Navarrete, I. (2003). El Cuaternario reciente en el sector oriental de la Bahía de Málaga. Rasas y depósitos marinos, continentales y arqueológicos. *Cuaternario y Geomorfología*, 8, 1-2, pp. 73-93.
- García-Cortés, A., Rábano, I., Locutura, J., Bellido, F., Fernández-Gianotti, J., Martín-Serrano, A., Quesada, C., Barnolas, A. y Durán, J. J. (2000). Contextos geológicos españoles de relevancia internacional: establecimiento, descripción y justificación según la metodología del proyecto Global Geosites de la IUGS. *Boletín Geológico y Minero*. Vol. 111-6, pp. 5-38.
- García Cortés, A., Vegas, J., Carcavilla, L. y Díaz Martínez, E. (2019) *Bases conceptuales y metodología del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG)*. IGME. 106 pp.

- Kambesis, P., Guzmán M. y Vale, A. (sin fecha) *Inventario de cuevas en la Isla de Mona. Un proyecto cooperativo entre "Proyecto Isla de Mona" y el Departamento de Recursos Naturales de Puerto Rico*. Resumen extendido. Inédito, 13 pp.
- Myroie, J.E. y Carew, J.L. (1990) The flank margin model for dissolution caves developed in carbonate platforms. *Earth Surface processes and landforms*. Vol. 15, 5, pp 413-424.
- Ramos, J., Aguilera, R., Cortés, M., y Bañares, M. (2003). La prehistoria en la franja costera de la Bahía de Málaga: el complejo kárstico de La Araña (Málaga, España). *Pliocénica*, 3. pp. 117-130.
- Sanchidrián, J.L. (1981). Cueva Navarro (Cala del Moral, Málaga). *Corpus Artis Rupestris. I Paleolithica Ars*, vol. 1. Salamanca.
- Serrano, F., Sanz de Galdeano, C., Delgado, F., López-Garrido, A.C. y Martín Algarra, A. (1995) The Mesozoic and Cenozoic of the Malaguide Complex in the Malaga area: a Paleogene olistostrome-type chaotic complex (Betic Cordillera, Spain). *Geologie en Mijnbouw* 74: 105-116
- Stankovic, J y Čilek, V. (2005) Stegamites: first finds of the unusual cave formations in Slovakia. *Bulletin of Slovak Speleological Society (Special Edition, 2005)*, pp. 31-35.
- Such, M. (1920). *Avance al estudio de la caverna Hoyo de la Mina, en Málaga*. Sociedad Malagueña de Ciencias, 86 pp. Málaga.
- Webb, R. (1991). Stegamites – A form of Cave shield. *Proceedings of the 18th Biennial Conference of the Australian Speleological Federation*. Margaret River. (<http://www.wasg.org.au/steg.html>).



# **Grotte du Chameau, Berkane – Marruecos**

## **Una cueva hipogénica para el turismo en la Región Oriental de Marruecos**

Mohamed EL KADIRI <sup>(1)</sup>, Andrés ROS VIVANCOS <sup>(1)</sup>,  
Hassan AOURAGHE <sup>(2)</sup>, José AMORÓS <sup>(1)</sup>,  
José Luis LLAMUSÍ LATORRE <sup>(1)</sup>, Mohamed EL AHMADI <sup>(1)</sup>, Manuel TREMIÑO BRU <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Fundación Valle de Zegzel, Berkane (Marruecos). phelkadiri@gmail.com, andresros@outlook.com, j.l.llamusi@gmail.com, j.amoros@huma.es, lafermeelahmadi@gmail.com, mtremnob@gmail.com

<sup>(2)</sup> Departamento Geología Universidad Mohamed Primero Oujda. h.aouraghe@ump.ac.ma

---

### **Resumen**

La Grotte du Chameau (Ifri Tasarrakout), se encuentra situada en la Región Oriental de Marruecos en el valle de Zegzel. Es una de las primeras cavidades exploradas en Marruecos, fue abierta al público por primera vez en 1948 cerrándose pocos años después, está declarada patrimonio nacional.

En 2008 se incluye en un proyecto cultural integral para la región, proyecto DELIO, y en 2016 se inicia un proyecto de acondicionamiento y musealización para su apertura al público con la creación de un importante centro de recepción y de usos de los recursos naturales en el entorno de la cueva y su interior por la Fundación Valle du Zegzel.

La Grotte du Chameau de origen hipogénica-hidrotermal, en su interior se encuentra un río intermitente de agua caliente, una red de galerías de más de 1.900m, morfologías y espeleotemas ligados a los procesos hipogénicos, que han dado forma a una singular cavidad creando grandes salas y cúpulas entre otros indicadores.

En diciembre 2012, H. Aouraghe de la Universidad Mohamed I en Oujda y Ramon Viñas del Institut de Paleoecologia Humana i Evolució Social en Tarragona) localizan grabados parietales prehistóricos en la Grotte du Chameau.

**Palabras clave:** Cueva turística, hidrotermal, hipogénico, arte rupestre, Marruecos.

## **Grotte du Chameau, Berkane - Morocco**

### **A hypogenic cave for tourism in the Eastern Region of Morocco**

#### **Abstract**

*La Grotte du Chameau (Ifri Tasarrakout), is located in the Eastern Region of Morocco in the Zegzel Valley. It is one of the first caves explored in Morocco, it was opened to the public for the first time in 1948, closing a few years later, it has been declared a national heritage. In 2008, the integral cultural project for the region, DELIO project, was included in a culture project, and in 2016 a conditioning and musealization project began for its opening to the public with the creation of an important reception center and the use of*

*natural resources in the surroundings of the cave and its interior by the Valle du Zegzel Foundation.*

*The Grotte du Chameau of hypogenic-hydrothermal origin, inside there is an intermittent river of hot water, a network of galleries of more than 1,900m, morphologies and speleothems linked to hypogenic processes, which have shaped a singular cavity creating large rooms and domes among other indicators.*

*In December 2012, H. Aouraghe from the Mohamed I University in Oujda and Ramon Viñas from the Institute of Human Paleocology and Social Evolution in Tarragona located prehistoric parietal engravings in the Grotte du Chameau.*

**Keywords:** *Tourist cave, hydrothermal, hypogenic, rock art, Morocco.*

## Introducción

La Grotte du Chameau, Zegzel (foto 1) también conocida como Grotte du Taserrakout en lengua Bereber (Basset, 1920) es la cueva más importante y conocida de la región oriental de Marruecos, fue abierta al turismo en 1948, cerrada unos años más tarde, es declarada Patrimonio Nacional en 1953.

La Grotte du Chameau se encuentra situada en el valle de Zegzel entre las poblaciones de Berkane y Tafoughalt, en el macizo de Beni Snassen al este de Marruecos, la cavidad se sitúa en la base del acantilado de calizas dolomíticas del Lías, sobre el barranco del lecho del Oued Farrouj (Bourbah) a 1 km del Valle de Zegzel.

La cueva ha sido visitada por numerosos investigadores. Existen noticias de su exploración en distintas épocas 1915-1920 (Basset, 1920), el primer estudio de la gruta se realiza en 1948 por la Société Spéléologique du Maroc (S.S.M.), en 1971 J.P. Cantet realiza una topografía y explora 50 metros del sifón. En 1980 B. & J. Lips realiza una nueva topografía con un desarrollo de 600m. En 1982 el Groupe Spéléo de l'Aragnado explora el sifón dos S2 asignando una longitud de (415m -13m) y un desarrollo de la cavidad de 1.150m (Boenlé, 1983; GSBM, 1984).

En 2008 se incluye en un proyecto cultura e integral para la región, proyecto DELIO, cofinanciado por la Agencia Oriental y el PNDU, se renueva la instalación eléctrica y se dota a la cavidad de nuevas pasarelas y escaleras que hacen posible la visita de los tres pisos que tiene la cavidad, finalizado en 2015 sin llegar a abrirse al público.

En 2016 la Fundación Valle de Zegzel inicia un proyecto de acondicionamiento y musealización para su apertura al público con la creación de un importante centro de recepción y de usos de los recursos naturales en el entorno de la cueva y su interior por la Fundación, junto a las instituciones locales, regionales y nacionales. Al mismo tiempo el equipo de la Fundación crea un grupo de trabajo para la exploración e investigación de la Grotte du Zegzel, formado por espeleólogos e investigadores de España, Francia



y Marruecos, llegando a explorar y topografiar galerías y sifones alcanzado 1.929m de recorrido (Kadiri *et al.*, 2018, 2019, 2021 y 2022).

## La cavidad

La cavidad está formada por tres pisos, los dos superiores van en dirección Este-Oeste y el inferior y más largo de Norte a Sur, con un recorrido explorado de 1929 m (Kadiri, 2021). Las grandes dimensiones de la cueva, su belleza, su larga historia y la presencia de agua la hicieron famosa incluso más allá de la región. Las zonas acondicionadas son los dos pisos superiores y una pequeña parte hacia la salida del piso inferior. En el nivel superior se han encontrado recientemente grabados prehistóricos (Aouraghe *et al.*, 2021a y b). Los niveles superiores se encuentran afectados por una acusada erosión-corrosión (Audra *et al.*, 2018-21), estos son los que se encuentran habilitados para las visitas, con un recorrido de 354 m.

El nivel inferior, Galería del Río de 940 m de recorrido, no se encuentra acondicionado para las visitas, para su acceso, se requiere realizar un pequeño descenso vertical.



Figura 1. Manantial de salida de la Grotte du Chameau.

## Características de origen hipogénico-hidrotermal

### Metodología

La cavidad tiene tres niveles de galerías (figura 1). Dos niveles superiores de dirección Este-Oeste, con espeleotemas epigénicos y grandes cúpulas en el techo, estas galerías se encuentran fuertemente erosionadas y con intensos procesos de corrosión que afectan incluso a los espeleotemas, la presencia de grandes cantidades de guano antiguas ha supuesto un importante aumento de la acidez ambiental acelerando y ampliando estas fuertes corrosiones (Audra *et al.*, 2018 y 2021, Barriquand *et al.*, 2018).

El nivel inferior la galería del Río, este nivel va en dirección N-S y es el más largo de la cavidad 940m, es recorrido por un río intermitente que varias veces al año se desborda e inunda la galería inferior, se ha localizado espeleotemas hipogénicos dentro y fuera del agua.

La metodología utilizada ha consistido en documentar gráficamente morfologías y espeleotemas y situarlos en la sección del plano de la cavidad, marcando con símbolos su situación (figura 2). Se ha utilizado diversa bibliografía especializada para identificar y en su caso constatar su origen, se han realizado medidas de temperatura, humedad y CO<sub>2</sub> en aire y agua.

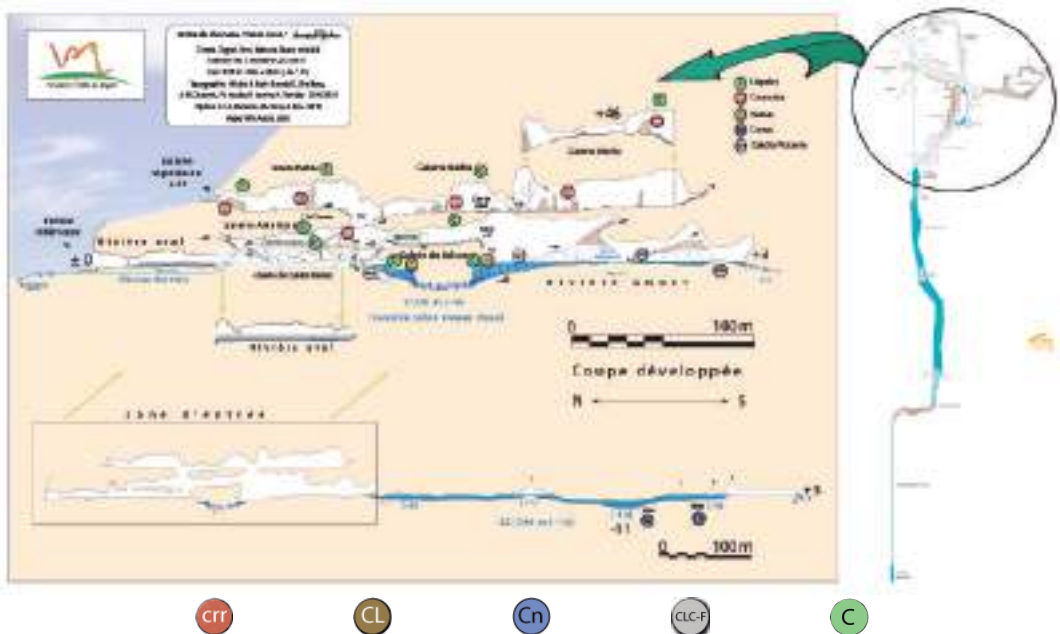


Figura 2. Sección Grotte du Chameau con los tres pisos que la forman y distribución de las distintas morfologías y espeleotemas de origen hipogénico-hidrotermal. Leyenda de iconos: (C) cúpulas techos, (crr) corrosión de espeleotemas, (CL) nubes, (Cn) conos bajo el agua, (CLC-F) calcita flotante.



Figura 3. A: Piso superior galería acceso, B: Galería Nadia, C: Galería Nadia. Espeleotemas epigénicos afectados por la fuerte corrosión ambiental y guano fósil en suelo (fotos: M. Tremiño).

Se han constatado algunos indicadores de procedencia de aguas profundas, como es la temperatura del agua y las cantidades de calcita que arrastra en las crecidas.

En la cavidad se encuentran morfologías asociadas al hidrotermalismo y la convección ácida ambiental, como son cúpulas de convección, cúpulas de colapso y canales de cúpulas.

Espeleotemas de origen hipogénico-hidrotermal, encontrados en varias zonas de las galerías del Río, nubes adosadas en paredes y techos, canales de burbujas de desgasificación y otros elementos como son calcita flotante sedimentada y conos sumergidos.

## Morfologías en las Galerías Superiores

En los techos de los dos pisos superiores se encuentran grandes conjuntos de cúpulas, es en estas zonas donde hay una mayor presencia de los procesos corrosivos, espeleotemas fuertemente erosionados, paredes. Esta corrosión afecta de un modo intenso a paredes y techos, siendo probable que algunos espeleotemas primarios hipogénicos-hidrotermales hayan podido desaparecer (figura 3).

### Cúpulas

A pesar de estos intensos procesos erosivos-corrosivos en los pisos superiores, se localizan conjuntos de grandes cúpulas en los techos, (foto 3A), Bini (2007) las clasifica como de tipo erosivas y sostiene que "este tipo de cúpulas están ligadas a una erosión mecánica predominante, asociada a la corrosión, por aguas turbulentas cargadas de burbujas de aire". Por otro lado, recientes estudios (Audra *et al.*, 2018-2021, Barriquand *et al.*, 2018), indican que esta fuerte corrosión, viene también dada por la presencia de acumulaciones de guano que aumentan la acidez ambiental que junto a la humedad y cambios térmicos que generan pequeñas corrientes en la temperatura/humedad, son factores

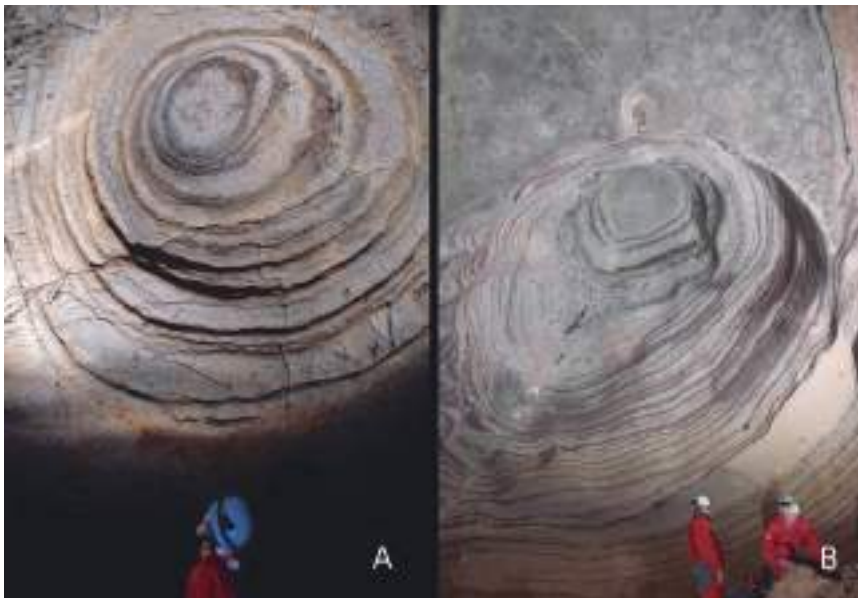
determinantes en el aumento de la corrosión, haciendo desaparecer espeleotemas y generando grandes cúpulas de convección en los techos (figura 4B).

### *Canales de cúpulas*

En los pisos superiores también se observan canales de cúpulas, (figura 4C) estas se describen por procesos térmicos, ricos en vapor de agua y saturada de CO<sub>2</sub> y que corroen la roca formando cúpulas seguidas, esto domos también han sido descritos por (Rudnicki, 1979) y (Quinif, 1976) como cúpulas hidrotermales relacionadas con la convección térmica



*Figura 4. A: Conjunto cúpulas galería superior. B: Conjunto cúpulas y suelo con depósitos de guano fósil, galería Nadia. C: Canal de cúpulas Galería Nadia. (fotos: M. Tremiño).*



*Figura 5. A: Cúpula de colapso Galería Amélineau, B: Cúpula de colapso en galería del Río junto al sifón 2. (fotos: A. Ros y J.L. Llamusí).*

## *Cúpulas de colapso*

También llamadas "gliptogenéticas", su formación está condicionada por la estratificación horizontal de los estratos, una de ellas se encuentra justo encima del sifón 2 (figura 5B) con una importante influencia de ambientes muy húmedos (periodos de crecidas) y secos periodos de estiajes, junto con el aumento del CO<sub>2</sub> de las aguas de crecida. Por otro lado, en la galería Amélineau (piso intermedio) hay cúpulas de colapso de menor tamaño, (foto 5A) las condiciones ambientales son distintas en estas galerías, dado que no esta tan expuesta a los fuertes cambios de humedad y CO<sub>2</sub> de las crecidas que hay en el piso inferior en la salida del sifón S2. Zona inferior, Galería del Río

## *Calcita flotante, Nubes*

El nivel inferior la galería del Río Este discurre en dirección N-S y es el más largo de la cavidad 940 m, es recorrido por un río intermitente que varias veces al año se desborda



*Figura 6. Calcita flotante Galería del Río. A: Lámina de calcita flotante sobre el sifón 2. B: Finas láminas de calcita flotante que quedan depositadas tras la bajada de los niveles de agua. C: Depósitos acumulados de calcita flotante en el suelo de la Galería del Río (fotos: A. Ros).*



*Figura 7. A: Nubes adosadas en pared con canales de desgasificación. B: Nubes adosadas en pared y techo, en el techo una burbuja de aire. C: Nubes adosadas en techo, los canales de desgasificación convergen en burbujas de aire (fotos: A. Ros).*

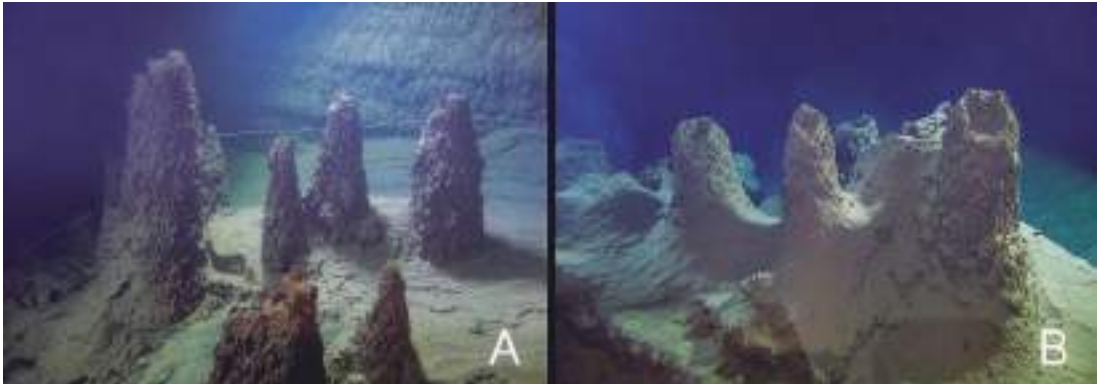


Figura 8. Conos bajo el Agua, galería del río. A: conjunto de conos, B: detalle de conos con *Cunulites* en el borde superior. (Fotos J.L. Llamusi).

e inunda la galería inferior (caudal estimado  $Q_{max} > 1 \text{ m}^3/\text{s}$  (Audra *et al.*, 2021), especialmente en invierno, en estos periodos de inundación las aguas vienen cargadas de calcita (figura 6A), cuando descienden quedan depositadas en suelos y paredes (figura 6B, C). En estas galerías hay zonas con concentraciones de espeleotemas adheridos a las paredes con formas de “nubes” y entre ellas multitud de pequeños canales de burbujas ascendentes que convergen en zonas donde se forma una burbuja de aire cuando suben las aguas, creando un vacío (figura 7B, C), este tipo de espeleotemas los canales de desgasificación se asocian como indicadores de una espeleogénesis hipogénica (Audra *et al.*, 2002 y 2009). En el suelo se suelen depositar finas capas de calcita, que cuando vuelve a entrar en carga la galería son arrastradas para dejar nuevas capas al bajar los niveles. La temperatura de la cueva es de  $19^\circ\text{C}$ , el agua del río es de  $25,9^\circ\text{C}$ .

### Conos

Bajo el agua y en la galería del sifón 2 se han encontrado unos conjuntos de conos bajo el agua (figura 8A, B), estos de una altura aproximada de un metro, se encuentran erosionados por “goteo” en el extremo superior (foto 7B) formando “Cunulites”, debido a periodos de sequía del agua que coinciden con el goteo de los techos de la cavidad, este tipo de “*cunulites*” en conos se han localizado en otras cavidades de origen hipogénico como la Sima de la Higuera, España (Gázquez *et al.*, 2012 y 2013), en Kalahroud Cave, Irán se documentan conos con *cunulites* en los bordes (Bahadorinia *et al.*, 2016), en estas dos referencias los conos y *cunulites* en bordes se encuentra en superficie aunque hay evidencias de periodos inundados en ambas cavidades; en Grotte du Chameau se han localizado bajo el agua.

## Los grabados parietales de la Grotte du Chameau (Zegzel, Berkane, Marruecos) (por M. Aouraghe)

Se trata del hallazgo de un pequeño conjunto de arte parietal, aparentemente prehistórico, situado en la Grotte du Chameau en el Valle del Zegzel, provincia de Berkane, al este



Figura 9. Fotografía y resalte de los grabados encontrados en la Grotte du Chameau (foto: M. Aouraghe).

de Marruecos. La cavidad integra un importante conjunto kárstico, que fue catalogado dentro del Patrimonio Nacional en diciembre de 1951, y ha sido objeto de diversos estudios de carácter geológico, espeleológico, y más recientemente arqueológico.

En diciembre 2012, H. Aouraghe de la Universidad Mohamed I en Oujda y Ramon Viñas del Institut de Paleoeecologia Humana y Evolució Social en Tarragona) localizan grabados parietales prehistóricos en la cueva (Aouraghe *et al.*, 2021a y b).

Los grabados parietales, descubiertos en el interior de la Grotte du Chameau, se localizan en la pared norte de la galería superior y a unos 50 m de su entrada Constituyen un pequeño panel que ocupa un área de unos 75 cm de longitud por 35 cm de altura aproximada.

Recientemente, en 2021, se han localizado otros grabados similares a los primeros en otras galerías en distintos niveles de la cueva. Por lo tanto, lo que obliga a escanear todas las paredes de esta cueva y estudiar más profundo esta cueva; quien aún no ha revelado todos sus secretos.

También podremos, en un futuro próximo, realizar el análisis fotogramétrico para el descubrimiento de posibles pinturas rupestres que estarían ocultas.

El dispositivo gráfico del pequeño panel está integrado por unos 15 elementos (entre unidades y agrupamientos) que se reparten en dos tipos de representaciones (figura 9). Estos pueden ser clasificados, por un lado, en el marco de convenciones figurativas o semifigurativas, en particular formas de posibles zoomorfos incompletos y, por otro lado, grafías geométricas o signos que aparecen vincularse a los citados motivos faunísticos. En nuestra opinión, el primer grupo muestra características prehistóricas.

Tal como hemos señalado, el dispositivo gráfico contiene 15 registros (entre unidades y agrupamientos). Hasta ahora, las similitudes sobre el contenido temático con otros grupos en Marruecos u otras partes del norte de África son inexistentes.

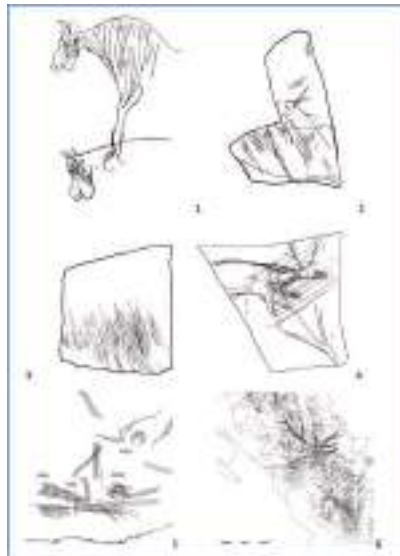


Figura 10. Ejemplos de similitudes conceptuales con arte paleolítico (parietal i mueble): 1. Animales fantásticos, *Tuc-d'Audoubert* (Begüen y Breuil 1958); 2-3 Plaquetas con incisiones finas, *Cueva del Parpalló* (Villaverde 1994); 4. Plaqueta con haces de trazos finos sobre motivo figurativo. *Cueva del Parpalló* (Villaverde 1994); 5. Haces de líneas rectas y sinuosas, *Cueva Cosquer* (Clottes y Courtin 1994); 6; Trazos finos sobre motivos figurativos, detalle de una roca del conjunto de *Penascosa, Vale de Cõa* (Baptista y Varela 1997).

Hasta el momento, no hemos tenido noticias de analogías gráficas con otros conjuntos subterráneos del territorio marroquí o del Magreb. Sin embargo, en otras regiones del Mediterráneo y de Europa hemos encontrado similitudes técnicas, temáticas y convenciones tipológicas con el arte rupestre del paleolítico y epipaleolítico europeo.

Ante estas anotaciones, los aspectos conceptuales, estilísticos, temáticos y técnicos del dispositivo gráfico sugieren semejanzas con determinados modelos del arte Paleolítico superior y Epipaleolítico europeo (figura 10).

De llegarse a confirmar este supuesto, en próximas investigaciones —una temporalidad equivalente al ciclo del Paleolítico superior— el hallazgo representaría, no solo el único



caso de arte prehistórico en el interior de una cueva, conocido en Marruecos, sino el primero en territorio norteafricano.

### *Perspectiva*

Se hace necesario continuar con los trabajos de estudio y exploración en la cavidad con el fin de localizar otros posibles paneles y, con ello, poder ampliar la información del dispositivo gráfico de la cueva de Zegzel. Asimismo, y teniendo en cuenta el contexto arqueológico de la región, será preciso emprender un proyecto cronométrico en torno a los grabados que nos ocupan.

## **Conclusiones**

Los elementos espeleogenéticos y morfológicos de la Grotte du Chameau evidencian patrones de cuevas hidrotermales, cuyo origen está relacionado con procesos profundos, arrastrados por las crecidas y desbordamientos del río, estos procesos han dejado evidencias del origen hidrotermal, nubes adosadas a paredes, canales de desgasificación, conos y que solo se localizan en las zonas activas por el agua, en el piso inferior, indicativos de una espeleogénesis de origen hipogénico-hidrotermal.

Los pisos superiores han tenido procesos erosivos-corrosivos muy acusados, por los restos de guano encontrados, este ha tenido un aporte importante en la corrosión ambiental (Audra *et al.*, 2018 y 2021), grandes cúpulas, corrosión en espeleotemas y paredes, procesos que no se dan tras las galerías aéreas encontradas tras el sifón S2. En las galerías superiores hay presencia de espeleotemas epigénicos afectados por la corrosión (Fotos 2A, B, C).

En la Grotte du Chameau se pueden observar dos procesos espeleogenéticos, por un lado, las galerías superiores con espeleotemas epigénicos y una alta erosión corrosión, que no se corresponde con el resto de la cavidad como son las galerías inferiores y las que se encuentran tras el sifón.

Futuras exploraciones de las galerías tras los sifones ampliarán el conocimiento de los mecanismos espeleogenéticos de esta cavidad.

El hallazgo de un panel de arte rupestre con grabados parietales, de concepción figurativa, semifigurativa y geométrica, en el interior de una cavidad subterránea se convierte en una interesante novedad, no solo para Marruecos sino para todo el Norte de África. Por tanto, su conocimiento crono-cultural adquiere un aspecto de gran relevancia para la investigación del arte rupestre norteafricano.

## **Agradecimientos**

José L. Carcelén, Marisa Aldeguer, Alba Sánchez, Diego Jódar, Michel Renda, Marie Renda, Philippe Audra, Daniel Chailloux, Lionel Barriquand, Vicente Guardiola, Roberto

Trives. Ayuntamientos de Zegzel y Tafoughalt, Autoridades de la provincia de Berkane y Gobierno de Marruecos.

## Referencias

- Audra, P., Bigot, J., Mocochain, L. (2002). Hypogenic caves in Provence (France). Specific features and sediments. *Acta Carstologica*, 31, 33-50. Postojna, Eslovenia.
- Audra, P., Mocochain, L., Bigot, J., Nobécourt, J.C. (2009). The association between bubble trails and folia: A morphological and sedimentary indicator of hypogenic speleogenesis by degassing, exemple from Adaouste Cave (Provence, France). *International Journal of Speleology*, 38, 93-102.
- Audra, P., Heresanu, V., Barriquand, L., El Kadiri, M., (2018). Bat guano minerals (sulfates/ phosphates) in Chameau Show Cave (Morocco). 26th *International Karst School "Milestones and Challenges in Karstology"*, Postojna, Karst Research Institute (IZRK), Poster.
- Audra, P., Heresanu, V., Barriquand, L., El Kadiri, M., Jaillet S., Pons-Branchu E., Bosak P., Lawrence, E., Renda M. (2021). Bat guano minerals and mineralization processes in Chameau Cave, Eastern Morocco, *International Journal of Speleology*, 50, 91-109. Tampa USA.
- Aouraghe, H., Viñas, R., Abdelhadi, E., Aicha, O. (2021a). Primeras evidencias de arte rupestre prehistórico en la cueva del Camello (Zegzel, Berkane, Marruecos). *Cuadernos de Arte Prehistórico*, España. ISSN-7019-7012, 2021.
- Aouraghe, H., Viñas R., Ewague. A., Oujaa, A. (2021b). The préhistoric rock art of Grotte du Chameau in Eastern Morocco. *International Newsletter on Rock Art (INORA)*, 90, 20-27.
- Bahadorinia, S., Hassen Hejazi, S., Nadimi, A., Ford, D., Wainer, K. (2016). The morphology and development of Kalahroud Cave, Iran. *International Journal of Speleology* 45, 243-257. Tampa USA.
- Barriquand, L., Audra, P., El Kadiri, M., Boutchich, M. (2018). *Preliminary results on aerology and condensation in Chameau Cave, Zegzel Valley, Eastern Morocco*. 26th International Karst School "Milestones and Challenges in Karstology", Postojna. Karst Research Institute (IZRK), Poster.
- Basset, H. (1920). *Le culte des grottes au Maroc*. Faculté des Lettres d'Alger.
- Baptista, A.M., Varela (1997). *Arte rupestre*. In: *Arte Rupestre e Pré-Historia do Vale do Côa, Trabalhos de 1995-1996*, Joao Zilhao (Coord.). Ministerio de Cultura.
- Bégouën, R., Breuill H. (1958). Les cavernes du Volp. Trois-Frères. Tuc d'Audoubert. *Arts et Paris: Métiers Graphiques*, 201-205.
- Bini, A. (2007). Morphologie et genèse de quelques types de coupoles. *Actes du 17e Rencontre d'Octobre*. Orgnac.
- Boenlé, J. (1983). Maroc 82. Expédition de reconnaissance organisée par le groupe de l'Aragnado. *InfoPlongée*, 37, 11.
- Clottes, J., Courtin, J. (1994). *The Cave Beneath the Sea. Paleolithic Images at Cosquer*. Harry N. Abrams, Inc., Publishers. Éditions du Seuil. Paris,
- Gázquez, F., Calaforra, J.M., Rull, F., Martínez-Frías, J. (2012). Espeleotemas y evidencias de cavernamiento hipogénico de la Sima de la Higuera (Pliego, Murcia). *Congreso Nacional sobre cuevas turísticas, Cuevatur 2012*, ACTE: 283-294. Palencia.
- Gázquez, F., Calaforra, J.M. (2013). Hypogenic speleogenesis and speleothem of Sima de la Higuera Cave (Murcia, South-eastern Spain). *16th International Congress of Speleology*, 3, 78-83. Brno.
- G.S.B.M. - Groupe Spéléo Bagnols Marcoule (1984). *Boletín GSBM núm. 11*, Francia.
- Kadiri El, M., M. El Ahmadi, Ros, A., Llamusi, J.L., Calaforra, J.M., Sánchez, A., Amorós, J. (2018). La Grotte du Chameau, Valle de Zegzel, Marruecos. *VII Congreso CUEVATUR*, 353-362. Vall de d'Uixo, Castellón.
- Kadiri El, M., El Ahmadi, M., Llamusi, J.L., Ros, A. (2019). *Grotte du Chameau*. Memoria año 2019, Fundación valle du Zegzel, Maroc (inédito).
- Kadiri El, M., Ros, A., Llamusi, J.L., Ahmadi, M., Tremiño, M., Aldeguer, M., Soto, J., Sánchez, A. (2021). Spéléothèmes d'origine hypogénique dans la Grotte du Chameau, Rivière Galerie, Berkane, Maroc. *2ème Congrès National de Spéléologie, Géotourisme et Valorisation des Ressources Naturelles Sous le thème : Karst Arts Spéléologie et Enjeux de Développement*, Oujda Maroc.
- Kadiri El, M., Ahmadi, M., Ros, A., Llamusi, J.L., Amorós, J., Tremiño, M. (2022). La Grotte du Chameau et les Pigeons - Maroc. Project de turisme nature. *18th International Congress of Speleology*. France.
- Villaverde, V. (1994). *Arte Paleolítico de la Cova del Parpalló, Estudio de la colección de plaquetas y cantos grabados y pintados*. Servei d'Investigació Prehistòrica, Diputació de València. Vol 1: 404 pp, Vol 2: 484 pp.

# La implementación tecnológica en Coves de Sant Josep (La Vall d’Uxió, Castelló)

Alba M. FAS BOTIAS <sup>(1)</sup>, Jorge GARCÍA FERNÁNDEZ <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Coves de Sant Josep, Paratge de Sant Josep, s/n. 12600 La Vall d’Uxió, Castelló.  
direccion@covesdesantjosep.es

<sup>(2)</sup> Concejalía de Turismo y Desarrollo Económico, Ayuntamiento de La Vall d’Uxió  
info@lavallduixo.es

---

## Resumen

En el contacto de la planicie y la elevación de la Serra d’Espadà, en la Vall d’Uxió, provincia de Castellón y en pleno corazón del Mediterráneo, se ubican los Coves de Sant Josep, cuyo río subterráneo presenta unas aguas glaucas, en un entorno único de la Comunidad Valenciana. La pandemia de la COVID-19 ha obligado a marchas forzadas al cambio de nuestros procesos de trabajo y al rediseño de las visitas a las cuevas turísticas españolas en general y de Coves de Sant Josep en particular. Durante gran parte de 2020 y durante 2021 los gestores de dichos recursos se han adaptado a los cambios de aforos y restricciones que la legislación indicaba, con actualizaciones permanentes. Menos visitantes y más calidad en las visitas, esa ha sido la tónica de estos dos años, en el que la perspectiva del visitante se ha podido obtener con métricas y datos estadísticos. La implementación de la tecnología en las cuevas turísticas ofrece un abanico amplio de posibilidades para la gestión eficiente y sostenible del recurso. Venta online y anticipada, procesos de reserva, apps, sistema de sensores en la iluminación, mapas de calor, sistemas de información digitales, medidores de parámetros y la llegada del metaverso amplían una perspectiva infinita de mejoras sostenibles, acordes con la evolución tecnológica del siglo XXI.

**Palabras Clave:** cuevas turísticas, inteligencia tecnológica, metaverso, sostenibilidad, visitante.

## ***Technological implementation in Coves de Sant Josep***

### ***Abstract***

*In the contact of the plain and the elevation of the Serra d’Espadà, in the Vall d’Uxió, province of Castellón and in the heart of the Mediterranean, the Coves de Sant Josep are born, whose underground river presents glaucous waters located in an environment unique in the Valencian Community. The COVID-19 pandemic has forced a forced march to change our work processes and redesign visits to Spanish show caves in general and Coves de Sant Josep in particular. During much of 2020 and during 2021, the managers of these resources have adapted to the changes in capacity and restrictions that the legislation indicated, with permanent updates. Fewer visitors and more quality visits, that has been the trend of these two years, in which the visitor’s perspective has been obtained with metrics and statistical data. The modeling of the digital transformation*

*of tourist attractions has advanced further and has sought to generate intelligence: smart beaches, smart natural spaces, smart festivals and why not, smart caves. The implementation of technology in tourist caves offers a wide range of possibilities for the efficient and sustainable management of the resource. Online and advanced sales, reservation processes, apps, lighting sensor systems, heat maps, digital information systems, parameter meters and the arrival of the metaverse expand an infinite perspective of sustainable improvements in line with the technological evolution of the 21st century.*

**Keywords:** *metaverse, show caves, sustainability, technological intelligence, visitors.*

## **Introducción: Un nuevo paradigma**

La pandemia de SARS COV-2, declarada en marzo de 2020, ha supuesto un antes y un después en el mundo del turismo en general y, sobre todo, en la relación entre el activo turístico y el visitante (Robledo y Botias, 2021). Esto ha dado lugar a un nuevo paradigma que emerge dando un nuevo sentido al concepto de visita turística a una atracción en general y, muy particularmente, a un monumento natural.

La pandemia se ha vinculado durante estos dos últimos años a un proceso de cambio de naturaleza negativa: enfermedad, pérdidas de seres queridos, confinamiento, recesión económica y muchos más. Pero, sin embargo, ha abierto un nicho de oportunidad asociado a los rápidos cambios que ha experimentado el mundo del turismo. Ha sido necesario reinventar las visitas turísticas a atracciones naturales, pero especialmente a cuevas turísticas por la singularidad de las mismas. Las visitas han sido menos numerosas, más contemplativas y han buscado elementos innovadores para atraer y sorprender al visitante.

En este proceso de cambio tan rápido la implementación de tecnologías con sistemas inteligentes y muchos autónomos (audioguías, locuciones interactivas, sistemas remotos de control y acceso etc.) ha sido el eje que ha vertebrado y dinamizado de nuevo el turismo subterráneo en cuevas (Robledo y Botias, 2021). En 2022, este tipo de sistemas y algunos otros novedosos se han consolidado, ofreciendo un tipo de visita distinta que, de acuerdo con la percepción del visitante analizada mediante estadísticas y métricas, ha mejorado la calidad de la vista a las cuevas turísticas.

## **Evolución del proceso de adaptación de las visitas turísticas como consecuencia de la pandemia.**

Se denomina reinención al proceso por el que se somete a una nueva ideación algo existente. Tras la revisión de cómo ha evolucionado y como han ido adaptándose las vistas turísticas, podemos afirmar que estas se han reinventado, ofreciendo un producto distinto a la vista clásica mayoritaria que se venía ofreciendo en los últimos años (Robledo, y Durán, 2018).

El turismo ha pasado a ser un sector vital en España en estos últimos años, ha pasado de representar un 7% del PIB a un 12% del mismo en muy pocos años.

El sector turístico es un segmento económico vital de un territorio. Este hace referencia al sector que engloba a todas las empresas relacionadas con el turismo. Es decir, empresas de hostelería, transporte y restauración, con todos los recursos turísticos que aglutina, entre ellos las cuevas y minas turísticas españolas. Por ello, como se ha comentado anteriormente, la pandemia ha dado lugar a un proceso de reinención, de volver a poner en jaque al tesoro natural que representan las Coves de Sant Josep.

Desde 2018, las Coves de Sant Josep apostaron por los nuevos modelos de turismo, enfocados en la inclusión, la investigación, la tecnología y la innovación. Acciones como el cambio del sistema de iluminación, que mejoraba la visualización de los elementos que componen la cueva y un ahorro de alrededor de un 80% en gasto eléctrico (Navarrete *et al.*, 2018) o la reducción del mal verde en las rocas mediante técnicas de limpieza y productos derivados de la investigación científica por técnicos del IGME-CSIC, son un ejemplo de lo que la nueva era tecnológica puede aportar al sector turístico y al geoturismo ligado a cavidades.

En las Coves de Sant Josep también se han implantado sistemas como la realidad aumentada o realidad virtual, como complementos del turismo inclusivo, con el objetivo de que el turista viva la realidad natural y dejen de ver la vida y las cuevas a través de una pantalla.

El 3 de septiembre de este año 2022, se cumplieron 125 años de la primera exploración documentada. En 1987, el ingeniero José Gimeno inició una exploración para averiguar de dónde procedía el agua de la cueva, antes conocida como la Font de Sant Josep (Robledo y Durán, 2018). Actualmente, se sigue trabajando con equipos de espeleobuceadores para resolver ese misterio. En los últimos 7 años, se han descubierto más de 100 m de galerías en 12 exploraciones y se sigue impulsando este tipo de trabajos para saber más sobre uno de los ríos subterráneos navegables más largos del mundo. Para ello hemos contado con un grupo de expertos geólogos, espeleólogos y espeleobuceadores que se desplazan en cada expedición desde todos los rincones de España. Las Coves de Sant Josep se han convertido en un lugar de encuentro para el descubrimiento, investigación, conservación y respeto a la cuarta dimensión de la naturaleza como acertadamente subtítulo el libro "Karst y Cuevas" (Robledo, 2022).

El reciente Convenio firmado con el IGME-CSIC que depende de la Administración General del Estado (AGE) española, Ministerio de Ciencia e Innovación, pone de manifiesto que somos ciencia y trabajamos para la ciencia.

Con la nueva instalación en 2022 de sistemas de medición y sensores de última generación para el estudio de la calidad del aire y el agua, junto con el estudio de otros parámetros medioambientales y climáticos o realizar análisis hidrológicos y así poder contribuir en la necesaria adaptación al cambio climático.

## La Implementación tecnológica en la cueva y el estudio del impacto climático

Desde octubre de 2018, Coves de Sant Josep inició las obras de adecuación de la iluminación y la instalación de fibra óptica en todo el recorrido de visita turística (figura 1). La sustitución de la antigua iluminación, que tenía más de 40 años, por tecnología LED pone a la cueva en la vanguardia mundial en el uso de tecnologías punteras en cuevas turísticas. Con la instalación se ha conseguido unas condiciones más adecuadas y respetuosas, sumando un ahorro energético y económico de un 80% en la facturación eléctrica.



*Figura 1. Instalación nueva iluminación y sistema de fibra óptica Coves de Sant Josep.*

Trabajos especializados y muy minuciosos realizados por expertos en iluminación subterránea se desplazaron hasta las Coves de Sant Josep para realizar las labores de instalación a través de la empresa especializada alemana *Cave Lighting*.

También, se han instalado sensores de detección de movimiento de las barcas en las que se realiza la vista, para su geolocalización en el interior a través de unos dispositivos móviles que permiten realizar un protocolo de evacuación y la implementación de un sistema *bluetooth* a través de una red de fibra óptica. Toda esta adecuación tecnológica hace de las Coves de Sant Josep un espacio natural de varias decenas de miles de metros cuadrados y casi dos kilómetros de longitud adaptado a las nuevas necesidades del siglo XXI.

A la reciente firma del Convenio entre el IGME-CSIC y el Ajuntament de la Vall d’Uixó para la investigación científica de la cavidad, se une la visita institucional a la zona no

turística y también al recorrido no visitable de la Ministra de Ciencia e Innovación, Dña. Diana Morant Ripoll el pasado 8 de septiembre de 2022, acompañada de la Presidenta del CSIC, la Delegada y Subdelegada del Gobierno de la Comunitat Valenciana, Juan José Durán como investigador y geólogo del IGME-CSIC y otros directivos y acompañantes (figura 2). Tras la visita, las autoridades ministeriales junto con las de la corporación local, y conociendo sobre el terreno la singularidad de la cueva, anunciaron una mayor inversión en los proyectos de investigación, articulados en 7 líneas de investigación.

El objeto de dicho convenio es establecer el marco de colaboración y cooperación entre el



*Figura 2. Visita del 8 de Septiembre 2022, con la presencia de la Ministra Ciencia e Innovación a las Coves de Sant Josep.*

Ayuntamiento la Vall d'Uixó y el Centro Superior de Investigaciones Científicas-Instituto Geológico Minero de España (CSIC-IGME) para la realización de diferentes actividades científico-técnicas en les Coves de Sant Josep, La Vall d'Uixó, Castellón. Algunas de las actividades técnico-científicas en les Coves de Sant Josep.

- a. Seguimiento y análisis micro climáticos de les Coves de Sant Josep: CO<sub>2</sub>, humedad y temperatura
- b. Análisis de los parámetros hidrológicos e hidrogeológicos generales y concretos de les Coves de Sant Josep.
- c. Estudios con relación a las figuras de protección legal y asesoramiento en la gestión del patrimonio geo ambiental y otros elementos de gestión y estructura de la cavidad.
- d. Contribución con los datos existentes por parte del Ayuntamiento la Vall d'Uixó previos a este estudio, con el objetivo mejorar e incrementar la infraestructura de

bases de datos del CSIC-IGME en particular y del conocimiento en general de las diferentes áreas de trabajo en el CSIC-IGME en general.

e. Difusión y divulgación de los resultados obtenidos de acuerdo con lo que establezcan ambas partes. Entre otras actividades se busca la realización de mapas temáticos, la documentación y análisis de registros microclimáticos y fisicoquímicos, así como el estudio de espeleotemas (formaciones geológicas producto de la disolución de la roca caliza y precipitación del carbonato cálcico contenido en agua) y su formación.

f. Por último, toda inversión pública debe tener un retorno social, así que las dos instituciones tienen previsto la publicación de un libro técnico, científico y divulgativo de los trabajos y avances obtenidos en la investigación de las Coves.

Estos trabajos permitirán profundizar en el funcionamiento ambiental de Coves de Sant Josep y analizar el impacto de la actividad turística a fin de corregir los efectos no deseados. También, contribuirá al diseño de nuevas modalidades de visita que mejoren la experiencia del turista, con material divulgativo que enriquezca el compromiso de calidad y experiencia con el visitante.

El ayuntamiento de La Vall d'Uixó está comprometido con la investigación en su ámbito competencial, creando sinergias con otras administraciones, universidades e instituciones públicas. Este convenio es una clara apuesta por la sostenibilidad e investigación de un monumento natural con actividad turística subterránea.

## **La perspectiva de las personas que nos visitan**

Coves de Sant Josep, casa y fuente de vida de nuestros ancestros es un viaje en el tiempo con hallazgos paleontológicos de hace más de 17.000 años.

A partir de los años 50 del siglo XX, se comienza a visitar turísticamente mediante un sistema de pasarelas que llegaban tan sólo hasta la boca del *forn*, pero hay un documento que indica que en los años 20 ya se aprobó la primera tasa turística para dicha visita.

Desde su apertura al público hasta la fecha, las Coves de Sant Josep han sido visitadas por millones de personas, convirtiendo a esta cavidad en un referente turístico y natural de la Comunitat Valenciana y del territorio español. Actualmente, es la segunda cueva de titularidad pública con más visitantes de España, por detrás de La Cueva de Nerja.

Actividades complementarias y la diversificación de la oferta turística desde 2015 las ha convertido en un referente cultural, de ocio y aventura con la visita denominada Espeleokayak o el festival musical de pequeño formato, *Singing in the Cave*, que este 2022 ha celebrado su 7ª Edición. Gracias al diseño del formato fue de los únicos festivales de música españoles que se realizaron durante el verano 2021 durante la pandemia.

El departamento de Turismo de la Comunitat Valenciana, con el que se viene colaborando estrechamente estos últimos años impulsa a través de Invat.tur la modelización de la





Figura 3. Actividad sostenible Espeleokayak

transformación digital de los atractivos turísticos, avanzando más allá y buscando la generación de inteligencia. Estos espacios suponen una actividad que integra al turismo, el ocio y la tecnología.

Playas inteligentes, espacios naturales inteligentes o festivales inteligentes, 3 modelos de actividad turística que han apostado por la tecnología y la innovación y que podrían encajar perfectamente en nuestro recurso y modelo turístico subterráneo. Un ejemplo ideado para la cavidad es el festival musical *Singing in the Cave*, como Festival Inteligente.

## ¿Qué es una cueva inteligente (*Smart Cave*)?

Una cavidad denominada "inteligente" es un concepto nuevo, basado en la sostenibilidad y que se puede definir como un activo natural subterráneo capaz de responder a las necesidades básicas de las personas en el plano operativo, social y ambiental. Por tanto, debe estar dotado de una infraestructura tecnológica capaz de facilitar e interactuar con el visitante o el trabajador a través de diversos sistemas tecnológicos de última generación (Robledo, 2022).

Este concepto, nace de la evolución del término *Smartcity* o Ciudad Inteligente, con la dificultad añadida de implantarlo en un espacio natural subterráneo. La visita a una cueva con estas características puede ser de tipo turística o asociada a exploraciones o investigación y supone que enriquezca su atractivo cultural. Es generadora de valor, así como de datos, y mediante la aplicación de tecnologías de la información, comunicación y gestión innovadoras, incrementa su potencial y se convierte en nodo catalizador de

información relevante, que se transmite a herramientas para su gestión y mejora la calidad, sostenibilidad, seguridad y accesibilidad.

Es necesario aplicar la transformación digital de una forma realmente útil, que redunde en mejoras y aporte capacidad para transformar la información en impactos positivos. Una gestión de una cavidad inteligente supone usar las tecnologías más adecuadas, para la prestación de un servicio óptimo y más personalizado.

## Conclusiones

- La tecnología se pone al servicio del desarrollo turístico en los destinos y recursos inteligentes para mejorar la toma de decisiones, la experiencia ofrecida al visitante y la calidad de vida del territorio y recurso.
- Se convierte en la aliada de la sostenibilidad, tanto ambiental como económica y social.
- Las emociones, como la sorpresa de descubrir una cueva, el interés por el visitante y la diversión, cuenta mucho más que el contenido, por lo que los gestores de dichos recursos deberemos aprovecharlas para elevar el grado de motivación del turista al máximo.
- La implantación tecnológica y la innovación en las Coves de Sant Josep, como consecuencia de la pandemia SARS COV-2 y una apuesta por la investigación, ha significado:
  - a) Un cambio en el modelo clásico de visita turística y de gestión de una cueva de titularidad pública. El desarrollo tecnológico en la cueva supone una visita más cercana y sencilla para el turista y facilita la coordinación y, por tanto, el trabajo de los gestores y guías.
  - b) Un avance en la sostenibilidad ambiental del patrimonio geológico e hidrogeológico, con un seguimiento de los parámetros ambientales en remoto y continuo. Esto permitirá dotar de herramientas útiles a los gestores de la cueva para la toma de decisiones.
  - c) Una base robusta en la que culminar el objetivo de que las Coves de Sant Josep se convierten en la primera cueva inteligente (*smart cave*) de España.
  - d) El compromiso y la cooperación de dos administraciones públicas, Ajuntament de la Vall d’Uixó e IGME-CSIC, Ministerio de Ciencia e Innovación, en investigar, innovar y divulgar los activos de la cueva y los datos obtenidos.

e) Proteger y conservar un monumento natural emblemático de la geografía española en general, y del mundo subterráneo en particular, como son las Coves de Sant Josep.

## Referencias

- Botias, A. (2018). Hacia una nueva cultura del turismo sostenible. En: *Cuevas: La flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*, (Robledo y Durán, eds.). VII Congreso Español de Cuevas Turísticas y II Iberoamericano, 293-305.
- De Rodrigo, J. (2013). Ciudades inteligentes: gobierno participativo, sitio digital 'Nueva Tribuna'. <https://www.nuevatribuna.es/articulo/medio-ambiente/ciudades-inteligentes-gobierno-participativo/20130125133255087254.html>
- Navarrete, E., Martín-Rosales, W., Rabaza-Castillo, O., Romero, E., López-Chicano, M., Moya, R., Torres, B. y Guerra, M. (2018). Eficiencia energética del sistema de iluminación de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva), un paso más hacia el turismo sostenible. En: *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad* (Robledo y Durán eds). VII Congreso Español de Cuevas Turísticas y II Iberoamericano, 435-445.
- Robledo, P.A., Durán, J.J. (Eds.). (2018). *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. VII Congreso Español de Cuevas Turísticas y II Iberoamericano. Castellón. 462 pp.
- Robledo, P.A., Botias, A. (2021). Implementación del protocolo frente al COVID-19 en una cueva turística. El ejemplo de las Coves de Sant Josep, La Vall d'Uixó, Castellón y de las Coves de Cala Blanca, Menorca. En: *Workshop: Las Cuevas turísticas ante la pandemia de la COVID-19: un antes y un después*. ACTE y Ajuntament de Campanet. Campanet, Mallorca. Conferencia impartida.
- Robledo, P.A. (2022). *Smart Caves en España. El futuro del turismo subterráneo*. Conferencia FORTEC, 2022. Caixa Fórum; Mallorca, España. Conferencia impartida. (Resumen extendido. In press).



# Control y análisis geoquímico de la precipitación carbonatada actual en la Cueva de Nerja (Málaga, S de España)

Concepción JIMÉNEZ DE CISNEROS VENCELÁ <sup>(1)</sup>, Cristina LIÑÁN BAENA <sup>(2,3)</sup>, Celia TORRES BRAVO <sup>(1)</sup>, Arancha PEÑA HERAS <sup>(1)</sup>, Francisco José JIMÉNEZ ESPEJO <sup>(1)</sup>, Antonio GONZÁLEZ RAMÓN <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR), Avd. de las Palmeras 4, 18100 Armilla, España. concepción.cisneros@csic.es, celiatbravo@gmail.com, aranchaph@iact.ugr-csic.es, fjimenez@csic.es

<sup>(2)</sup> Fundación Cueva de Nerja, Instituto de Investigación, Carretera de Maro, s/n, Nerja, 29787 Málaga, España. cbaena@cuevadenerja.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Ecología y Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, 29071 Málaga, España. crilinbae@uma.es

<sup>(4)</sup> Instituto Geológico y Minero de España (CSIC), Urb. Alcázar del Genil, 4. Edf. Zulema bajo, 18006 Granada, España. antonio.gonzalez@igme.es

---

## Resumen

El análisis mineralógico e isotópico de los precipitados carbonatados actuales, y de las aguas de infiltración, junto con los datos de monitorización y seguimiento instrumental durante los últimos cinco años en la Cueva de Nerja, permiten realizar una evaluación sobre el funcionamiento espeleotémico actual. Este seguimiento revela variaciones estacionales en la temperatura, la humedad relativa y la concentración de CO<sub>2</sub> del aire, que condicionan la tasa de precipitación actual de carbonato. Durante el período estacional primavera-verano se constata una menor tasa de precipitación de carbonatos en las placas de control, coincidiendo con un bajo grado de ventilación natural de la cavidad, una humedad ambiental máxima y una mayor concentración de CO<sub>2</sub> en el aire de la cueva. Por el contrario, durante el período estacional otoño-invierno, cuando aumenta el grado de ventilación de la cueva y la humedad y presión parcial de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se ven reducidas, se alcanzan los valores más altos de tasas de carbonato precipitado. La mineralogía de los precipitados carbonatados corresponde a una alternancia de fases aragoníticas y fases calcíticas, coexistiendo ambas, pero siendo mayoritarios los precipitados aragoníticos. Los análisis de <sup>18</sup>O y <sup>13</sup>C de los precipitados revelan un claro patrón estacional. Por otra parte, los valores de δ<sup>18</sup>O procedentes de los goteos lentos indican un cierto tiempo de residencia de las aguas en el sistema kárstico y reflejan aproximadamente el valor isotópico medio de δ<sup>18</sup>O correspondiente a las aguas de precipitación en el área.

**Palabras clave:** aguas de infiltración, monitorización, precipitación carbonatada actual, tasa de precipitación carbonatada, δ<sup>13</sup>C, δ<sup>18</sup>O

## **Monitoring and geochemical analysis of the current carbonate precipitation in the Nerja Cave (Málaga, S Spain)**

### **Abstract**

*The mineralogical and isotopic analysis of the present carbonate precipitates and seepage water, together with the instrumental monitoring and follow-up data during the last five years in the Nerja Cave, allow an evaluation of the current speleothem functioning. This monitoring reveals seasonal variations in temperature, relative humidity and air CO<sub>2</sub> concentration, which condition the current carbonate precipitation rate. During the spring-summer seasonal period, a lower rate of carbonate precipitation is observed in the control plates, coinciding with a low degree of natural ventilation of the cavity, a maximum ambient humidity and a higher CO<sub>2</sub> concentration in the cave air. On the contrary, during the autumn-winter seasonal period, when the degree of ventilation of the cave increases and the humidity and partial pressure of CO<sub>2</sub> in the atmosphere are reduced, the highest values of precipitated carbonate rates are reached. The mineralogy of the carbonate precipitates corresponds to an alternation of aragonitic and calcitic phases, both coexisting, but with a majority of aragonitic precipitates. The <sup>18</sup>O and <sup>13</sup>C analyses of the precipitates reveal a clear seasonal pattern. On the other hand, the δ<sup>18</sup>O values from the slow drips indicate a certain residence time of the waters in the karst system and approximately reflect the mean δ<sup>18</sup>O isotopic value corresponding to the precipitation waters in the area.*

**Keywords:** dripwater, cave monitoring, active speleothems, carbonated precipitation rate, δ<sup>13</sup>C, δ<sup>18</sup>O

## **Introducción**

Los espeleotemas son capaces de proporcionar información sobre la respuesta de los ambientes terrestres de latitudes medias y bajas al cambio climático global durante el Pleistoceno y el Holoceno. Sin embargo, los estudios de espeleotemas multiproxy han demostrado que en las cuevas pueden producirse complejas interacciones entre procesos directa e indirectamente relacionados con el cambio climático.

Es necesario realizar un seguimiento exhaustivo y prolongado de los entornos de las cuevas modernas para comprender plenamente cómo cada cueva responde a estos procesos en escalas de tiempo estacionales e interanuales, y cómo se conservan las señales ambientales en el carbonato del espeleotema.

A través de la monitorización es posible identificar las variables ambientales y la hidrología actual, permitiendo conocer los factores que condicionan la composición isotópica y geoquímica de los espeleotemas. El desarrollo de las diferentes texturas de los precipitados está relacionado con los mecanismos de crecimiento y con la disponibilidad y composición

de las aguas kársticas y, por tanto, con la dinámica ambiental imperante en la cavidad. La morfología cristalina está condicionada por la variabilidad del flujo de agua disponible, la composición química, la tasa de goteo o la tasa de desgasificación de CO<sub>2</sub> (González *et al.*, 1992; Genty, 1992). El análisis de las texturas, tipologías y mineralogía de los precipitados actuales en cuevas, permite conocer la espeleogénesis reciente y ser análogo natural de los espeleotemas antiguos. Obtener esos datos a escala local es fundamental para conocer qué variables son más importantes en cada cueva de cara a la interpretación posterior de datos paleoclimáticos (Fairchild *et al.*, 2000; Turrero *et al.*, 2004, 2007, 2009; Cruz *et al.*, 2005; Baldini *et al.*, 2008; Baker *et al.*, 2007; Matthey *et al.*, 2008).

## Localización geográfica y geológica

La Cueva de Nerja se encuentra ubicada en el extremo suroriental de la provincia de Málaga (España), a 3 km al Este de la ciudad de Nerja, junto a la localidad de Maro (figura 1a y b). Concretamente, está situada en la estribación meridional de la Sierra Almijara, que pertenece al Parque Natural de las Sierras Tejeda-Almijara-Alhama. La Cueva de Nerja se desarrolla sobre mármoles dolomíticos pertenecientes al Triásico medio que

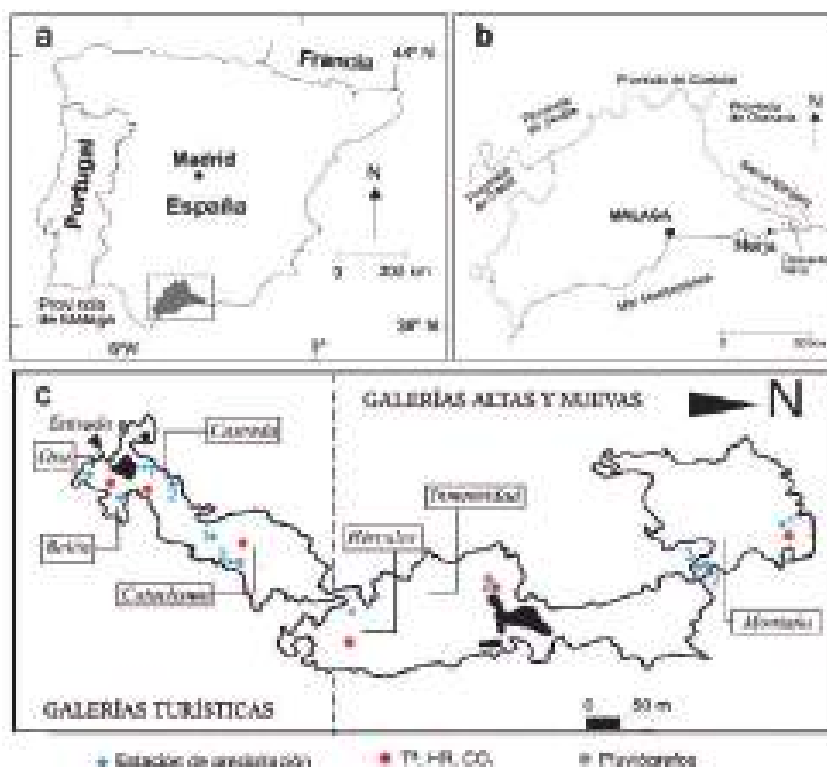


Figura 1. a y b) Localización geográfica de la cueva de Nerja; c) Esquema de la cueva dónde se incluye situación de puntos de precipitación (NP) controlada de carbonatos y de los equipos de monitorización ambiental en la Cueva de Nerja. Leyenda: Ta- temperatura del aire, HR- humedad relativa del aire y CO<sub>2</sub>- concentración de CO<sub>2</sub> en el aire. Los números hacen referencia a las distintas estaciones de precipitado, cuando en la sala existe más de un- dispositivo.

pueden llegar a alcanzar los 400 m de espesor, muy diaclasados y con aspecto sacaroideo en algunas zonas. Por encima de estos mármoles, aparecen otros de tipo calizo, con intercalaciones de calcoesquistos, atribuidos al Trías superior (Carrasco *et al.*, 1998).

La cueva se formó por un proceso de karstificación consecuencia de la infiltración y la circulación del agua de lluvia a través de las grietas y fracturas de los mármoles en los que se desarrolla. La karstificación se produjo a lo largo del Plioceno y Pleistoceno (Carrasco *et al.*, 1998). Durante el Cuaternario, con la alternancia de períodos templados y cálidos, se formaron grandes volúmenes de depósitos de precipitación química (Jiménez Cisneros *et al.*, 2003; Jiménez de Cisneros y Caballero, 2013). Tiene una superficie de 35.000 m<sup>2</sup> y un volumen aproximado de 350.000 m<sup>3</sup>, con un desnivel máximo de 68 m, por lo que su desarrollo topográfico es, a grandes rasgos, prácticamente horizontal. Se encuentra en la zona no saturada del acuífero, encima del nivel piezométrico (Jiménez de Cisneros y Caballero, 2013).

## Metodología

La monitorización de la cueva conlleva el control de variables ambientales externas e internas, y el muestreo periódico de agua de lluvia, agua de goteos y el carbonato precipitado sobre sustratos artificiales. Los datos meteorológicos fueron obtenidos a partir de la estación situada en el entorno de la cueva. Para la monitorización interna de las variables ambientales se utilizaron sensores de temperatura/humedad relativa y pluviómetro. En diferentes áreas estratégicas de la cavidad se situaron los experimentos de precipitación "in situ" utilizando para ello soporte de vidrio (placas Petri) y se realizaron medidas de tasa de goteo. En la figura 1c se especifican los puntos de muestreo del agua de goteo y de carbonatos actuales.

Sobre los precipitados recogidos se realizó un análisis mineralógico por difracción de rayos X (Panalytical X-Pert Prodiffractometer) con radiación Cu K $\alpha$  (45 kV, 40 mA), usando el software XPOWDER®. En el Centro de Instrumentación Científica (Universidad de Granada) se llevaron a cabo los análisis de microscopía electrónica mediante HRSEM (AURIGA de Carl Zeiss SMT), con el objetivo de conocer las texturas y fábricas predominantes. El análisis isotópico ( $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}/\delta^2\text{H}$ ) se ha realizado usando espectrometría de masas (Delta Plus XL Finnigan Mat, Laboratorio de Biogeoquímica de Isótopos Estables del IACT).

## Resultados y discusión

La temperatura de la cueva tiene un valor medio de 19 °C, siendo algo más baja en el sector de Galerías Turísticas que en las Galerías Altas. Se constata una diferencia de 1 °C entre ambos sectores pero existe una mayor estabilidad térmica en el área más interna de la cavidad, relacionada con el mayor espesor de roca encajante. Este pequeño aumento de temperatura puede estar relacionado también con la menor presencia de cobertura vegetal sobre la cueva (Dominguez-Villar *et al.*, 2013), de tal forma que podría reflejarse en un aumento de la temperatura del suelo y transferirse a través del epikarst (Ferguson y Beltrami, 2006).



En el exterior la temperatura del aire se mantiene permanentemente por encima de la temperatura de la cueva durante los meses de mayo a octubre. El resto del año, la temperatura exterior es, en general, inferior a la de la cavidad. Esta diferencia de temperaturas es la que condiciona los flujos de aire y la ventilación dentro de la cavidad (Liñán *et al.*, 2018).

La humedad en la cueva a lo largo del periodo monitorizado es más variable en las galerías turísticas (34-81%) siendo el valor medio del 80%, mientras que en las galerías altas esta variación es menor entre 81% y 100% con un valor medio del 97%. En la sala Montaña, que es la sala más interna de la cueva el aire permanece saturado durante todo el ciclo anual. En el resto de galerías los elevados valores medios de humedad relativa, especialmente de junio a octubre con valores próximos a la saturación, minimizan en principio los posibles procesos de evaporación en la cueva.

En cuanto a los valores de CO<sub>2</sub>, se observa que varían entre 440 y 1406 ppm en las Galerías Turísticas y entre 492 y 1170 ppm en las Galerías Altas. Durante los meses fríos (noviembre a abril), coincidiendo con la mayor ventilación de la cueva y una menor actividad vegetal sobre la cavidad, la concentración de CO<sub>2</sub> es muy similar en las Galerías Turísticas y en las Galerías Altas. En los meses de verano (junio a octubre) el contenido en CO<sub>2</sub>, en las Galerías Turísticas, alcanza los valores más altos del ciclo anual. El proceso de ventilación de la cavidad muestra variaciones correlacionables con los cambios de densidad del aire a lo largo del año (Liñán *et al.*, 2018).

Los datos de caudal registrados en el sector turístico muestran un desfase del orden de 6-8 meses, entre la caída de las lluvias y la salida por el gotero con caudales máximos en primavera- verano y mínimos en otoño-invierno (Carrasco *et al.*, 1996; Liñán *et al.*, 2008). Sin embargo, en las Galerías Altas, la evolución temporal del caudal de goteo es claramente diferente. Los caudales más elevados se registran durante los primeros meses del año, en respuesta a los episodios lluviosos registrados durante los meses de noviembre-diciembre y en enero-marzo, siendo el desfase entre la caída de lluvias y la salida por gotero del orden de 1-2 meses. Todos los puntos de goteo asociados a cada dispositivo de precipitación de carbonato han permanecido activos durante el período de control, salvo los goteros de la Sala Oso y Belén. En general, los precipitados obtenidos en cada punto de estudio responden, mayoritariamente, a cristales con un crecimiento homogéneo en todas direcciones (figura 2a). Son cristales de hábito romboédrico y en algunas salas (Belén y Cascada) se ha detectado la presencia de microorganismos (Jurado *et al.*, 2022). Esta intervención orgánica aparece en forma de telaraña creando pequeñas colonias (figura 2b). En las salas de Cascada y Cataclismo, los precipitados recogidos son calcíticos (figura 2c y 2d) y aragoníticos (figura 2e y 2f).

La tasa/cantidad de precipitación de carbonato, principalmente está controlada por la tasa de goteo, aunque también influye la altura desde la que se produce el impacto (distancia del goteo a la placa Petri), el estado de saturación de las aguas infiltradas, el tiempo de exposición y el periodo estacional en que se desarrollan. Las observaciones se realizaron semanalmente "in situ" sobre los puntos de precipitación controlada, algunas de ellas incluso diarias, lo que ha permitido llevar un control exhaustivo de los precipitados a lo largo del tiempo. Así, se ha podido observar que en general, durante los primeros meses la precipitación ocurre muy lentamente, y hasta que no se crea un núcleo de precipitación ésta no comienza a ser efectiva. Una vez desarrollado el núcleo éste

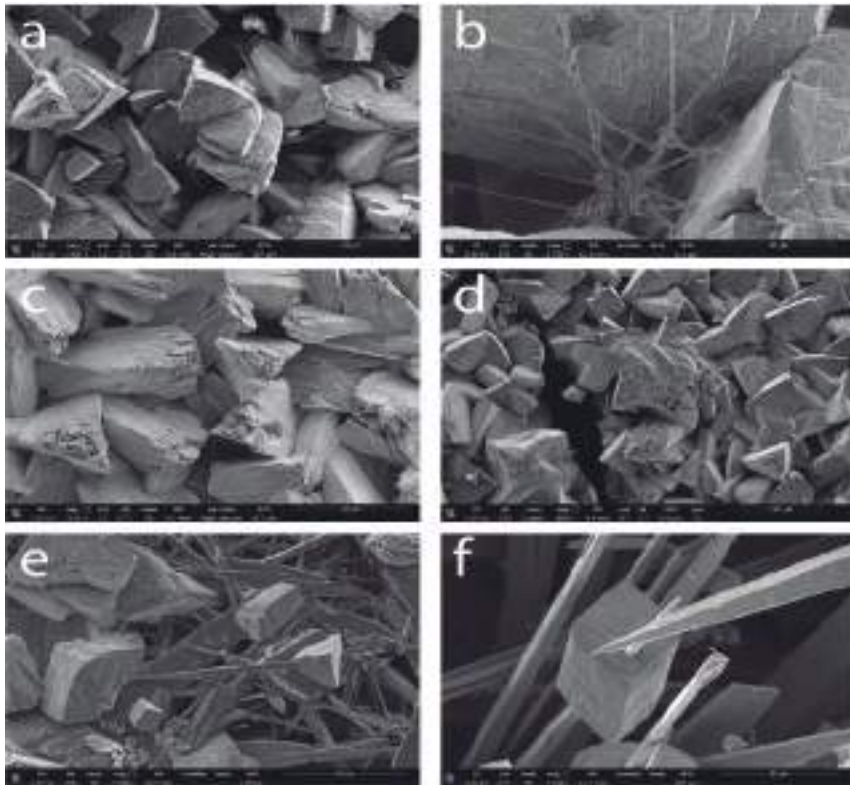


Figura 2. Fotografías obtenidas mediante HRSEM de los precipitados calcítico-aragoníticos obtenidos en los diferentes puntos de control: a) cristales de calcita de crecimiento homogéneo hábito trigonal, b) cristales de calcita con presencia de microorganismos, c) y d) cristales de calcita, e) y f) cristales de aragonito.

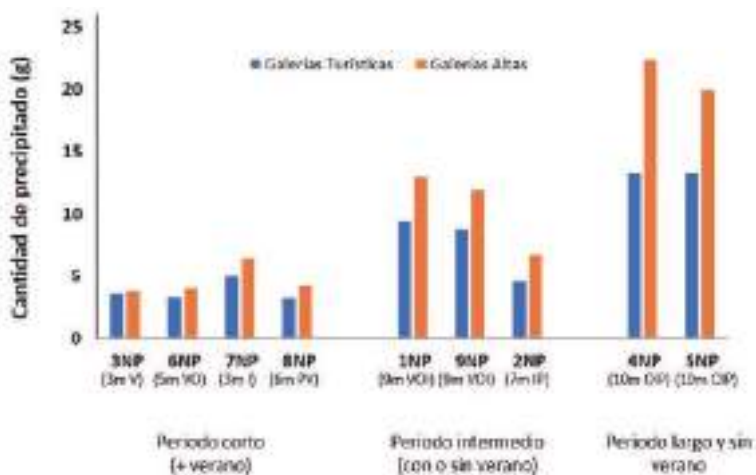


Figura 3. Gráfico de evolución de tasas de precipitado para cada etapa estacional considerada (tiempo en meses). V (Verano), VO (Verano-Otoño), I (Invierno), PV (Primavera-Verano), VOI (Verano-Otoño-Invierno), IP (Invierno-Primavera), OIP (Otoño-Invierno-Primavera).

Galerías Turísticas	1NP (9mVOI)	2NP (7mIP)	3NP (3mV)	4NP (10mOIP)	5NP (10mOIP)	6NP (5mVO)	7NP (3mI)	8NP (6mPV)	9NP (9mVOI)	Total
OSO	0,00	0,56	0,00	0,12	0,35	0,43	0,71	0,00	0,00	2,16
BE	1,06	0,39	0,69	1,04	1,26	0,34	0,29	0,00	0,95	6,02
CAS1	1,60	0,26	0,24	1,80	1,84	1,10	0,51	0,72	1,11	9,18
CAS2	4,29	2,52	1,62	7,35	6,13	1,02	2,96	1,96	4,05	31,90
CAT1	0,10	0,21	0,01	1,25	1,85	0,00	0,00	0,00	1,42	4,84
CAT2	2,24	0,49	0,97	2,29	1,77	0,34	0,47	0,50	1,09	10,16
<b>Total</b>	<b>9,29</b>	<b>4,43</b>	<b>3,53</b>	<b>13,85</b>	<b>13,19</b>	<b>3,22</b>	<b>4,93</b>	<b>3,18</b>	<b>8,63</b>	<b>64,25</b>
Galerías Altas	1NP (9mVOI)	2NO (7mIP)	3NP (3mV)	4NP (10mOIP)	5NP (10mOIP)	6NP (5mVO)	7NP (3mI)	8NP (6mPV)	9NP (9mVOI)	Total
HE	2,81	0,43	0,12	6,79	4,69	1,71	0,91	1,45	1,52	20,42
INM	0,41	0,43	0,45	2,16	1,20	0,13	0,39	0,12	0,64	5,93
MO1	3,14	1,32	0,46	2,05	2,04	1,17	0,85	1,06	2,98	15,08
MO2	0,38	1,20	1,21	4,89	4,75	0,84	1,58	0,43	0,72	16,00
MO3	6,11	3,17	1,45	6,43	7,20	0,08	2,54	1,02	5,91	33,91
<b>Total</b>	<b>12,86</b>	<b>6,56</b>	<b>3,69</b>	<b>22,32</b>	<b>19,87</b>	<b>3,93</b>	<b>6,27</b>	<b>4,08</b>	<b>11,77</b>	<b>91,36</b>

Tabla 1. Tasas de precipitado obtenido en cada punto de control para cada periodo de tiempo analizado (meses) en las diferentes salas de las Galerías Turísticas y en las Galerías Altas. VOI (Verano-Otoño-Invierno), IP (Invierno-Primavera), V (Verano), OIP (Otoño-Invierno-Primavera), VO (Verano-Otoño), I (Invierno), PV (Primavera-Verano).

actúa como semilla de crecimiento, y a partir de este momento comienza el desarrollo de cristales en función de la saturación de bicarbonato en la tasa de goteo.

El factor determinante en la tasa de precipitado es la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire que finalmente determina la PCO<sub>2</sub> del agua, y por tanto, la menor/mayor cantidad de precipitado. Durante el periodo de estudio considerado, en todos los dispositivos se ha obtenido precipitación de material carbonatado, si bien la cantidad de precipitado ha sido diferente según el punto de control, la etapa estacional considerada y el tiempo de exposición (figura 3). En total, han sido nueve los controles realizados durante estos cinco años, con un tiempo de exposición de las placas variable en cuanto al número de meses y a la estacionalidad. Los periodos más largos en el tiempo de exposición se corresponden en general con mayores cantidades de precipitado tanto en las Galerías Turísticas como en las Galerías Altas y Nuevas (tabla 1). Los precipitados de los grupos 1NP, 4NP, 5NP y 9NP se mantuvieron durante 9-10 meses siendo los más efectivos en cuanto a cantidad de precipitado recogido los grupos 4NP y 5NP con tasas altas tanto en las galerías turísticas (valor medio de 13 g) como en las galerías altas (valor medio de 20 g). Estos precipitados se desarrollaron durante el periodo estacional correspondiente al otoño-invierno-primavera. Menores tasas de precipitación se recogieron en los grupos 1NP y 9NP con valores medios de 9 g en las Galerías Turísticas y de 12 g en las Galerías Altas y Nuevas. Estos precipitados corresponden a un periodo estacional que se inicia en verano recogándose las placas a final del invierno. Los periodos de tiempo más cortos

son los grupos 2NP, 3NP, 6NP, 7NP y 8NP (entre 3-7 meses) y como era previsible son los que tienen las tasas de precipitación carbonatada más bajas (figura 3). Pero además estos precipitados son muy escasos en las placas que corresponden a los meses de estivales grupos 3NP, 6NP y 8NP y que son recogidos antes de la primavera, tanto en las Galerías Turísticas como en las Galerías Altas y Nuevas. Sin embargo, durante los meses del invierno, grupos 2NP y 7NP, las tasas recogidas son algo mayores.

En la tabla 1 se indica el acumulativo de carbonato recogido en cada punto después de los cinco años de estudio. Las tasas de precipitado carbonatado son siempre mayores en las Galerías Altas y Nuevas alcanzando máximos de 34 g. Los valores máximos de precipitado corresponden a los puntos CAS2 y MO3 (Sala Cascada y Sala de la Montaña) y los mínimos se encuentran en la Sala del Cataclismo (OSO y CAT1) donde ha habido escasa precipitación carbonatada. El punto en el que se registra la mayor cantidad de precipitado en MO3, se corresponde con el valor más alto de caudal de goteo de toda cavidad (194 ml/min de valor medio). Además, en este gotero el valor de la conductividad eléctrica del agua es también de los más altos de la cueva (639  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y el valor más alto si sólo se consideran goteros cuyas aguas proceden de la infiltración de la lluvia y no las que tienen influencia del riego de los jardines como es el caso de CAS2 que también tiene tasas altas de precipitación. En general, se constata que la tasa de precipitado carbonatado está íntimamente relacionada con el agua de infiltración y la concentración de  $\text{CO}_2$  en el aire.

Los valores de tasa de precipitado durante los cinco años del estudio ponen de manifiesto una mayor precipitación en las salas de las Galerías Altas y Nuevas donde se llegan a alcanzar durante los cinco años de estudio un total de 91,4 g de precipitado carbonatado. En las Galerías Turísticas el precipitado total recogido ha sido algo menor 64,3 g.

Los valores obtenidos de  $\delta^{18}\text{O}$  en los espeleotemas actuales de la Cueva de Nerja varían entre - 4,1 ‰ y -7,2 ‰ siendo el valor medio de -5,4 ‰. Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  varían entre -3,4 ‰ y - 12,1 ‰ siendo el valor medio de -9,5 ‰ (figura 4).

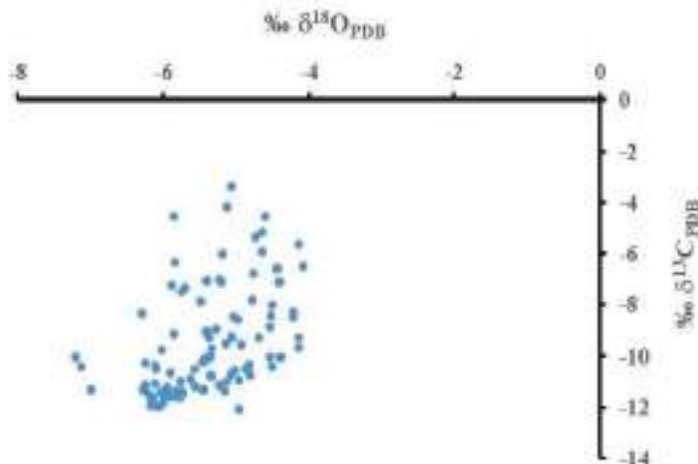


Figura 4. Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  de los precipitados carbonatados.

Estos valores isotópicos de los precipitados ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ) son más pesados en primavera que en invierno. Se constata en algunas de las salas que los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  de los precipitados reflejan una actividad biológica en la cubierta vegetal.

Los datos isotópicos de las aguas de goteo, se sitúan entre la línea de agua meteórica del Mediterráneo Occidental y la línea de agua meteórica local definida a partir de las muestras de lluvia. Las aguas de filtración muestran una variación entre  $-2,64\text{‰}$  y  $-7,08\text{‰}$  para el  $\delta^{18}\text{O}$  siendo el valor medio de  $-5,1\text{‰}$  y para el  $\delta\text{D}$  entre  $-9,87\text{‰}$  y  $-43,7\text{‰}$  y un

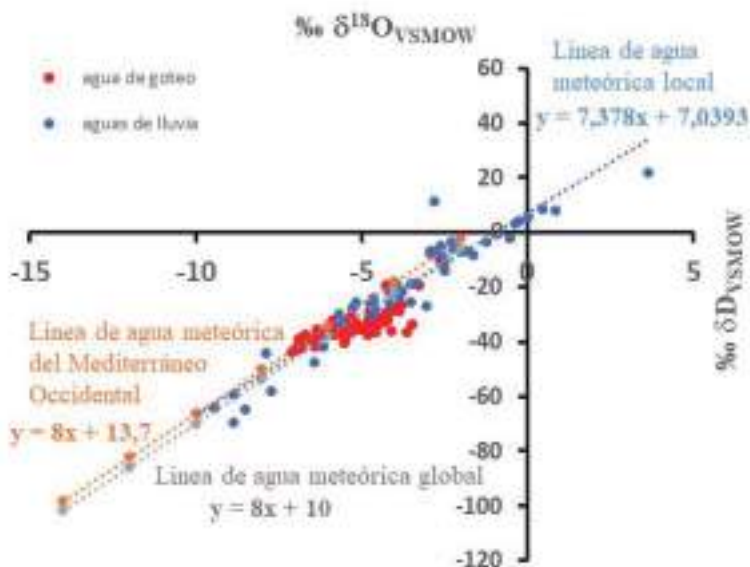


Figura 5. Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  de las aguas de goteo.

valor medio de  $-34\text{‰}$ .

El bajo rango de variación de la composición isotópica del goteo comparado con la variación en la lluvia se asocia a los efectos del suelo y el epikarst que amortiguan y homogeneizan la señal isotópica (Caballero *et al.*, 1996; Matthey, 2008). Los valores del agua de goteo se muestran más ligeros en los meses de invierno, y más pesados durante la primavera-verano, estando en consonancia con los datos isotópicos de los precipitados carbonatados y reflejando así su estacionalidad.

## Conclusiones

Las concentraciones de  $\text{CO}_2$  y la variabilidad estacional condicionan la precipitación de carbonato en la cueva. Se constata siempre una mayor tasa de precipitación en las

Galerías Altas y Nuevas con respecto a las Galerías Turísticas, coincidiendo con el periodo estacional otoño-invierno que es cuando aumenta el grado de ventilación natural de la cueva.

La mineralogía de los precipitados obtenidos alterna entre fases aragoníticas y calcíticas siendo mayoritarias las fases aragoníticas.

Los valores isotópicos indican una homogenización de la señal isotópica tras la infiltración del agua y finalmente la precipitación del carbonato cuyos valores isotópicos reflejan un claro patrón estacional. Por otra parte, los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  procedentes de los goteos lentos indican un cierto tiempo de residencia de las aguas en el sistema kárstico y muestran aproximadamente el valor isotópico medio de  $\delta^{18}\text{O}$  correspondiente a las aguas de precipitación en el área.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado dentro del proyecto Contrato Apoyo Tecnológico entre la Agencia Estatal CSIC (IACT) y la Fundación Cueva de Nerja “*Espeleotemas y registros arqueológicos de la Cueva de Nerja como indicadores del cambio paleoclimático y paleoambiental*” (2018- 2021), y del Proyecto PID20231-125619OB-C22.

## Referencias

- Baker, A., Asrat, A., Fairchild, I. J., Leng, M. J., Wynn, P. M., Bryan, t C., Genty, D., Umer, M., (2007). Analysis of the climate signal contained within  $\delta^{18}\text{O}$  and growth rate parameters in two Ethiopian stalagmites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71, 2975-2988. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.03.029>.
- Baldini, J.U.L., McDermott, F., Hoffman, D.L., Richards, D.A., Clipson, N. (2008). Very high-frequency and seasonal cave atmosphere  $\text{PCO}_2$  variability: Implications for stalagmite growth and oxygen isotope-based paleoclimate records. *Earth and Planetary Science Letters*, 272, 118-129. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.04.031>.
- Caballero, E., Jiménez de Cisneros, C., Reyes, E. (1996). A stable isotope study of cave seepage waters. *Applied Geochemistry*, 11, 583-587. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(96\)00026-1](https://doi.org/10.1016/0883-2927(96)00026-1).
- Carrasco, F., Andreo, B., Liñán, C., Vadillo, I., (1996). *Consideraciones sobre el funcionamiento hidrogeológico del entorno de la Cueva de Nerja (provincia de Málaga)*. Recursos hídricos de regiones kársticas, 249-263.
- Carrasco, F., Durán, J. J., Andreo, B., Liñán, C., Vadillo, I. (1998). *Consideraciones sobre el karst de Nerja*. Karst en Andalucía, 173–181.
- Cruz, F.W., Karmann, I., Viana, Jr., O., Burns, S. J., Ferrari, J.A., Vuille, M., Moreira, M. Z., Sial, A.N. (2005). Stable isotope study of cave percolation waters in subtropical Brazil: implications for paleoclimate inferences from speleothems. *Chemical Geology*, 220, 245- 262.
- Dominguez-Villar, D., Carrasco ,R.M., Pedraza, J., Cheng ,H., Edwards, R.L., Willenbring, J.K. (2013). Early maximum extent of paleoglaciars from Mediterranean mountains during the last glaciation. *Scientific Reports*, 3, 2034. <https://doi.org/10.1038/srep02034>.
- Fairchild, I.J., Borsato, A., Tooth, A.F., Frisia, S., Hawkesworth, D.J., Huang, Y., McDermott, F., Spiro, B. (2000). Controls on trace element (Sr-Mg) compositions of carbonate cave waters: implications for speleothems climatic records. *Chemical Geology*, 166, 255-269. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00216-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00216-8).
- Ferguson, G., Beltrami, H. (2006). Transient lateral heat flow due to land-use changes. *Earth and Planetary Science Letters*, 252 (1), 217-222. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.12.001>.
- Genty, D. (1992). Les spéléothèmes du tunnel de Godrville (Belgique): un exemple exceptionnel de concrétionnement moderne. Intérêt pour l'étude de la cinétique de la précipitation de la calcite et de sa relation avec les variations d'environnements. *Spéléochronos*, 4, 3-29.

- González, L.A., Carpenter, S.J., Lohmann, K.C. (1992). Inorganic calcite morphology: roles of fluid flow. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62, 382-399. <https://doi.org/10.1306/D426790B-2B26-11D7-8648000102C1865D>.
- Jiménez de Cisneros, C., Caballero, E. (2013). Paleoclimate reconstruction during MIS5a based on a speleothem from Nerja Cave, Málaga, South Spain. *Natural Science*, 5(5), 533-540. <https://doi.org/10.4236/ns.2013.55067>.
- Jiménez de Cisneros, C., Caballero, E., Vera, J., Durán, J.J., Juliá, R. (2003). A record of Pleistocene climate from a stalactite, Nerja Cave, southern Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 189(1-2), 1-10. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(02\)00589-8](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(02)00589-8).
- Jurado, V., Del Rosal, Y., Jiménez de Cisneros, C., Liñán, C., Martín-Pozas, T., González-Pimentel, J.L., Hermeros, B., Saiz-Jiménez, C. (2022). Microbial communities in carbonate precipitates from drip waters in Nerja Cave, Spain. *PeerJ*, 10, e13399. <https://doi.org/10.7717/peerj.13399>.
- Liñán, C., Carrasco, F., Calaforra, J.M., del Rosal, Y., Garrido, A., Vadillo, I. (2008). *Control de parámetros ambientales en las galerías altas y nuevas de la Cueva de Nerja (Málaga)*. Resultados preliminares. En: Resúmenes del II Congreso Español sobre Cuevas Turísticas (J.J. Durán, J. López-Martínez, Ed). Santander, Cantabria, 41-42
- Liñán, C., del Rosal, Y., Carrasco, F., Vadillo, I., Benavente, J., Ojeda, L. (2018). Highlighting the importance of transitional ventilation regimes in the management of Mediterranean show caves (Nerja-Pintada system, southern Spain). *Science of the Total Environment*, 631-632, 1268-1278. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.304>.
- Mattey, D., Lowry, D., Duffet, J., Fisher, R. Hodge, E., Frisia S. (2008). A 53 year seasonally resolved oxygen and carbon isotope record from a modern Gibraltar speleothem: reconstructed drip water and relationship to local precipitation. *Earth and Planetary Science Letters*, 269(1-2), 80-95. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.01.051>.
- Turrero, M.J., Garralón, A., Martín-Chivelet, J., Gómez, P., Sánchez, L., Quejido, A., Martín-Merino, M.A., Ortega, A.I. (2004). *Seasonal changes in the chemistry of drip waters in Kaite Cave (N Spain)*. En: Water-Rock Interaction 11 Wany (R.B., Seal II, R.S. Ed). Balkema Publishers, London, 1407-1410.
- Turrero, M.J., Garralón, A., Gómez, P., Sánchez, L., Martín-Chivelet, J., Ortega, A.I. (2007). *Geochemical evolution of drip-water and present-growing calcite at Kaite cave (N Spain)*. *Water-Rock Interaction*, 12, 1187-1190.
- Turrero, M.J., Garralón Lafuente, A., Gómez González, P., Martín Chivelet, J., Sánchez Moreno, L., Ortega Martínez, A.I. (2009). Present-day calcite deposition in two caves of N Spain (Kaite and Cueva Mayor): Factors affecting calcite growth and fabric. *Geochimica et Cosmochimica Acta, Goldschmidt Conference Abstracts*, 73(13), A1356-A1356.





# Valoración y protocolos de gestión de riesgos en espacios naturales protegidos subterráneos de Extremadura

Rafael JORDÁ BORDEHORE <sup>(1)</sup>, Manuel ARLANDI RODRÍGUEZ <sup>(2)</sup>,  
Luis JORDÁ BORDEHORE <sup>(3)</sup>, Alberto BERNARDO SÁNCHEZ <sup>(2)</sup>,  
Carmen CRISÓSTOMO MIRANDA <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Consultor. Islas Pitiusas 2, 28290, Las Rozas, Madrid (España), rafael\_jorda@hotmail.com

<sup>(2)</sup> Túneles y Geomecánica S.L., Alfonso Gómez, 17-19, 3a, 28037 Madrid (España),  
marlandi@tunelesygeomecanica.es, abernardo@tunelesygeomecanica.es

<sup>(3)</sup> Universidad Politécnica de Madrid. Prof. Aranguren, 3, 28040 Madrid (España), l.jorda@upm.es

<sup>(4)</sup> D.G. Sostenibilidad. Junta Extremadura. Edificio III Milenio, 06800, Mérida (España).  
carmen.crisostomom@juntaex.es

---

## Resumen

Los estudios de seguridad en espacios subterráneos son poco frecuentes fuera del ámbito de la minería y los túneles. En el caso de cuevas naturales y antrópicas (minas turísticas, viviendas y bodegas) se centran en aspectos de las instalaciones y la presencia de gases potencialmente dañinos. Sin embargo, la estabilidad de los huecos visitables suele quedar relegada a los estudios iniciales de puesta en valor en el caso de las minas y son prácticamente inexistentes en las cuevas turísticas. En el caso de Extremadura, se ha querido establecer unos criterios de análisis que contemplan todos los riesgos potenciales de los recorridos turísticos y se ha hecho un especial hincapié en la estabilidad de los mismos, estableciéndose protocolos de actuación para cada uno de las eventuales problemáticas que se puedan ocasionar. En el presente trabajo se resumen los trabajos efectuados desde el año 2018, pioneros en la gestión subterránea en España, en cuatro espacios naturales subterráneos protegidos de Extremadura. En este estudio, además, hay un aporte novedoso que es la valoración del grado de estabilidad de dichos espacios y que concluyen con una "Declaración del Estado de Estabilidad (DEE)". Este concepto DEE certifica el grado de seguridad, así como los trabajos a desarrollar tanto para minimizar riesgos como para hacer el correcto seguimiento de las condiciones de seguridad de las cavidades.

**Palabras clave:** cueva, estabilidad, geotecnia, mina, seguridad.

## ***Assessment and protocols for risk management in underground protected natural areas in Extremadura***

### ***Abstract***

*Safety studies in underground spaces are rare outside the field of mining and tunnels. In the case of natural and anthropic caves (show mines, troglodytic houses and cellars) they focus on aspects of the facilities and the presence of potentially harmful gases. However,*

*the stability of the openings that can be visited is usually relegated to the feasibility studies in the case of mines and they are practically non-existent in tourist caves. In the case of Extremadura, an attempt has been made to establish analysis criteria that take into account all the potential risks of tourist routes and special emphasis has been placed on their stability: establishing action protocols for each of the eventual problems that they can be caused. This work summarizes the stuides carried out since 2018, pioneers in underground management in Spain, in four protected underground natural spaces in Extremadura. In this study there is also a novel contribution that is the assessment of the degree of stability of these spaces and that concludes with a "Declaration of the State of Stability (DEE)". This DEE concept certifies the degree of safety, as well as the work to be carried out both to minimize risks and to correctly monitor the safety conditions of the cavities.*

**Keywords:** cave, geotechnics, mine, security, stability.

## Introducción

La Consejería de Agricultura, Desarrollo Rural, Medioambiente y Energía del Gobierno de Extremadura gestiona entre otros espacios naturales, cuatro cavidades turísticas, de las que dos de ellas son naturales: las cuevas de Fuentes de León y Castañar de Ibor y las minas de La Jayona en Fuentes del Arco y Pastora en Aliseda. Junto con la conservación y difusión de estos espacios subterráneos, conscientes de la problemática que pueden presentar este tipo de espacios en lo concerniente a seguridad, desde el año 2015 se vienen realizando diferentes estudios en las cavidades (Arlandi et al., 2016 y Jordá et al.,



Figura 1. Situación de las cavidades dentro de Extremadura. Fuente de base: Google Maps.

2018). El trabajo principal, "Estudio de valoración de riesgos y elaboración de protocolos de gestión de los mismos en espacios naturales protegidos subterráneos de Extremadura", realizado en el año 2018, y pionero en la gestión subterránea, tenía como objetivo final establecer unos protocolos de gestión de riesgos, así como analizar la estabilidad de las principales cámaras o galerías de las diferentes cavidades.

## Situación y características de las cavidades

Las cuatro cavidades objeto del estudio están situadas en Extremadura (Figura 1), dos en Cáceres: Mina Pastora en Aliseda y cueva de Castañar en Castañar de Ibor y dos en Badajoz, mina de La Jayona en Fuente del Arco y las cuevas de Fuentes de León en el municipio homónimo.

La mina Pastora (figura 2) es una antigua explotación mixta entre a cielo abierto (mediante zanjas) y de interior, situada en el municipio cacereño de Aliseda. Está situada en terrenos paleozoicos, en el flanco norte del sinclinal de la Sierra de San Pedro. La sucesión paleozoica está constituida esencialmente por materiales detríticos formados por cuarcitas, areniscas y pizarras que se encuentran alternando en distintos niveles, abarcando términos desde el Ordovícico Inferior hasta el Carbonífero Inferior en sucesión continua, faltando posiblemente el Devónico Medio (Soldevila i Batolí, 1991; Crespo, 2018). La mineralización de hierro está situada en la Cuarcita del Aljibe (Devónico inferior), siempre en el flanco norte del Sinforme de la Sierra de San Pedro y, en menor medida, en pizarras. Las menas explotadas fueron goethita y hematites.



Figura 2. Zonas mineralizadas en la mina Pastora: A, cuarcita del Aljibe; B: pizarras con presencia de óxidos de hierro.

La cueva de Castañar (Castañar de Ibor, Cáceres) es una cavidad kárstica laberíntica, consistente en galerías y salas subhorizontales, principalmente estrechas y de aproximadamente 2 metros de altura. Las galerías siguen la orientación principal N150E de la estructura general, y la mayoría de las cámaras reproducen la geometría de pliegue de caja, lo que indica un claro control estructural y litológico en la formación de la cueva. La cavidad se encuentra en materiales sedimentarios del Cámbrico inferior, que conforman el núcleo del anticlinal de Ibor, dentro de la unidad estratigráfica Grupo Ibor.

La cueva se desarrolló dentro de un lecho dolomítico que pertenece a la parte superior del Grupo Ibor, en el que alternan lutitas, areniscas y grauvacas con lechos de carbonato intercalados (dolomías y magnesitas) de espesor variable (decimétrico a métrico). La disolución de los lechos carbonáticos y el extenso desgaste de las lutitas y las grauvacas produjeron colapsos que agrandaron la cueva, migrando esta verticalmente (figura 3), hasta el punto de que en las paredes y techos de la cavidad aparecen principalmente materiales lutíticos (pizarras).

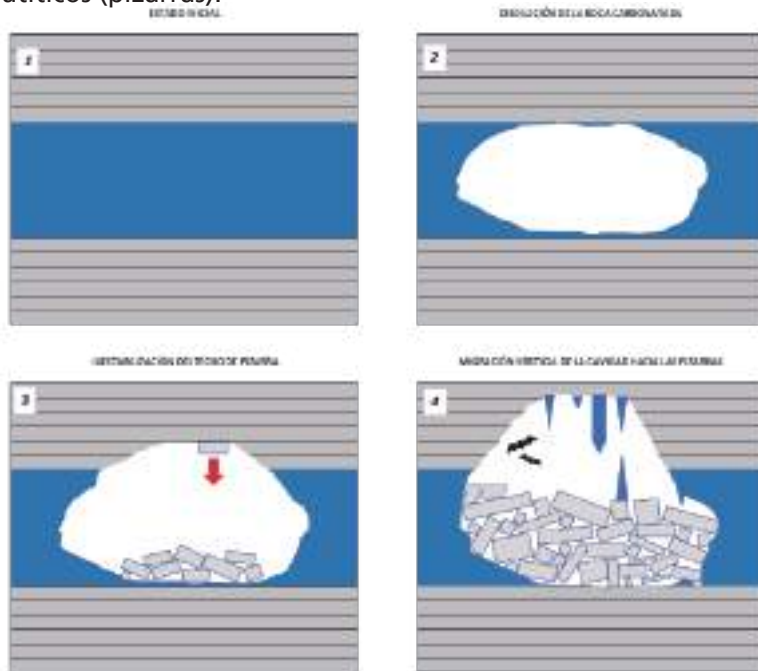


Figura 3. Formación de la cueva de Castañar por "migración vertical". En azul, los materiales carbonatados y en gris, las lutitas.

El Monumento Natural Mina La Jayona (figura 4), se ubica en el municipio de Fuente del Arco (Badajoz). Se trata de una antigua explotación de hierro, datada a principios del siglo XX, cuya principal característica son los enormes "vaciados" de 20 metros de ancho y cerca de 40 de profundidad en algunos puntos, a los que se accedía por galerías auxiliares en varios niveles. Alguno de estos huecos se desarrolló en interior, generando grandes cámaras de decenas de metros.

Desde el punto de vista geológico, se encuentra en el Dominio de Zafra-Alanis-Córdoba, formado por materiales de origen Precámbrico, Cámbrico, Carbonífero y Pérmico (Delgado Quesada *et al.*, 1977). Los sedimentos de este dominio aparecen compartimentados por grandes fallas longitudinales que aíslan distintas unidades tectosedimentarias. Dentro de las grandes fallas que aparecen en la zona se encuentra la falla de Guadalcanal que divide a la zona de estudio en dos áreas, pertenecientes, la primera, a la Unidad Loma del Aire y la segunda, en la cual se sitúa la mina de La Jayona, a la Unidad Benalija.



*Figura 4. Cámara principal en la mina de La Jayona. Se aprecia un subnivel superior de desarrollo de la cámara.*



*Figura 5. Espeleotemas en la cueva de Masero*

Según Fernández Amo y Rebollada (2005), la paragénesis que se encuentra en la zona es claramente de baja temperatura. El tipo de hematites que aparece (oligisto micáceo), indica que la temperatura de génesis de esta mineralización es muy baja.

Las cuevas de Fuentes de León (Badajoz), son un espacio natural visitable, constituido por cavidades naturales de origen kárstico. En total se trata de cinco cavidades, de las que solo cuatro son visitables (Caballo, Postes, Masero y Agua) (figura 5).

La megaestructura geológica en la que se localiza esta zona es el Anticlinorio Olivenza-Monesterio (Alía, 1963), el cual se divide en varios dominios (Obejo-Valsequillo-Puebla de la Reina, Zafra-Monesterio, Alconera-Arroyomolinos, etc.). Las cuevas se ubican dentro del dominio Alconera-Arroyomolinos, en concreto dentro de la formación de mármoles calcodolomíticos de la unidad Herrerías, de edad Cámbrica.

## Análisis de riesgos

Los estudios de seguridad en espacios subterráneos son poco frecuentes y en la mayoría de los casos se centran en la presencia de gases potencialmente dañinos, en la adecuación de caminos y en la correcta iluminación. Sin embargo, son muchos los riesgos potenciales que pueden darse dentro de una cavidad y su identificación y catalogación son fundamentales para una correcta gestión.

Uno de los Riesgos menos analizados y que más peligro puede ocasionar es la estabilidad de los huecos visitables (disciplina englobada en la geotecnia o geomecánica), que suele quedar relegada a los estudios iniciales, en el caso de las minas, y son prácticamente inexistentes en las cuevas turísticas. En el caso de Extremadura, se ha querido establecer unos criterios de análisis que contemplan todos los riesgos potenciales de los recorridos turísticos y se ha hecho un especial hincapié en la estabilidad de los mismos, como paso previo a establecer protocolos de actuación para cada uno de las eventuales problemáticas que se puedan ocasionar.

Para elaborar este protocolo se ha confeccionado un listado de los potenciales riesgos que pueden operar en las cavidades. El listado de riesgos se prepara a partir de las



*Figura 6. Caída de piedras (algunas de más de 30 centímetros) en el recorrido visitable de la mina de La Jayona. En la imagen superior izquierda, el impacto sobre la barandilla.*

inspecciones realizadas, y de las indicaciones de los técnicos responsables de las visitas. Los principales riesgos que se han identificado son:

- Presencia de animales peligrosos
- Caída de piedras
- Inundación y flujos importantes de agua
- Colapso o inhabilitación de vías de salida/acceso
- Caída de personas desde altura
- Ataque de pánico por claustrofobia o similar
- Golpeo con techos o paredes
- Fallo eléctrico con pérdida de iluminación
- Presencia de gases o humos
- Problema de salud o accidente del guía
- Extravío de alguna persona
- Fuego

Algunas de las situaciones de riesgo mencionadas han tenido ya lugar en las cavidades y en otras ocasiones se trata de situaciones que aún no se han dado, pero que, en las condiciones de los sitios podrían tener lugar.

Los riesgos en las cavidades se han clasificado en base a su probabilidad, de acuerdo con la tabla 1.

<b>ALTO:</b> Situación que ya ha tenido lugar alguna vez en la cueva	
<b>MEDIO:</b> Situación que hasta la fecha no ha tenido lugar en la cueva, pero que se considera posible que eventualmente pudiera ocurrir	
<b>BAJO:</b> Situación que nunca se ha dado en la cueva, y que se considera que es altamente improbable	

Tabla 1. Clasificación del riesgo en base a su probabilidad de ocurrencia

## Protocolo de gestión de riesgos

En base al análisis de riesgos, se ha desarrollado una propuesta de un protocolo de actuación frente a emergencias que puedan acontecer durante el desarrollo de las visitas en los espacios subterráneos. A continuación se resumen en la tabla 2 las situaciones de riesgo y las actuaciones recomendadas (tabla 2).

POSIBLES RIESGOS	PROBABILIDAD	ACTUACIÓN
<b>Presencia de animales o insectos peligrosos</b>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Evacuación en dirección contraria a la situación del peligro.</li> <li>2) Si el animal es peligroso, aviso a la Guardia Civil</li> </ol>
<b>Caída de piedras</b>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Si tiene lugar en el momento de la visita, evacuación en dirección contraria a la caída de las piedras.</li> <li>2) Llevar casco</li> <li>3) Inspección periódica de los guías para localizar piedras sueltas en techos y paredes, y eventualmente sanearlas</li> </ol>
<b>Colapso o inhabilitación de vías de salida/acceso</b>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Si es en vía de acceso, evacuación hacia Punto de Encuentro</li> <li>2) Si es en vía de salida de Niveles 2 y 3, evacuación hacia otro nivel por escalera</li> </ol>
<b>Caída de personas desde altura</b>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Circulación en fila de "a uno" en las zonas de posible caída</li> <li>2) Alcanzar persona y practicar primeros auxilios</li> <li>3) Aviso 112</li> </ol>
<b>Ataque de pánico por claustrofobia o similar</b>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Evacuación de todo el grupo hacia el Punto de Encuentro</li> </ol>
<b>Golpeo con techos o paredes</b>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Si es posible, evacuación de la persona al Punto de Encuentro</li> <li>2) Aviso a 112 si la situación es de mayor gravedad</li> </ol>
<b>Fallo eléctrico con pérdida de iluminación</b>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Si es galería corta y presenta visibilidad, continuar visita.</li> <li>2) Si es en galería larga, recorrerla en grupos conducidos por el guía con linterna.</li> </ol>
<b>Presencia de gas o humos</b>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Colocación de mascarillas o taponar vías respiratorias con ropa.</li> <li>2) Evacuación en sentido contrario a la fuente del peligro</li> </ol>
<b>Inundación y flujos importantes de agua</b>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) En niveles 3 y 4: Si se detectan flujos de agua o inundación de caudal importante, evacuar en sentido contrario al peligro.</li> <li>2) En Nivel 2: Evacuación por escalera hacia Nivel 3.</li> </ol>
<b>Problema de salud o accidente del guía</b>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Avistamiento por cámara</li> <li>2) Comunicación con visitantes por interfonos</li> <li>3) Acudir para hacerse cargo del guía y del grupo desde el centro de recepción.</li> </ol>
<b>Extravío de alguna persona</b>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Evacuación del grupo al punto de encuentro, conteo de personas e identificación de las personas extraviadas.</li> <li>2) Los guías recorren los niveles visitables hasta localización de extraviados</li> <li>3) Si no aparecen, aviso Guardia Civil.</li> </ol>
<b>Fuego</b>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Colocación de mascarillas</li> <li>2) Evacuación en sentido contrario a la fuente del peligro</li> <li>3) Si es de pequeña magnitud, intento de sofoco con extintor.</li> <li>4) Si es de mayor magnitud aviso 112.</li> </ol>

Tabla 2. Actuaciones a desarrollar en base a los posibles riesgos existentes en la mina de La Jayona

## La estabilidad de las cavidades

Uno de los riesgos que menos se tienen en cuenta, principalmente en las cavidades de origen natural, es la estabilidad de las mismas.



En las minas que se rehabilitan para el turismo, durante la fase de proyecto (si se ha hecho estudio geotécnico), se suelen identificar la mayor parte de las zonas inestables, acometiéndose en fase de obra las actuaciones necesarias para su minimización. En estos espacios, importa menos el impacto de las obras, por su carácter antrópico.

Algo así no sucede en las cuevas naturales; se tiende, erróneamente a pensar que debido a su largo período de formación, son estables. Esto es moderadamente aplicable, a algunas cuevas, y casi nunca en todo su recorrido. La parte más exterior, suele presentar, con frecuencia, inestabilidades debido entre otros factores a la erosión, pero también a la propia estructura del macizo rocoso (estratificación o foliación, juntas, fallas, etc.).

Por este motivo, es necesario analizar la estabilidad tanto de los "huecos" visitables, de los emboquilles o accesos naturales, así como valorar los sistemas adoptados con medidas de refuerzo y estabilización. Los trabajos de campo para toma de datos y reconocimiento geotécnico fueron los siguientes:

- Topografía, con distanciómetro laser, de las secciones transversales más relevantes de para el análisis de estabilidad de las cavidades.
- Toma de estaciones geomecánicas y puntos de observación, donde se reflejan las orientaciones y propiedades de los principales sistemas de fracturas, resistencia de la roca, y clasificación geomecánica del terreno.
- Inspección de inestabilidades y del estado del sostenimiento del refuerzo actualmente colocado.

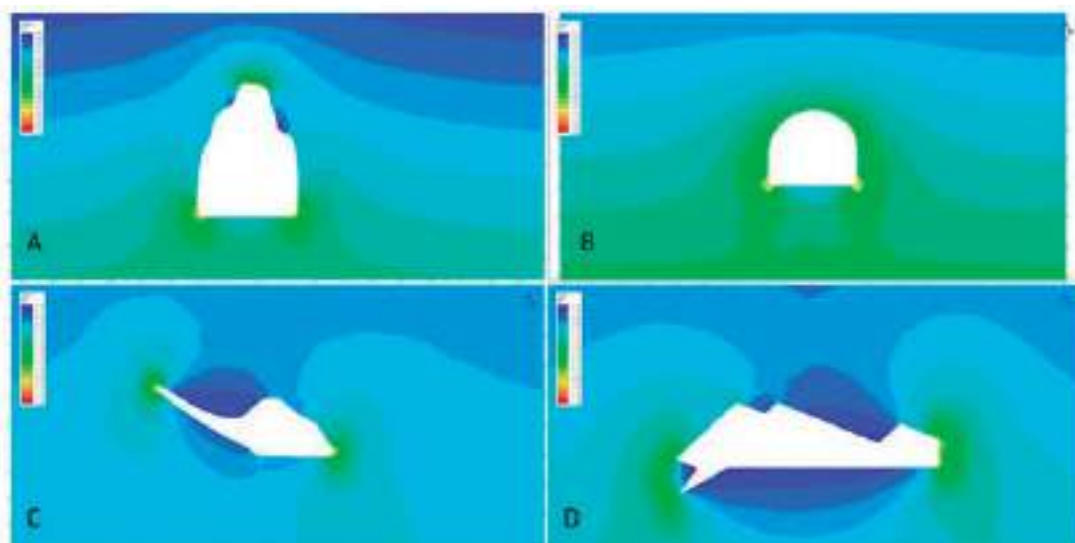


Figura 7. Tensiones principales obtenidas mediante el método de los elementos finitos en la Sala de las Columnas de la mina de La Jayona (A), galería de acceso de Aliseda (B), cueva de los Postes, en Fuentes de León (C) y Castañar de Ibor (D).

<b>NORMATIVA APLICADA:</b> Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera (RGNBSM). Instrucción Técnica Complementaria "LABORES SUBTERRANEAS. Sostenedimientos de obras" ITC 04.6.05.		<b>TRABAJOS GEOTÉCNICOS REALIZADOS:</b> 1) Caracterización de la resistencia de la roca con Martillo de Schmidt 2) Registro de discontinuidades del macizo rocoso (estaciones geomecánicas). Estimación de sus parámetros geotécnicos por métodos empíricos 3) Modelización numérica del macizo rocoso.							
<b>FACTOR DE SEGURIDAD ADOPTADO:</b> $F.S = \frac{\text{Resistencia del Macizo}}{\text{Tensión que soporta}} \geq 3$									
<b>METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD:</b> 1) Cálculos Tensodeformacionales de Elementos Finitos desarrollados con software RS-2. 2) Cálculos de Carga Gravitatoria de Cuñas y Bloques desarrollados con software UNWEDGE.									
<b>RESULTADOS DEL ESTUDIO:</b>		<b>MEDIDAS DE SEGUIMIENTO A ADOPTAR:</b>							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>RESISTENCIA MACIZO ROCOSO (MPa)</th> <th>TENSIÓN MÁXIMA MÓDULO (MPa)</th> <th>FACTOR DE SEGURIDAD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>34.99</td> <td>0.4</td> <td>87.5</td> </tr> </tbody> </table>	RESISTENCIA MACIZO ROCOSO (MPa)	TENSIÓN MÁXIMA MÓDULO (MPa)	FACTOR DE SEGURIDAD	34.99	0.4	87.5	<p style="text-align: center;"><b>MACIZO CUARCÍTICO</b></p>	1) Monitorización de la apertura de fisuras 2) Control de caída de piedras 3) Fotografía periódica de zonas potencialmente inestables o críticas	
RESISTENCIA MACIZO ROCOSO (MPa)	TENSIÓN MÁXIMA MÓDULO (MPa)	FACTOR DE SEGURIDAD							
34.99	0.4	87.5							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>RESISTENCIA MACIZO ROCOSO (MPa)</th> <th>TENSIÓN MÁXIMA MÓDULO (MPa)</th> <th>FACTOR DE SEGURIDAD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2.236</td> <td>0.4</td> <td>5.5</td> </tr> </tbody> </table>	RESISTENCIA MACIZO ROCOSO (MPa)	TENSIÓN MÁXIMA MÓDULO (MPa)	FACTOR DE SEGURIDAD	2.236	0.4	5.5	<p style="text-align: center;"><b>MACIZO PIZARROSO</b></p>		
RESISTENCIA MACIZO ROCOSO (MPa)	TENSIÓN MÁXIMA MÓDULO (MPa)	FACTOR DE SEGURIDAD							
2.236	0.4	5.5							
La cavidad es globalmente estable, con un factor de seguridad superior al requerido. Se ha constatado que son posibles caídas locales de pequeños bloques.									
<b>CONCLUSIONES:</b> 1) Las cavidades subterráneas y los taludes de la mina son globalmente estables, con factores de seguridad por encima de los que determina el Reglamento de Normas Básicas de Seguridad Minera. 2) No se descarta que localmente puedan caer pequeñas piedras, aunque algunas podrían tener un tamaño incluso decimétrico. Para evitar y anticipar estos riesgos se ha propuesto un sistema de monitorización adecuado para su desarrollo por los guías de la mina. 3) Hay algunas zonas de la mina que requieren actuaciones, pues se ha observado un empeoramiento de sus condiciones de estabilidad, o bien no es posible estimar el factor de seguridad con el que están trabajando									
<b>REALIZADO POR:</b>									
 <b>Alberto Bernardo Sánchez</b> Ingeniero de Minas Colegiado: Nº 3981 COIMCE	 <b>Rafael Jordá Bordehore</b> Dr. Geología e Ingeniería Geológica Colegiado: Nº 6002 ICOG	 <b>Manuel Arlandi Rodríguez</b> Coordinador del Estudio							

Figura 8. Declaración del estado de estabilidad de la mina Pastora

Con dichos datos se ha realizado la caracterización geotécnica y posterior análisis tensodeformacional mediante cálculo con elementos finitos para valorar la estabilidad y conocer el factor de seguridad de las zonas estudiadas (figura 7).

## Declaración del estado de estabilidad

Para valorar el grado de seguridad con el que contaban los espacios subterráneos se tuvieron en cuenta las Normas Básicas de Seguridad Minera, al ser el marco legal más semejante y aplicable a espacios de esta índole. En base a los resultados de los estudios realizados se elaboró un documento en el que se indicaba el grado de seguridad de la cavidad, así como las principales actuaciones realizadas y por desarrollar. A este documento se le ha denominado "Declaración del Estado de Estabilidad" (figura 8).

## Conclusiones

Dados los pocos o incompletos trabajos y metodologías existentes para analizar los riesgos en las cavidades turísticas, la Junta de Extremadura contrató en el año 2018 los servicios para la realización del "Estudio de valoración de riesgos y elaboración de protocolos de gestión de los mismos en espacios naturales protegidos subterráneos de Extremadura". El trabajo se realizó en las cuevas de Fuentes de León y Castañar de Ibor y las minas de La Jayona en Fuentes del Arco y Pastora en Aliseda. Las principales aportaciones y conclusiones del trabajo desarrollado han sido:

- Se han establecido unos criterios de análisis que contemplan todos los riesgos potenciales de los recorridos turísticos.
- Se ha realizado una valoración de los riesgos, estableciendo un protocolo de actuación para cada una de las posibles incidencias.
- Se ha realizado un estudio de estabilidad de las principales galerías y salas de los cuatro espacios naturales.
- Se ha elaborado una Declaración del Estado de Estabilidad, en el que se indica el factor de seguridad de las principales salas visitables y las medidas de seguimiento a adoptar.

Consideramos que este tipo de estudios y protocolos, deberían aplicarse en todos los espacios turísticos subterráneos, adaptándose a la morfología y tipología de visita de cada uno de ellos.

## Referencias

- Alía, M. (1963). Rasgos estructurales de la baja Extremadura. *Boletín Real Sociedad Española de Historia Natural*, 61, 247-262.
- Arlandi, M., Jordá, R., Bernardo, A. (2016). Estudio de estabilidad del Monumento Natural Mina de la Jayona. *Informe interno para la Dirección General de Medio Ambiente de la Junta de Extremadura*. Memoria y planos.
- Arlandi, M., Jordá, R., Bernardo, A. (2018). Estudio de valoración de riesgos y elaboración de protocolos de gestión de los mismos en espacios naturales protegidos subterráneos de Extremadura. *Informe interno para la Dirección General de Medio Ambiente de la Junta de Extremadura*. Memoria y planos.
- Crespo, A. (2018). Mina Pastora. *Apuntes Geológicos de la Provincia de Cáceres*, Vol. 2, Asociación Geológica de Extremadura (AGEX).

- Delgado Quesada, M., Liñán, E., Pacual, E., Pérez Lorente, F. (1977). Criterios para la diferenciación de dominios en Sierra Morena Central. *Estudios Geol.*, 12, 75-90.
- Fernández, F.J., Rebollada, E. (2005). PIG Mina La Jayona. En: *Muñoz y Martínez (Ed.). Patrimonio Geológico de Extremadura. Geodiversidad y Lugares de Interés Geológico.* Consejería de Agricultura y Medio Ambiente. Badajoz.
- Jordá, R., Umpiérrez, G., Arlandi, M., Muñoz, P., Rebollada, E., Crisóstomo, C. (2018). Estudio de estabilidad del Monumento Natural "Mina de la Jayona", Fuente del Arco, Badajoz. En: *P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad.* Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, 279-290.
- Soldevila i Batolí, J. (1991). *Estudio geológico-estructural de los materiales precámbricos y paleozoicos entre la Sierra de San Pedro y la Depresión del Guadiana (provincias de Cáceres y Badajoz). Sector límite entre las zonas Centroibérica y Ossa-Morena.* Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona, 262 pp.

# La cueva de Tito Bustillo (Ardines, Ribadesella, Asturias, España): 50 + 3 años de investigación arqueológica y gestión de visitas públicas

Jesús Francisco JORDÁ PARDO <sup>(1,2)</sup>, Miguel POLLEDO GONZÁLEZ <sup>(3)</sup>,  
Santiago CALLEJA FERNÁNDEZ <sup>(3)</sup>, Esteban ÁLVAREZ FERNÁNDEZ <sup>(3,4)</sup>

<sup>(1)</sup> Laboratorio de Estudios Paleolíticos. Departamento de Prehistoria y Arqueología, Facultad de Geografía e Historia. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Paseo Senda del Rey 7. E-28040 Madrid (España).

jjorda@geo.uned.es,

<sup>(2)</sup> GIR PREHUSAL, Universidad de Salamanca.

<sup>(3)</sup> Servicio de Patrimonio Cultural, Sección de Gestión Arqueológica. Gobierno del Principado de Asturias. Cueva de Tito Bustillo, Ribadesella, Asturias (España). miguel.polledogonzalez@asturias.org, santiago.callejafernandez@asturias.org

<sup>(4)</sup> Departamento de Prehistoria, Historia Antigua y Arqueología, Facultad de Geografía e Historia. Universidad de Salamanca <https://ror.org/02f40zc51>-, C/ Cerrada de Serranos s/n. 37002 Salamanca epanik@usal.es

---

## Resumen

En marzo y abril de 1968 el Grupo de Montaña Torreblanca exploró el complejo del Pozu'l Ramu en el macizo kárstico de Ardines realizando el descubrimiento de los grabados y pinturas rupestres paleolíticas de la que, finalmente, recibiría el nombre de cueva de Tito Bustillo. A finales de 1968 apareció el primer trabajo científico sobre las representaciones gráficas de la cueva y en 1970 la primera publicación internacional. Las primeras excavaciones arqueológicas se realizaron en febrero de 1970. Continuaron de forma más o menos constante entre 1972 y 1986, en una primera fase, y entre 2001 y 2009, en una segunda. Los estudios del arte rupestre se prolongaron desde prácticamente su descubrimiento hasta 2009. A partir de 2020 un amplio equipo coordinado por Esteban Álvarez-Fernández desarrolla investigaciones arqueológicas en el yacimiento.

Respecto a su explotación turística, en agosto de 1969 la cavidad fue abierta al público mediante un acceso provisional en su entrada primitiva que, en 1970, fue sustituido por el actual túnel a través del cual han continuado realizándose las visitas para mostrar sus manifestaciones rupestres superopaleolíticas. Desde entonces, la cueva ha estado abierta al público con diferentes periodos de apertura, horarios y cupos de visitantes, bajo la gestión, primero de la Diputación Provincial y, a partir de 1983, del Principado de Asturias. Respecto a su protección, en abril de 1970 la cueva fue declarada Monumento Histórico Artístico y en 2008 fue incluida por la UNESCO en la Lista del Patrimonio Mundial de la Humanidad. Este trabajo presenta de manera sintética los resultados de investigación arqueológica en su yacimiento y de explotación turística de la cueva.

**Palabras clave:** conservación, explotación, investigación, macizo kárstico de Ardines, región cantábrica.

## ***The cave of Tito Bustillo (Ardines, Ribadesella, Asturias, Spain): 50 + 3 years of archaeological research and management of public visits***

### **Abstract**

*In March and April 1968, the Grupo de Montaña Torreblanca explored the Pozu'l Ramu complex in the Ardines karstic massif, discovering the Paleolithic paintings and engravings of what would finally receive the name of Tito Bustillo cave. The first scientific work on the graphic representations of the cave appeared at the end of 1968, and in 1970 the first international publication appeared. The first archaeological excavations were carried out in February 1970. They continued more or less constantly between 1972 and 1986, in a first phase, and between 2001 and 2009, in a second. Studies of cave art lasted practically from its discovery until 2009. As of 2020, a large team coordinated by Esteban Álvarez-Fernández develops archaeological investigations at the site.*

*In August 1969 the cave was opened to the public through a provisional access to its primitive entrance which, in 1970, was replaced by the current tunnel through which visits have continued to show its super-Paleolithic cave artistic manifestations. Since then, the cave has been open to the public with different opening periods, hours and visitor quotas, under the management, first of the Diputación Provincial de Asturias and, from 1983, of the Principado de Asturias. Regarding its protection, in April 1970 the cave was declared a Historic Artistic Monument and in 2008 it was included by UNESCO in the World Heritage List of Humanity. This work presents in a synthetic way the results of 53 years of archaeological research on its site and of tourist exploitation of the cave.*

**Keywords:** *Ardines karstic massif, Cantabrian region conservation, exploitation, research.*

## **Introducción**

La cueva de Tito Bustillo se encuentra situada en la localidad de Ardines, en el municipio asturiano de Ribadesella, a menos de 200 m en línea recta de la orilla occidental de la ría de Ribadesella y a 630 m de la línea de costa actual en la playa de Santa Marina (figura 1). La antigua entrada a la cueva se abre en la ladera occidental del macizo kárstico de Ardines, sobre una depresión endorreica por donde se sume el río San Miguel en la zona denominada La Gorgocera, al pie del pico Moría (76 m s.n.m.). Geológicamente, se ubica en el extremo oriental del Macizo Asturiano en la Cordillera Cantábrica, en un sector con materiales paleozoicos pertenecientes a la Zona Cantábrica del Macizo Ibérico, y está desarrollada en las calizas carboníferas (Moscoviense) de La Escalada (Navarro *et al.*, 1986) que están afectadas por pliegues y cabalgamientos producidos durante la orogenia Varisca. Se trata de una cavidad con un importante desarrollo kárstico estructurada en varios niveles, por cuyo nivel inferior circula actualmente el río San Miguel antes de salir al exterior y desembocar en la ría por la zona de la entrada actual a la cueva.

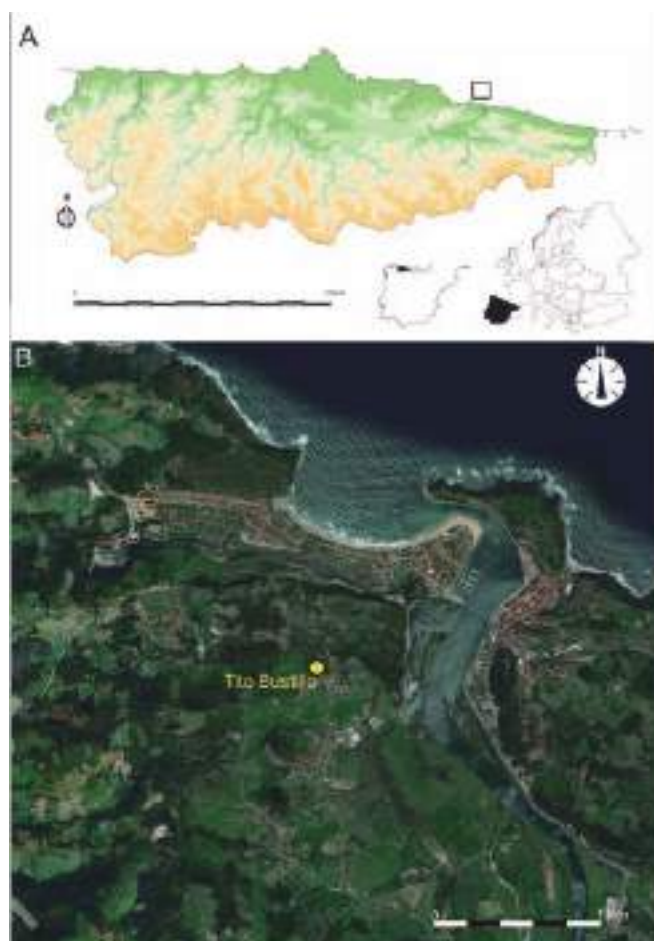


Figura 1. Situación de la cueva de Tito Bustillo (Ardines, Ribadesella, Asturias).

La cueva fue declarada Monumento Histórico Artístico en abril de 1970 y en 2008 fue incluida por la UNESCO en la Lista del Patrimonio Mundial de la Humanidad. A finales de 1968 apareció en la revista *Zephyrus* el primer trabajo científico sobre las representaciones gráficas de la cueva firmado por M. Mallo y M. Pérez (Mallo y Pérez, 1968), y en 1970 aparece la primera publicación internacional firmada por ambos autores junto a F. Jordá (Jordá, Mallo y Pérez, 1970), mientras que las primeras excavaciones arqueológicas las realizó M. A. García Guinea (MAGG) en el mes de febrero de 1970 (García Guinea, 1975). Desde esos primeros años hasta la actualidad las investigaciones prehistóricas en la cueva continuaron de forma más o menos constante, mediante las excavaciones de J. A. Moure Romanillo (JAMR) entre 1972 y 1986 (Moure, 1975; 1990; 1997; Moure y Cano 1976), los estudios del arte rupestre de este y R. de Balbín desde 1979 y las excavaciones practicadas por el último investigador citado entre 2001 y 2009 (Balbín *et al.*, 2022). A partir de 2020 un amplio equipo dirigido por E. Álvarez-Fernández (EAF), M. Cueto Rapado (MCR) y



*Figura 2. Panel Principal de Tito Bustillo (Foto: Miguel de Guzmán, Gobierno del Principado de Asturias).*

J. Tapia Sagarna (JTS) está llevando a cabo nuevas investigaciones arqueológicas en el yacimiento.

El descubrimiento de la cueva durante el desarrollismo español supuso una rápida apertura al público orientada a la recepción de un turismo masivo. La entidad artística, variedad temática y abundancia de recursos técnicos de su arte rupestre, unidas a la monumentalidad del llamado Panel Principal (figura 2), generaron pronto muchas expectativas sobre la posibilidad de su uso como recurso turístico. Asturias contaba ya con una larga tradición de apertura al público de cuevas con arte rupestre como Candamo, El Pindal y el Buxu, descubiertas a principios del siglo XX y posteriormente acondicionadas para la visita turística (González-Pumariega, 2008).

## **Las intervenciones arqueológicas**

### *Intervenciones arqueológicas en los años 70 y 80 del siglo XX en el "Área de Estancia"*

De entre las diferentes zonas de la cueva en las que se han realizado intervenciones arqueológicas, es el "Área de Estancia" la que más información ha proporcionado hasta el momento. El "Área de Estancia" se localiza cerca de la antigua entrada a Tito Bustillo (figura 3). A menos de 10 m de lo que se conoce como derrumbe interior, MAGG realizó en 1970 las primeras intervenciones arqueológicas mediante tres catas de aproximadamente 1 x 1m denominadas A1, B1 y C1 en las que identifica cuatro niveles que denominó I, II, III y IV (García Guinea, 1975). Posteriormente, entre 1972 a 1986, JAMR realiza un total de 10 campañas de excavación (1972, 1974-1977, 1979, 1981-1983 y 1986) donde excavó una





Figura 3. Izquierda: intervenciones en 1969 en el conchero de la entrada antigua de Tito Bustillo, de espaldas: Manuel Pérez (Foto: M. Mallo). Derecha: foto tomada en el año 2020.

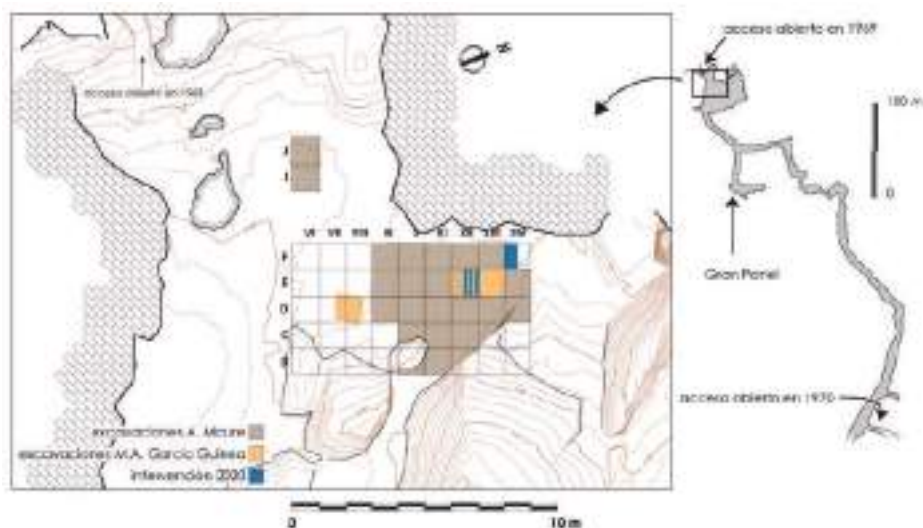


Figura 4. Localización y plano del Área de Estancia de la cueva de Tito Bustillo, donde se señalan los cuadros excavados entre 1970 y 1986.

superficie aproximada de 27 m<sup>2</sup>, incluyendo en la cuadrícula de excavación las catas B1 y C1 de MAGG (figura 4), y diferenció dos niveles denominados nivel 1 y nivel 2 (figura 5) (Moire, 1975, 1990 y 1997; Moire y Cano, 1976).

El nivel 1, en la zona más profunda y con un espesor de unos 50 cm, fue dividido en varias capas, definidas a partir del tipo de sedimento y de los restos arqueológicos documentados en él. Estas capas, que no siempre aparecen de forma continua, se agruparon en dos complejos, el Complejo Superior (1CS) y el Complejo Inferior (1CI). El 1CS, de unos 30-32 cm de espesor, engloba desde la capa 1a a la capa 1c1. La capa 1a se corresponde

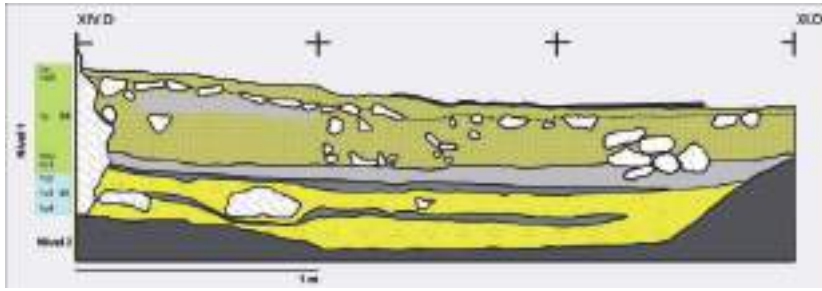


Figura 5. Perfil de los cuadros XIV D - XI D del Área de Estancia de Tito Bustillo (a partir de Moure 1997).  
CS: Complejo superior; CI: Complejo Inferior.

con el nivel superficial; la capa 1b estaría formada por bloques calizos que formarían lo que califica JAMR como “enlosado”. Los contactos entre las distintas capas halladas recibieron el nombre de capas 1a-b y 1b-c. El 1CI, de 18-20 cm de espesor, incluye las capas 1c2, 1c3 y 1c4. En las primeras campañas de excavación estas tres capas recibieron el nombre genérico de “capa 1c”. Las capas que conforman el nivel 1 no siempre aparecen en todos los cuadros excavados. El nivel 2 está formado por “arenas de inundación” que se corresponden con un periodo de actividad hídrica y sedimentaria de la cueva y en él

Nivel/Complejo	Capa	Método	Material	Ref. Lab.	<sup>14</sup> C	±	cal BP (p=98%)
NIVEL 1 CS	1a	14C	Carbón	CSIC-261	14.220	180	17.688-17.029
NIVEL 1 CS	1a	14C	Conchas	CSIC-155B	15.400	300	18.276-17.516
NIVEL 1 CS	1a	14C	Conchas	CSIC-155A	15.180	300	18.069-17.310
NIVEL 1 CS	1a	14C	Carbón	CSIC-154	14.250	300	17.848-16.995
NIVEL 1 CS	1a	14C AMS	Concha ( <i>L. littorea</i> )	OxA-29095	15.175	50	17.859-17.510
NIVEL 1 CS	1a	14C AMS	Concha ( <i>L. littorea</i> )	OxA-29096	15.150	50	17.826-17.481
NIVEL 1 CS	1b	14C AMS	Hueso	OxA-6259	12.850	90	15.510-15.223
NIVEL 1 CS	1b/c	14C AMS	Hueso	OxA-6260	14.550	110	17.945-17.511
NIVEL 1 CS	1c1	14C AMS	Hueso	OxA-6261	14.440	100	17.777-17.436
NIVEL 1 CI	1c	14C	Huesos	I-8332	13.520	220	16.650-15.970
NIVEL 1 CI	1c	14C	Conchas ( <i>P. vulgata</i> )	I-8331	13.870	220	16.387-15.734
NIVEL 1 CI	1c2	14C AMS	Carbón (1240gr)	GrN-12753	14.930	70	18.277-18.184
NIVEL 1 CI	1c2	14C AMS	Hueso	OxA-6262	14.680	110	18.172-17.868
NIVEL 1 CI	1c2	14C AMS	Concha ( <i>L. littorea</i> )	OxA-29117	15.570	55	18.261-17.996
NIVEL 1 CI	1c3	14C AMS	Hueso	OxA-6858	14.910	110	18.570-18.085
NIVEL 2	-	14C	Hueso	Ly-4212	14.890	410	18.677-17.547

Tabla 1. Dataciones radiocarbónicas (BP) del “Área de Estancia” de Tito Bustillo (Moure, 1990, 1997; Álvarez-Fernández et al., 2015). 1CS: Complejo Superior; 1CI: Complejo Inferior.

los restos arqueológicos, casi todos ellos faunísticos, son escasos. En los cuadros en los que se excavó este nivel no se alcanzó su base.

JAMR realizó la correspondencia de sus niveles con los documentados por MAGG en los sondeos de 1970. Así, relacionó las capas 1a y 1b con el nivel I, la capa 1b-c, con el nivel II, la capa 1c, con el nivel III y la capa 2, con el nivel IV. Las evidencias arqueológicas documentadas por MAGG y, sobre todo, por JAMR, junto con diferentes análisis (micromamíferos, polen) y dataciones radiocarbónicas (un total de 13 fechas radiocarbónicas obtenidas tanto por método convencional como AMS) permitieron adscribir el depósito documentado en "Área de Estancia" de Tito Bustillo al Magdaleniense (Moure, 1990). Estaría datado entre ca. 15700 y ca. 13300 BP en fechas de Carbono 14 convencional, y entre ca. 15000 y 12700 BP, si se consideran las fechas de Carbono 14-AMS (Moure, 1990, 1997) (Tabla 1).

El nivel 1 es considerado como un palimpsesto en el que se pueden reconocer diferentes ocupaciones tanto de la fase reciente, como media y antigua del Magdaleniense. La industria lítica, sin embargo, es poco característica, con una gran abundancia de hojitas de dorso, acompañadas de diferentes tipos de raspadores y buriles. Sílex y cuarcita se utilizarían con porcentajes similares. Para la realización de los útiles citados se utilizaría sílex, mientras que la cuarcita se dejaría para la fabricación de raederas y denticulados (Moure, 1990). Entre la industria ósea, elaborada en su mayor parte en hueso y asta, destacan arpones con una hilera de dientes, diferentes tipos de azagayas, punzones, espátulas agujas, etc. Completan el registro una gran cantidad de objetos de adorno elaborados en diferentes materias primas (concha, diente, hueso, asta, azabache, etc.). Además de la industria ósea, hay que destacar las piezas de arte mueble realizadas en materias primas de origen animal (esculturas en asta, útiles óseos grabados), como mineral (plaquetas grabadas). Por lo que se refiere a las decoraciones, algunas piezas aparecen grabadas con representaciones animales naturalistas, donde el caballo es el animal más representado. Los signos están presentes de forma aislada y acompañando a las representaciones animales grabadas en los soportes (Moure, 1990).

Por lo que respecta los restos arqueozoológicos, dentro de los terrestres se advierte un predominio del ciervo, al que siguen la cabra, el caballo y el corzo. También se han documentado escasos restos de animales como el reno y la foca anillada, que junto con el topillo nórdico indicarían que el nivel 1 se formó en una fase fría (Altuna, 1976, 1995; Fuentes y Meijide, 1975). Por lo que respecta a la explotación de recursos marinos, hay que señalar el marisqueo casi exclusivo de dos gasterópodos, la lapa y el bigaro (Moreno y Morales, 1987; Álvarez-Fernández, 2012, 2013). Un primer estudio sobre los peces indica la predominancia de salmónidos (trucha marisca o reo y salmón) (Morales, 1984; Moure, 1990). Los análisis polínicos del nivel 1 confirmarían su formación en una fase fría de tipo estepario, con abundancia de brezo y el predominio de gramíneas sobre las ericáceas (Boyer Klein y Leroi Gourhan, 1987; Moure, 1990).

Sin embargo, las dataciones radiocarbónicas obtenidas en el "Área de Estancia" de Tito Bustillo no son consecuentes con la sucesión estratigráfica y con los restos arqueológicos documentados en ella, aspectos que han sido apuntados por investigadores como A. Gómez Fuentes (1978) y C. González Sainz (1989). Las nuevas fechas radiocarbónicas

obtenidas con posterioridad mediante la técnica AMS tampoco precisaron acertadamente la cronología del Área de Estancia (Moure, 1997).

La información disponible para el nivel 2 es mucho más escasa, debido a que este nivel sólo se excavó en profundidad en dos cuadros, donde los restos arqueológicos son mucho menos abundantes que el nivel 1, entre los que predominan los huesos de macromamíferos, fundamentalmente de ciervo (Altuna, 1976, 1995) y, en menor medida, conchas de moluscos, exclusivamente lapas (Moreno y Morales, 1987; Álvarez-Fernández, 2012, 2013). Los datos polínicos indican una fase húmeda con ambiente de bosque (pino, aliso, abedul y árboles termófilos) (Boyer-Klein y Leroi-Gourhan, 1987; Moure, 1990). La única datación (convencional) publicada, sitúa al nivel 2 ca. 14.900 BP.

### *Nuevos datos sobre el "Área de Estancia" de Tito Bustillo*

Con el objeto de depositar todos los restos bióticos procedentes de las excavaciones de MAGG y JAMR en el "Área de Estancia" en el MAA, desde el año 2011 se han ido reuniendo materiales de origen animal custodiados hasta ese momento en diferentes instituciones (UAM, Sociedad de Ciencias Aranzadi, IIPC-Universidad de Cantabria). Al mismo tiempo, se ha revisado el material arqueofaunístico depositado hasta el momento en el MAA, así como una pequeña parte ubicada en el MUPAC (excavaciones de MAGG). Se comenzó con la revisión de los invertebrados marinos y continentales a la que siguió el examen de micromamíferos, aves y peces.) y en la actualidad se está completando el análisis de la industria ósea y de los objetos de adorno. Además, en el marco de una tesis doctoral en curso, se están estudiando las materias primas líticas de la capa 1c2.

Para precisar la cronología del "Área de Estancia" se tomaron tres muestras sobre conchas de lapas, dos del nivel 1a y una del nivel 1c2 con las que se realizaron dataciones radiocarbónicas AMS. Los resultados obtenidos, una vez calibrados indica que la secuencia está ubicada entre ca. 19000 y 17500 cal BP (Álvarez-Fernández *et al.*, 2015).

Las investigaciones arqueozoológicas se han centrado en el estudio de los restos de aves que estaban inéditos, la revisión de todos los restos de microvertebrados (de las campañas de 1979 en adelante), y en un nuevo estudio completo de los restos de peces. Por último, se ha revisado la totalidad de los crustáceos y moluscos marinos del yacimiento y se han publicado los restos de moluscos terrestres (Álvarez-Fernández 2002, 2006, 2012, 2013, 2014; Álvarez-Fernández *et al.*, 2015, 2018; Carriol y Álvarez-Fernández, 2015). Los resultados de estas nuevas investigaciones pueden consultarse, de forma resumida, en Álvarez-Fernández *et al.* (2022).

En cuanto a la revisión y estudio de las evidencias de industria ósea y objetos de adorno, por el momento, se han podido identificar nuevas piezas de industria ósea y objetos de adorno-colgantes, todos procedentes del nivel 1, tanto del 1CS como del 1CI. En el caso de los objetos de adorno-colgantes se ha incrementado su número, con respecto a estudios previos (Moure, 1990; Álvarez-Fernández, 2002, 2006; Álvarez-Fernández *et al.*, 2018). Entre estos objetos de adorno, se han podido identificar piezas elaboradas en materias primas hasta entonces no documentadas, por ejemplo, el hallazgo de un incisivo

de reno perforado. El estudio de las piezas elaboradas a partir de conchas marinas indica diferencias entre los dos complejos, con una mayor presencia de taxones en el 1CS que en el 1CI. En los dos se observa un predominio de *Littorina obtusata* y de *Trivia* sp. Entre los artefactos elaborados en hueso, se ha podido determinar que al menos dos fueron fabricadas a partir de huesos de cetáceos, a los que habría que sumar tres más como probables (Lefebvre *et al.*, 2021). En la actualidad, desde el MAA, se están restaurando y acondicionando para su almacenamiento estable las piezas de industria ósea de las excavaciones llevadas a cabo por MAGG y JAMR.

Respecto a la industria lítica, durante el 2022 se está analizando la procedencia de los sílex correspondientes a la capa 1c2 (1CI). Aquí el porcentaje de esta materia prima es ligeramente superior (ca. 50%) al de la cuarcita. Entre los tipos de sílex, además de las variedades de captación local (hasta 30 km de distancia) como, por ejemplo, el tipo Piloña, y regional (entre 30 km y 120 km de distancia) como, por ejemplo, el tipo Monte Picota, también se documenta la presencia destacada del trazador flysch pirenaico (a partir de 120 km de distancia), siendo probablemente mayoritaria la variedad Kurtzia, con afloramientos en la costa vizcaína. También se han podido identificar otros importantes trazadores de la cuenca Vasco-Cantábrica como el sílex de Treviño y, en menor medida, el sílex de Urbasa. Igualmente, resulta reseñable la identificación de algunos tipos silíceos norepirenaicos procedentes de la cuenca Suraquitana como el sílex de Salies-de-Béarn y, probablemente, el sílex de Tercis (Álvarez-Fernández *et al.*, 2021; Martín Jarque *et al.*, 2022).

### *Primeros resultados de las intervenciones de la campaña del año 2020 en el "Área de Estancia"*

Con el objeto de contextualizar mejor las evidencias de industria ósea, los objetos de adorno y los objetos de sílex recuperadas en las intervenciones de MAGG y AMR, se están realizando desde el año 2020 nuevas investigaciones, bajo la dirección de EAF, MCR y JTS (Álvarez-Fernández *et al.*, 2022).

En estas intervenciones se llevó a cabo, además, la topografía exterior e interior de la cueva, afectando a una superficie de más de 1.000 m<sup>2</sup>, de los que sólo visualizamos los que dan contexto a las excavaciones de MAGG y JAMR. Como sistema de coordenadas generamos uno local coincidente con el rumbo y divisiones internas de las intervenciones arqueológicas de las campañas de 1972 y 1974. Con este sistema se han referenciado todo el registro arqueológico de las intervenciones de 2020 y 2022.

Antes de proceder a la realización de nuevos muestreos y después de obtener la topografía, en la campaña de 2020 se procedió a la limpieza de los perfiles de las excavaciones realizadas por MAGG y JAMR (figura 5). El sedimento fue cribado con mallas metálicas finas de hasta 1 mm de luz, lo que posibilitó la recuperación de un número considerable materiales de origen biótico, como huesos de mamíferos (fundamentalmente de ciervo) y conchas de moluscos marinos (lapas y bígamos). También se recuperaron fragmentos de útiles y de piezas en proceso de fabricación, elaborados en asta y hueso (figura 6). Destaca el hallazgo, además, de más de una docena de objetos de adorno realizados en

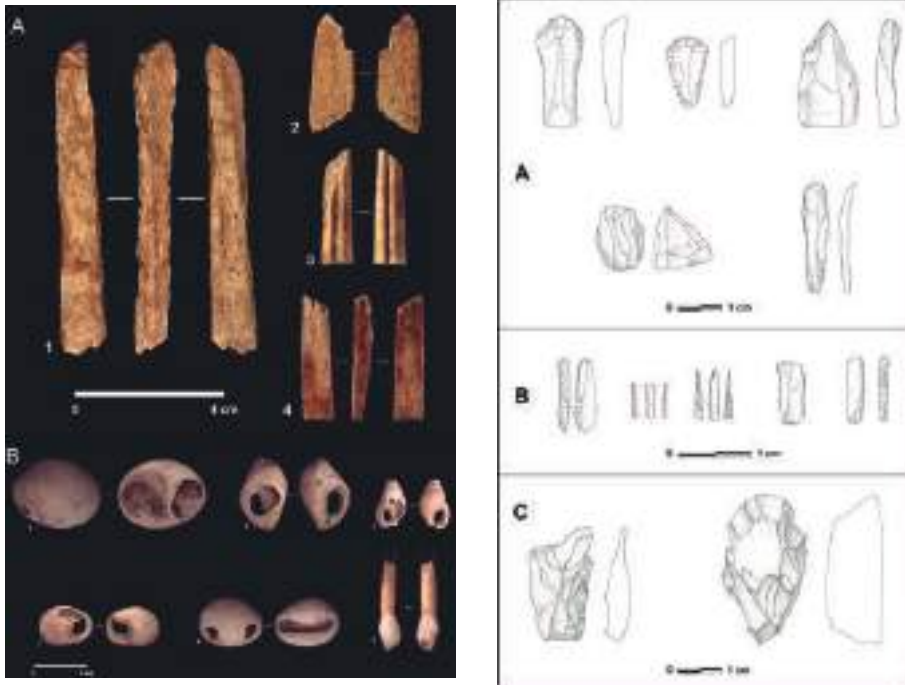


Figura 6. (izquierda). Tito Bustillo “Área de Estancia”, limpieza de perfiles de la campaña de 2020. A: Industria ósea, 1, varilla de asta de cérvido con evidencias de ranurado; 2, fragmento distal de útil con extremo romo en costilla; 3, fragmento de azagaya de asta de ciervo con doble acanaladura; 4, fragmento mesial de una azagaya biselada en asta de cérvido. B: Objetos de adorno, 1, *Littorina obtusata*; 2, *Nucella lapillus*; 3, *Tritia incrassata*; 4, *Tritia pellucida*; 5, *Trivia* sp., 6, incisivo de reno fragmentado a la altura de la perforación.

Figura 7. (derecha). Tito Bustillo “Área de Estancia”, limpieza de perfiles de la campaña de 2020. Útiles líticos. A: raspadores, buril, núcleo y lámina retocada en sílex. B: hojitas de dorso en sílex. C: raedera y raspador en cuarcita.

concha y en diente (figura 6). También se documentó un incisivo lateral superior humano (*Homo sapiens*).

Entre el material de origen abiótico destaca la recuperación de industria lítica realizada en cuarcita y sílex. Entre estos últimos se han podido identificar, con relación a su procedencia, los tipos Piloña, Monte Picota y Flysch-Kurtzia. Se han clasificado distintos útiles, entre los que destacan raspadores, buriles y hojitas de dorso con retoque abrupto (figura 7), además de otras evidencias de origen abiótico (plaquetas de arenisca y cantos de cuarcita rubefactados, presumiblemente formando parte de hogares).

## La gestión de las visitas públicas

### *La apertura al público: los primeros años de gestión*

La apertura al público de Tito Bustillo se produjo en agosto de 1969. A fin de habilitar una entrada para los visitantes se realizaron dos proyectos: el primero ejecutado consistió

en abrir una trinchera a través del derrumbe que cegaba la entrada original. Este acceso supuso un fuerte acondicionamiento interior de la cavidad, abriendo camino donde no lo había, excavando o rellenado el suelo para facilitar el tránsito, tallando escalones sobre la propia roca e instalando más de ochenta puntos de luz incandescente a lo largo del recorrido; también la construcción de una carretera de acceso para el tráfico rodado en la parte alta del macizo de Ardines (Díaz García y Mallo Viesca, 2018). Tanto la excavación de la trinchera como el acondicionamiento interior se hicieron sin control geológico o arqueológico, lo que supuso una grave pérdida de información en el conocimiento científico de la cavidad. Tito Bustillo permaneció abierta al público ese año desde agosto hasta octubre (figura 8).



Figura 8. Noticia de la apertura al público de Tito Bustillo en 1969. La Nueva España.

El segundo proyecto se ejecutó al año siguiente y consistió en la apertura de un túnel artificial de 150 m desde Ribadesella (figura 9), acondicionando un entorno que permitiese la construcción de un aparcamiento para vehículos y la dotación de edificios auxiliares,



*Figura 9. Obras de apertura del túnel artificial de acceso a Tito Bustillo desde Ribadesella. La Nueva España.*

con tienda y cafetería. El fin último era facilitar el acceso a multitud de visitantes, con una entrada ubicada en el mismo casco urbano de Ribadesella. La construcción de ese túnel supuso una grave alteración de las condiciones ambientales de Tito Bustillo, y desnaturalizó por completo tanto el acceso como el propio desarrollo de la visita (Jiménez Sánchez et al. 2018).



*Figura 10. Suplemento dominical Blanco y Negro del diario ABC, 1969.*



En Tito Bustillo se siguió el modelo de otras cuevas abiertas al turismo en aquellos años: Nerja, descubierta en 1959 y abierta al público en 1960, también a través de un acceso practicado para favorecer la entrada de visitantes, ubicada en un entorno costero con turismo de sol y playa; y particularmente Altamira (figura 10), que si bien ya tenía una larga tradición como enclave turístico, en los años sesenta del siglo XX alcanzaba los 150.000 visitantes anuales, sufriendo un proceso de acondicionamiento turístico irreversible a fin de poder acoger la masa de personas que peregrinaban diariamente para visitar la cueva, convertida en uno de los principales reclamos turísticos del país y generadora de importantes beneficios económicos (Heras Martín *et al.*, 2017).

Estos procesos deben analizarse teniendo en cuenta el contexto económico y social de España en esa época. Entre 1960 y 1970 tienen lugar los planes de desarrollo económico y social del franquismo, que convierten al turismo en uno de los pilares estratégicos de la economía española. El turismo español se desarrollará a partir de unas condiciones de penuria que implicaron una serie de contrapartidas que afectarán al desarrollo urbanístico costero, marcado por el turismo de sol y playa y también, aunque en menor medida, a los espacios naturales y cuevas y yacimientos arqueológicos (Vallejo Pousada, 2015).

### *La sensibilización sobre conservación: la Mesa Redonda de Colombres*

No obstante lo anterior, la apertura pública de Tito Bustillo a partir de 1970 no estuvo exenta de una cierta precaución: se determinan cierres estacionales que, en principio, se extienden desde noviembre hasta abril y se establecen cupos máximos de 15 visitantes

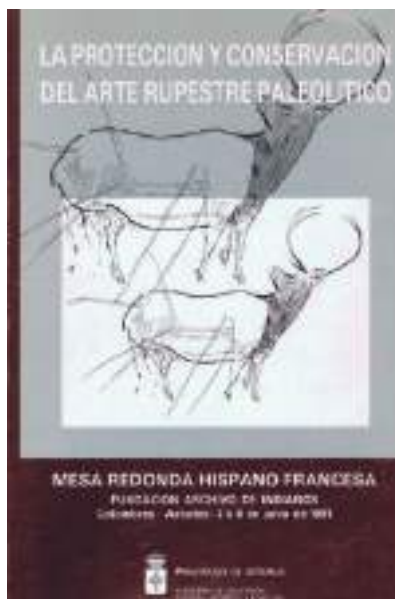


Figura 11. Actas de la mesa redonda hispano francesa sobre protección y conservación del arte rupestre paleolítico. Servicio de Publicaciones del Principado de Asturias, 1993.

por grupo. Ya para 1977 se fija un periodo de apertura de seis meses al año, de abril a septiembre, con cupos máximos de 15 personas por grupo (si bien con altas frecuencias de acceso) y se establecen visitas guiadas y controladas de corta duración.

Los cierres de Altamira en 1977 y de Candamo en 1980, generaron una mayor sensibilización sobre la conservación de las cuevas decoradas. En Asturias resultará fundamental la incorporación de F. Javier Fortea como asesor del Patronato gestor de cuevas y yacimientos arqueológicos de la Diputación Provincial. En 1981 se establece un cupo máximo para Tito Bustillo de 400 personas diarias, manteniendo el límite de 15 visitantes por grupo. Además, se decide abrir al público La Cueva de Ardines, en los aledaños de Tito Bustillo, gran cavidad sin arte rupestre significativo, de notable interés geológico, que cumplirá con la función de desviar y asumir la excesiva presión de visitantes.

Transcurrida una década desde el cierre de Candamo, el Principado de Asturias y la Universidad de Oviedo organizaron en Colombres (Ribadedeva) la Mesa Redonda Hispano-Francesa sobre la protección y conservación del arte rupestre paleolítico (figura 11). Dicho encuentro permitió una recapitulación y puesta en común sobre la situación entonces y sobre los modelos de gestión aplicados; además dictó unas pautas a seguir en lo relativo a los sitios abiertos al público, incidiendo en la necesidad de equilibrar la conservación y el disfrute, aunque estableciendo como prioridad fundamental la protección del bien (Fortea Pérez, 1993).

Entre las recomendaciones que se establecieron en la Mesa Redonda de Colombres respecto a las cuevas con arte rupestre abiertas al público se encontraba la necesidad de concretar el régimen de visitas, con el establecimiento o no de clausuras temporales, cupos diarios, número de grupos, número de personas por grupo y el espacio de tiempo entre visitas. En el caso de Tito Bustillo, un estudio llevado a cabo a principios de la década de los 90 recomendaba algunas directrices respecto al régimen de visitas, que incluían la reducción de visitantes diarios, la distribución de los grupos a lo largo de las ocho horas de jornada de trabajo de los guarda-guías, espaciando los tiempos de acceso a la cueva y rebajando el tiempo de estancia en el Panel Principal a la mitad, limitándolo a 10 minutos por grupo, o bien reducir a la mitad el número de personas por grupo que accedían simultáneamente a este espacio. De este modo se establecieron 15 turnos diarios con cupos máximos de 25 personas y accesos cada 25 minutos. Para el año 2000, la cifra total de visitantes fue de 33.347 personas (Hoyos Gómez *et al.*, 1996; Fortea Pérez y Hoyos Gómez, 1999).

## **La gestión del siglo XXI: hacia un modelo conservacionista**

A pesar de todo, los estudios ambientales llevados a cabo en la cueva seguían incidiendo en los problemas de conservación derivados del sistema de visitas. Así, un estudio realizado en 2002 señalaba que la larga duración de la visita, que sobrepasaba los 50 minutos, unida al hecho de que los pases se produjesen cada 25 minutos, impedían la recuperación a lo largo del día de los parámetros microclimáticos previos a la primera entrada del público en la zona del Panel Principal. Esta situación generaba un efecto

acumulativo de la incidencia de las visitas, especialmente en la temperatura y niveles de CO<sub>2</sub>, ya señalado en los estudios de principios de los noventa, por lo que parecía evidente que las modificaciones del régimen de visitas no habían surtido los efectos deseados (Sánchez Moral *et al.*, 2002).

En este contexto, una primera reducción del cupo de visitantes tiene lugar en 2008, cuando se establece un régimen de visitas con 12 pases diarios y un cupo máximo de 20 personas por grupo. Para ese año ya estaba en funcionamiento un sistema informático de reserva previa, que permitió la reducción de la presión turística presencial, racionalizando el flujo de visitantes y eliminando las colas de la taquilla, favoreciendo una mejor organización de los pases diarios. Los datos anuales de visitantes efectivos que entraron en la cueva en 2007 y 2008 fueron de 19.842 y 19.541 respectivamente<sup>1</sup>.

El cambio de tendencia en el modelo de gestión turística de Tito Bustillo se producirá en 2011. En marzo de ese año se inaugurará el Centro de Arte Rupestre "Tito Bustillo", equipamiento museístico de sitio vinculado a la cueva, destinado a ayudar a gestionar de manera adecuada la demanda de visitantes y la actividad turística en torno a Tito Bustillo, sin afectar a la conservación de la cavidad (figura 12). Esta nueva coyuntura permitió promover un cambio en el sistema de visitas, tendente a permitir el equilibrio entre el disfrute y la conservación del bien sin que ello supusiera una merma en las posibilidades de visita a la cueva original. De este modo, se determinó una reducción del cupo diario de visitantes, pasando los grupos de 15 a 10 diarios y disminuyendo el número de visitantes de 20 a 15 por grupo. Esta reducción, unida al establecimiento de una flexibilidad horaria por parte del personal, permitió aumentar el intervalo entre pases de 25 a 45 minutos, lo que posibilitaba un mayor tiempo de descanso y recuperación ambiental de la sala del Panel Principal. Estas medidas llevaron aparejada una ampliación del periodo de apertura, a partir de entonces desde marzo hasta octubre. En la práctica permitieron una distribución más racional del cupo anual de visitantes, que se mantuvo constante, aliviando la carga diaria soportada por la cueva. Así, en el año 2010, el total de visitantes a Tito Bustillo fue de 23.764; en los años 2018 y 2019, las cifras de visitantes efectivos a la cueva fueron de 22.154 y 20.757 respectivamente<sup>2</sup>.

## **La gestión durante la pandemia de COVID-19**

Durante la pandemia provocada por el COVID-19 el proceso de reapertura de las cuevas con arte rupestre supuso un auténtico reto, dadas las condiciones naturales de los espacios afectados: sitios confinados y espacios reducidos, con escasa ventilación, altas concentraciones de CO<sub>2</sub> e imposibilidad para mantener la distancia de seguridad

---

<sup>1</sup> Los datos de 2007 y 2008 proceden de la contabilidad llevada a cabo por el personal guarda-guía a partir de la anotación del número de personas que entraban en cada grupo. Al margen de estos dos años, entre 2001 y 2009 fueron detectados errores y alteraciones en el registro de los datos reportados a la Consejería de Cultura, lo que no permite conocer de manera fehaciente las cifras reales de visitantes durante ese periodo.

<sup>2</sup> En los últimos años, el sistema de gestión informático se basa exclusivamente en la venta anticipada de entradas. Dado que no siempre quien compra la entrada, a veces con semanas o meses de antelación, se presenta a la visita, los datos que aportamos son de visitantes efectivos que acceden a la cueva, no del número de entradas vendidas.



Figura 12. Centro de Arte Rupestre Tito Bustillo. Empty, Sociedad Pública de Gestión y Promoción Turística y Cultural del Principado de Asturias, S.A.U. (RECREA).

interpersonal. A lo largo del mes de mayo desde la Consejería de Cultura del Principado de Asturias se desarrollaron los primeros protocolos relacionados con los espacios patrimoniales, contemplando la posibilidad de reapertura de las cuevas más espaciosas (El Pindal, Tito Bustillo, La Cueva y Candamo) y adaptando los cupos a unas medidas de contención destinadas a minimizar el riesgo de contagio (Gobierno del Principado de Asturias, 2020a).

Siguiendo las recomendaciones del Ministerio de Cultura y las directrices del protocolo redactado por la Consejería de Cultura del Principado de Asturias, la reapertura de estas cuevas se llevó a cabo con un estudio de la capacidad de carga máxima y sectorizada sin comprometer la seguridad de los visitantes, evitando “cuellos de botella” y estableciendo itinerarios de una sola dirección en la circulación por los yacimientos. En el caso de Tito Bustillo se fijó un cupo máximo de 6 visitantes por grupo, en función del espacio disponible en la zona del Panel Principal, y cinco turnos de acceso, con el fin de evitar los cruces de grupos dentro de la cueva y limitar la permanencia dentro de la cavidad a un único grupo, permitiendo este régimen un tiempo amplio de recuperación ambiental del sector del Panel Principal. En la práctica, el cupo de visitantes quedó limitado a 30 personas diarias. Estas condiciones estuvieron vigentes a lo largo de 2020, 2021 y parte de 2022; durante este último año, en función de la evolución de la pandemia, se han ido ampliando paulatinamente los cupos de visitantes por grupo. Las cifras anuales de visitantes de 2020 y 2021 han sido de 2.786 y 4.203 respectivamente (tabla 2).

mes/año	2000	2007	2008	2010	2018	2019	2020	2021
marzo	-	-	1.757	-	1.880	2.284	637	489
abril	4.053	2.687	1.686	3.243	2.910	2.539	0	491
mayo	4.271	2.728	3.105	3.522	3.015	2.820	0	571
junio	6.012	3.722	2.648	2.228	3.031	2.944	286	439
julio	7.664	4.805	4.131	6.287	2.840	2.840	550	602
agosto	7.625	3.672	4.255	5.219	2.868	2.616	517	517
septiembre	3.722	2.228	1.959	3.265	2.987	2.801	472	550
octubre	-	-	-	-	2.623	1.913	324	544
<b>total</b>	<b>33.347</b>	<b>19.842</b>	<b>19.541</b>	<b>23.764</b>	<b>22.154</b>	<b>20.757</b>	<b>2.786</b>	<b>4.203</b>

Tabla 2. Evolución de las cifras de visitantes a lo largo del siglo XXI. Datos registrados de acceso a Tito Bustillo. Elaboración propia.

## Una oportunidad para la reflexión

Tras más de dos años de pandemia y de gestión en condiciones difíciles, parece necesaria una reflexión sobre las condiciones de acceso y disfrute a los espacios naturales y monumentales. De hecho, el documento Pautas para la gestión, conservación y disfrute público del Patrimonio Cultural en la desescalada de la crisis sanitaria (COVID-19), desarrollado por el Ministerio de Cultura y Deporte y el IPCE en mayo de 2020, indicaba que: "antes del cese de la actividad de museos, archivos, bibliotecas, edificios históricos, monumentos, yacimientos arqueológicos etc., ocasionada por la crisis sanitaria por COVID-19, había diferentes reflexiones sobre el equilibrio entre la masificación de las visitas, la inconveniencia de considerar el incremento incesante de visitantes al año como un parámetro de éxito en la gestión de las instituciones, las dificultades de definir la capacidad de acogida y los límites de aforo, así como la influencia negativa de estos factores tanto en la conservación de los bienes culturales como en la experiencia de su disfrute por parte de la sociedad. La coyuntura actual puede representar una oportunidad para replantearse todas estas cuestiones y que las instituciones trabajen en la optimización global del modo de acceso al patrimonio" (Martín Gil y Villar Fernández, 2020).

En el caso de las cuevas con arte rupestre parece oportuno ese proceso de recapitulación y debate sobre el modelo de gestión, analizando la práctica acumulada en estos dos años. Sin duda las condiciones de acceso en la situación de pandemia han mejorado notablemente la capacidad de disfrute, con una mejor adaptación a las características de cada grupo y una atención más personalizada, cuidando de manera más precisa de sus necesidades en el transcurso de la visita, algo particularmente importante en el caso de personas de edad avanzada, de corta edad o con limitaciones físicas. También han permitido encontrar momentos de reflexión o salidas del guion habitual cuando era

pertinente, favoreciendo la mejora en la comunicación y la interacción entre guías y visitantes, induciendo a la formulación de preguntas y apreciaciones que redundaron en una transmisión del conocimiento más dinámica y completa. En el caso concreto de Tito Bustillo, los grupos pequeños permitieron una mejor observación del arte paleolítico, teniendo en cuenta que el espacio físico disponible para los visitantes en el Panel Principal es muy reducido. Por otro lado, aumentaron notablemente los visitantes locales y se estimularon sobremanera las visitas de grupos familiares. También consolidaron su presencia pequeños operadores o guías locales que programan visitas dentro de circuitos turísticos personalizados con grupos muy reducidos, dirigidos a un perfil más especializado.

En contraposición, la limitación en los cupos ha supuesto una mayor dificultad para el acceso de los grandes grupos turísticos de turoperadores o escolares, aunque cabe preguntarse si ese es el modelo al que debe dirigirse la gestión de las cuevas con arte rupestre. Si nos guía algo más que las grandes cifras, equilibrando el derecho al acceso con la conservación, el reto es lograr la sostenibilidad del sistema de gestión, estableciendo estrategias de disfrute y educativas que vayan más allá de la consabida visita escolar y/o recreativa. Este reto se corresponde con el planteamiento turístico desarrollado por el Principado de Asturias, que aboga por un modelo sostenible social, económica y ambientalmente, fomentando un uso racional, responsable y respetuoso de los recursos más vulnerables (Gobierno del Principado de Asturias, 2020b).

## **Conclusiones**

Desde el punto de vista arqueológico, la cueva de Tito Bustillo posee una de las secuencias magdalenienses más importantes del SO de Europa, aunque también hay constancia de ocupaciones posteriores al Magdaleniense, ya de época holocena, pero probablemente también anteriores. La reactivación de las investigaciones en el "Área de Estancia" nos permitirá precisar de forma más detallada las características de estas.

Desde la óptica de la gestión de visitantes y en el caso concreto de Tito Bustillo, una cueva con arte rupestre cuyo acceso se encuentra en el casco urbano de una población costera de veraneo y turismo, el reto de cara a la gestión futura tras más de dos años de pandemia es asumir las limitaciones en aras de la conservación y el disfrute. La experiencia adquirida con las restricciones debidas a la pandemia y el aprovechamiento de los potentes recursos complementarios existentes (La Cueva de Ardines y el Centro de Arte Rupestre) pueden ayudar a superar el modelo de masificación heredado desde los años setenta del siglo XX, apostando por un modelo de apertura racional, conservacionista y sostenible.

## **Agradecimientos**

Agradecemos a J. Alfonso Moure y a Lourdes Ortega la confianza y la ayuda prestada para realizar el estudio de los materiales arqueológicos de Tito Bustillo. Estos trabajos han sido financiados en el marco de los siguientes proyectos: HAR2011-29907-C03-03/HIST, CoChange (HAR2014-51830-P), SimTIC (HAR2017-82557-P), PaleontheMove (PID2020-

114462GB-I00) y CantabricOIS2 (PID2020-115192GB-I00), financiados por el Gobierno de España.

## Referencias

- Altuna, J. (1976). *Los mamíferos del yacimiento prehistórico de Tito Bustillo (Asturias). Excavaciones en la cueva de "Tito Bustillo" (Asturias): trabajos de 1975.* (A. Moure, M. Cano, eds.), Instituto de Estudios Asturianos, Oviedo, 149-194.
- Altuna, J. (1995). *Faunas de mamíferos y cambios ambientales durante el Tardiglaciario Cantábrico.* In: Moure, A., González, C. (eds.), *El final del Paleolítico Cantábrico.* Universidad de Cantabria. Santander, 77-117.
- Álvarez-Fernández, E. (2002). Perforated *Homalopoma sanguineum* from Tito Bustillo (Asturias): Mobility of Magdalenian groups in northern Spain. *Antiquity*, 76, 641-646. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00091043>.
- Álvarez-Fernández, E. (2006). Los objetos de adorno-colgantes del Paleolítico Superior y del Mesolítico en la cornisa cantábrica y en el valle del Ebro: una visión europea. *Colección Vitor*, 195, Universidad de Salamanca, Salamanca.
- Álvarez-Fernández, E. (2012). Análisis de los moluscos marinos de la cueva de "Tito Bustillo" (Ribadesella, Asturias): campañas de 1983, 1984 y 1986. *Boletín del Real Instituto de Estudios Asturianos*, 179-180, 9-27.
- Álvarez-Fernández E. (2013). La cueillette des coquillages dans la région Cantabrique au Magdalénien: la grotte de "Tito Bustillo" (Asturies, Espagne). *L'Anthropologie*, 117 (1): 62-93.
- Álvarez-Fernández E. (2014). *Un siglo de hallazgos: evidencias arqueozoológicas de origen marino en el Paleolítico superior asturiano.* In: Álvarez-Alonso, D. (ed.), *Los grupos de cazadores-recolectores paleolíticos del occidente cantábrica*, Entemu, XVIII, 265-282.
- Álvarez-Fernández, E., Bécares, J., Cueto, M., Uzquiano, P., Jordá Pardo, J. F., Arias, P. (2015). *Nuevos datos sobre el final del Paleolítico superior en el curso bajo del río Sella (Asturias, España).* In: Ramil, E. (ed.), *3er Congreso Internacional de Arqueología de Vilalba, Fervedes*, 8: 123-132.
- Álvarez-Fernández, E., Cueto, M., Tapia, J., Aparicio, M. T., Douka, K., Elorza, M., Gabriel, S., García-Ibaibarriaga, N., Murelaga, X., Suárez-Bilbao, A., Arias, P. (2018). *Nuevos datos cronoestratigráficos y arqueozoológicos de la cueva de Tito Bustillo-Área de Estancia (Ribadesella, Asturias).* In: García-Ibaibarriaga, N., Murelaga-Bereikua, X., Suárez-Bilbao, A., Suárez-Hernando, O. (coords.), *Paleoambiente y Recursos bióticos del Pleistoceno Superior Cantábrico: estado de la cuestión a la luz de las nuevas investigaciones.* Kobie Serie Anejos, 18: 109-121, Vitoria.
- Álvarez-Fernández, E., Martín-Jarque, S., Tarrío, A. (2021). *Flint & Shell: raw materials as evidence of long-distance contacts in Cantabrian Spain during the Magdalenian.* In: Gauzinski-Windheuser, S., Jöris, O. (eds.), *The Beef behind all Possible Pasts – The Tandem Festschrift in Honour of Elaine Turner and Martin Street*, Monographien des RGZM, Ed. Römisch-Germanisches Zentralmuseum, Mainz, 215-235.
- Álvarez-Fernández, E., Arias, P., Bécares, J., Cubas, M., Elorza, M., Gabriel, S., Martín-Jarque, S., Portero, R., Jordá Pardo, J.F. (2022). *Intervenciones arqueológicas en la cueva de El Cierro (Fresnu, Ribadesella, Asturias, España): síntesis de los datos disponibles procedentes de los recientes trabajos realizados en tres zonas del yacimiento.* In: Jordá Pardo, J.F., Martín-Jarque, S., Portero Hernández, R., Álvarez-Fernández, E. (eds.), *Descendiendo el río Sella. Una (re)visión de la Arqueología Prehistórica del valle del Sella (Asturias, España)*, ENTEMU, XIX. Gijón, 133-162.
- Álvarez-Fernández, E., Tapia, J., Arias, P., Camarós, E., Cerezo-Fernández, R., García-Alonso, B., García-Martín, N., Martín-Jarque, S., Peyroteo-Stjerna, R., Portero, R., Teira, L.C., Cueto, M. (2022). *La cueva de Tito Bustillo (Ardines, Ribadesella, Asturias): intervenciones arqueológicas en el «Área de Estancia».* In: Jordá Pardo, J.F., Martín-Jarque, S., Portero, R., Álvarez-Fernández, E. (eds.), *Descendiendo el río Sella. Una (re)visión de la Arqueología Prehistórica del valle del Sella (Asturias, España)*. ENTEMU, XIX. Gijón, 247-265.
- Balbín R. de, Alcolea J., Alcázar, M., Bueno, P. (2022). *Tito Bustillo. Ribadesella. Asturias.* Gobierno del Principado de Asturias, Gijón.
- Boyer-Klein, A., Leroi-Gourhan, A. (1987). *Análisis polínico de la Cueva de "El Juyo".* In: Barandiarán Maestu, I., Freeman, L.G., González Echegaray, J., Klein, R.G. (eds.), *Excavaciones en el Yacimiento Magdaleniense de "El Juyo, Centro de Investigación y Museo de Altamira 14, Ministerio de Cultura, Madrid*, 55-61.
- Carriol, R.P., Álvarez-Fernández, E. (2015). Balanomorphs from late Upper Pleistocene and Holocene caves in northern Spain, with a new genus and species, and their palaeoclimatological implications. *Annales de Paléontologie*, 101 (1), 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.annpal.2014.09.001>.

- Díaz García, F., Mallo Viesca, M. (2018). *Los primeros años de la cueva de Tito Bustillo 1968-(1984)*. In: Álvarez Fernández, E., Jordá Pardo, J.F. (eds.), *El poblamiento prehistórico en el valle del Sella. Cincuenta años del descubrimiento de la cueva de Tito Bustillo y sesenta de las primeras intervenciones del profesor Francisco Jordá en las cuevas de El Cierro y Cova Rosa (Ribadesella, Asturias)*. Asociación Amigos de Ribadesella, Ribadesella (Asturias), 37-62.
- Fortea Pérez, F.J. (ed.) (1993). *La protección y conservación del arte rupestre paleolítico*. Mesa redonda hispano-francesa, Colombres (Asturias) [2 al 6 de junio de 1991]. Consejería de Educación, Cultura, Deportes y Juventud, Oviedo.
- Fortea Pérez, F.J., Hoyos Gómez, M. (1999). La Table ronde de Colombres et les études de protection et conservation en Asturies réalisées de 1992 à 1996. *Préhistoire, Art et Sociétés: Bulletin de la Société Préhistorique de L'Ariège*, 54, 235-241.
- Fuentes, C., Meijide, M. (1975). Sobre la fauna fósil encontrada en la cata de la Cueva de Tito Bustillo (Asturias). En García Guinea, M.A., *Primeros Sondeos Estratigráficos en la Cueva de Tito Bustillo (Ribadesella, Asturias) (Excavaciones de 1970)*. *Publicaciones del Patronato de las Cuevas Prehistóricas de la Provincia de Santander*, XII, Santander, 59-70.
- García Guinea, M. A. (1975). Primeros Sondeos Estratigráficos en la Cueva de Tito Bustillo (Ribadesella, Asturias) (Excavaciones de 1970). *Publicaciones del Patronato de las Cuevas Prehistóricas de la Provincia de Santander*, XII, Santander.
- Gobierno del Principado de Asturias (2020a). COVID-19. *Documento técnico para cuevas, yacimientos arqueológicos y monumentos*. Disponible en [https://coronavirus.asturias.es/documents/70545/0/2020\\_05\\_28\\_Doc\\_Tecnico\\_Yacimientos.pdf](https://coronavirus.asturias.es/documents/70545/0/2020_05_28_Doc_Tecnico_Yacimientos.pdf) [Consultado en 13/05/22].
- Gobierno del Principado de Asturias (2020b). *Programa de turismo sostenible del Principado de Asturias. Acuerdo para la competitividad económica y la sostenibilidad social de Asturias. Resumen ejecutivo*. Disponible en <https://www.turismoasturias.es/documents/402739/dc9877b1-2435-4648-ab86-1a454dac19f7> [Consultado el 13/05/2022].
- Gómez Fuentes, A. (1978). Sobre los conceptos de Suelo y Piso de Ocupación en Prehistoria. *Zephyrus*, XXVIII-XXIX, 93-108.
- González Sainz, C. (1989). *El Magdaleniense superior-final de la región cantábrica*. Ed. Tantín y Universidad de Cantabria, Santander.
- González-Pumariega Solís, M. (2008). *Guía del arte rupestre paleolítico de Asturias*. Ménsula Ediciones, Pola de Siero (Asturias).
- Heras Martín, C. de las, Fatás Monforte, P., Lasheras Corrucho, J.A. (2017). La cueva de Altamira y sus museos. *Boletín del Museo Arqueológico Nacional*, 35, 825-840.
- Hoyos Gómez, M., Soler Javaloyes, V., Cañaveras Jiménez, J.C., Sánchez Moral, S., Sanz Rubio, E. (1996). *Memoria final sobre las características geológico-cársticas y microambientales de la cueva de Tito Bustillo (Ribadesella)*. Informe inédito. Consejería de Cultura del Principado de Asturias y CSIC.
- Jiménez Sánchez, M., González Lemos, S., Meléndez Asensio, M. (2018). *Estudios previos de evaluación del estado de conservación geológico ambiental de cuevas Patrimonio Mundial en el Principado de Asturias*. Universidad de Oviedo y Consejería de Cultura del Principado de Asturias. Informe inédito.
- Jordá, F., Mallo, M., Pérez, M. (1970). Les grottes du Pozo del Ramu et de La Lloseta (Asturies, Espagne) et ses représentations rupestres paléolithiques. *Préhistoire Ariégeoise*, XXV, 95-140.
- Mallo Viesca, M., Pérez Pérez, M. (1969). Primeras notas al estudio de la Cueva del Ramu y su comunicación con La Lloseta. *Zephyrus*, XIX-XX, 7-26.
- Lefebvre, A., Marín, A. B., Álvarez-Fernández, E., Rasilla, M. De La; Duarte, E., Cueto, M., Tapia, J., Berganza, E., Pétilon, J.M. (2021). Interconnected Magdalenian societies as revealed by the circulation of whale bone artefacts in the Pyreneo-Cantabrian region. *Quaternary Science Reviews*, 251, 106692. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106692>.
- Martín Gil, M., Villar Fernández, C. (coords.) (2020). *Pautas para la gestión, conservación y disfrute público del Patrimonio Cultural en la desescalada de la crisis sanitaria (COVID-19)*. Madrid: Ministerio de Cultura y Deporte. Instituto de Patrimonio Cultural de España. Disponible en <https://ipce.culturaydeporte.gob.es/noticias/2020/2020-06-01-patrimonio-y-desescalada.html> [consultado el 13/05/2022].
- Martín-Jarque, S., Herrero, D., Tarrío, A., López-Tascón, C., Prieto, A., Bécades, J., Álvarez-Fernández, E. (en prensa). Determination of Lithic Raw Materials in Cantabrian Spain during Greenland Stadial 2: Tito Bustillo Cave (Ribadesella, Asturias), *Journal of Archaeological Science-Reports*, 45.



- Morales, A. (1984). Primer informe sobre la ictiofauna magdaleniense de Tito Bustillo (Provincia de Asturias). *Boletín del Instituto de Estudios Asturianos*, 113, 904-929.
- Moreno Nuño, R., Morales Muñoz, A. (1987). Análisis de la malacofauna recuperada en la cueva de Tito Bustillo (Ribadesella, Asturias). *Boletín del Instituto de Estudios Asturianos*, 123, 662-688.
- Moure, J. A. (1975). *Excavaciones en la Cueva de "Tito Bustillo" (Ribadesella, Asturias): Campañas de 1972 y 1974*. Instituto de Estudios Asturianos, Oviedo.
- Moure, J. A. (1990). *La Cueva de Tito Bustillo (Ribadesella, Asturias): el Yacimiento Paleolítico*. Excavaciones arqueológicas en Asturias 1983-1986, 1. Principado de Asturias, Oviedo, 107-127.
- Moure, J. A. (1997). Dataciones AMS de la Cueva de Tito Bustillo (Asturias). *Trabajos de Prehistoria*, 54 (2), 135-142.
- Moure, J. A., Cano M. (1976). *Excavaciones en la Cueva de "Tito Bustillo" (Ribadesella, Asturias): Trabajos de 1975*. Instituto de Estudios Asturianos, Oviedo.
- Navarro, D., Leyva, F., Villa, E., Granado, L. (1986). *Mapa Geológico de España E. 1:50.000 Hoja 31 (15-4) Ribadesella*. Instituto Geológico y Minero de España, Centro de Publicaciones, Ministerio de Industria y Energía, Madrid.
- Sánchez Moral, S., Cañaveras Jiménez, J.C., Soler Javaloyes, V. (2002). *Estado de conservación de las cuevas de Candamo, El Buxu, El Pindal, Tito Bustillo y La Loja. Estudio previo puntual*. Informe inédito. Consejería de Cultura del Principado de Asturias y CSIC.
- Vallejo Pousada R. (2015). ¿Bendición del cielo o plaga? El turismo en la España franquista 1939-1975. *Cuadernos de Historia Contemporánea*, 37, 89-113.



# La luminiscencia en minas y cuevas españolas como atractivo geoturístico

Francisco Javier FERNÁNDEZ AMO <sup>(1)</sup>, José María CALAFORRA CHORDI <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Técnicas Mineras de Santa Marta S.L., francis@tecmineras.com

<sup>(2)</sup> G.I. Recursos Hídricos y Geología Ambiental, Universidad de Almería, jmcalaforra@ual.es

---

## Resumen

Solo un 15 % de los minerales existentes en el planeta son luminiscentes; cuando se iluminan con luz ultravioleta emiten energía en forma de color y brillo que resulta sorprendente para el observador. Esta propiedad lumínica de algunos minerales resulta muy atractiva y puede suponer un complemento didáctico y geoturístico en algunas de las minas y cuevas turísticas de nuestro país. Las Minas de Santa Marta (Santa Marta, Badajoz) o la Mina Rica (Pulpí, Almería), son dos ejemplos donde se pueden localizar minerales fluorescentes y donde actualmente se puede contemplar esta singular propiedad, generando asombro e interés por parte de las visitas turísticas. Ambos espacios cuentan además con exposiciones de minerales luminiscentes (Salas Negras) que han aumentado y mejorado cualitativa y cuantitativamente la oferta geoturística. Las calcitas y aragonitos de numerosas cuevas turísticas son fosforescentes bajo la luz ultravioleta, un tipo de luz que cambia la percepción de los espeleotemas, minerales y rocas de minas y cuevas, y que puede ser un complemento llamativo, en las visitas a cuevas y minas turísticas, a desarrollar en el futuro.

**Palabras clave:** luminiscencia, Minas de Santa Marta, Mina Rica, geoturismo.

## ***Luminescence in Spanish mines and caves as a geotouristic attraction***

### ***Abstract***

*Only 15% of the existing minerals on our planet are luminescent; when they shine as a consequence of UV, they beam with a type of energy in a way of color and glow that becomes a striking view for observers. This lighting property of some minerals is exceptionally interesting and can be a didactic and geotouristic complement for some of the mines and caves of our country. Minas de Santa Marta (Santa Marta, Badajoz) or La Mina Rica (Pulpí, Almería) are two examples in which these fluorescent minerals can be found, and visitors can currently observe this singular property with great amazement and interest. Both spaces also contain exhibitions of luminescent minerals (Salas Negras), a fact that has increased the quality and quantity of geotourism offered. The calcites and aragonites from a wide range of touristic mines are fluorescent under the projection of UV. This is a kind of light which changes the perception of speleothems, minerals and rocks from mines and caves and that can be used as a captivating complement to consider in the visits to caves and touristic mines in the next future.*

**Keywords:** *luminescence, Minas de Santa Marta, Mina Rica, geotourism.*

## **Introducción y antecedentes**

Cuando se irradian algunos minerales con luz ultravioleta (UV), los electrones susceptibles se excitan temporalmente, saltando a un orbital superior. Cuando se dejan de irradiar los electrones vuelven a su orbital. En este proceso se libera una pequeña cantidad de energía en forma de luz y color.

Esta propiedad, poco común, tan sólo la poseen un 15 % de las especies minerales conocidas y es muy espectacular desde el punto de vista visual y apreciada por los coleccionistas de minerales (Robbins, 1983 y 1994; Schneider, 2011a,b). Desde hace unos años se está utilizando en algunos espacios geoturísticos como un recurso que sorprende a los visitantes, por su estética, singularidad y espectacularidad.

Algunos museos de geología suelen tener alguna vitrina o pequeño espacio en el que se muestran minerales fluorescentes; pero en España fue en las Minas de Santa Marta, y su museo MUGEMISA, donde se habilitó el primer espacio expositivo únicamente de estos minerales, en el año 2011, denominado "Sala Negra".

El éxito de la sala motivó años después su ampliación (2016) y el interés de los visitantes procedentes de otros espacios de albergar colecciones similares; desde ese momento hasta la actualidad, son ya varios los espacios que albergan Salas Negras y la luminiscencia empieza a ser un recurso empleado no ya sólo en museos, sino en el interior de minas y cuevas musealizadas como a continuación se expone.

## **Espacios con luminiscencia como recurso geoturístico**

*Minas de Santa Marta, (Santa Marta, Badajoz)*

Las Minas de Santa Marta (Fernández Amo *et al.*, 2010a) han sido designadas en el presente año 2022, como uno de los 14 destinos de interés geoturístico de España por el Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España, y la fluorescencia tiene mucho que ver en ello.

Se trata de un conjunto de antiguas minas de Pb-Zn-Ag-V, que albergan singularidades mineralógicas como la calderonita (González del Tanago *et al.*, 2003), junto con singulares ambientes geológicos y geomineros que han sido declarados como Lugar de Interés Científico de Extremadura. Desde hace más de 15 años se llevan acometiendo labores de conservación, recuperación y valorización del patrimonio geológico y minero de las Minas de Santa Marta, y uno de los primeros proyectos fue la creación del Museo Geológico y Minero de Santa Marta "José María Fernández Amo", se trata de uno de los museos geomineros más importantes del sur de España, con una colección de más de 6.000 piezas (expuestas y en fondos). Dentro de este museo se encuentra la Sala Negra de Santa Marta

(figura 1), que alberga unas 800 piezas de minerales fluorescentes a luz UV de onda corta (UVC) y onda larga (UVL), así como minerales fosforescentes y triboluminiscentes.

Así mismo, las Minas de Santa Marta albergan minerales con singular fluorescencia. Tanto en el interior de las minas, como en las escombreras, se pueden encontrar numerosos minerales fluorescentes, a UVC y UVL. Se conocía la fluorescencia de las calcitas a UVL, pero se desconocía la fluorescencia ciertos minerales a UVC. En el año 2017 se hizo un estudio con lámparas UVC, fabricadas *exprofeso* para las Minas de Santa Marta; se recorrieron tanto el interior como el exterior de algunas de las minas y el resultado fue impactante. Calcitas, aragonitos, hidrocincitas, adamitas, fluoritas, cerusitas, anglesitas, smithsonitas, con coloridos y brillos que sorprenden al visitante.



Figura 1. Una de las vitrinas de la Sala Negra del Museo geominero de Santa Marta (Santa Marta, Badajoz) (foto: Francisco J. Fernández Amo).



Figura 2. Calcita (naranja) con luz UVC y calcita bandeada con UVL, sobre muro de Castillete Minero de las Minas de Santa Marta. (foto M. Tremiño y M. Aldeguer ).

Para observar esta curiosa propiedad mineral, se han organizado las denominadas Rutas Negras, están pasan por ser una de las rutas más singulares y atractivas de Extremadura. Los visitantes la hacen actualmente ayudados de lámparas de luz ultravioleta de onda

corta y de onda larga, iluminando en la oscuridad de la noche los minerales de las escombreras y de las paredes de las construcciones de la zona (figura 2); sorprendiendo a los visitantes por el bello colorido y brillo de los minerales fluorescentes de Santa Marta.

### *Mina Rica (Pulpí, Almería)*

El Exmo. Ayto. de Pulpí, a través de la Empresa Municipal del Suelo de Pulpí, ha realizado en los últimos años un esfuerzo significativo para la apertura al público de la Geoda de Pulpí y de la Mina Rica (Fernández Amo y Solanilla, 2018 y 2022), generando un impacto social, mediático y turístico sin precedentes en Almería. Como resultado de esa valorización se crearon varias iniciativas con unas componentes científico-turísticas que podrían aumentar el interés de este espacio aún más y a su vez poder diversificar geográficamente el increíble valor geológico y minero que alberga la Mina Rica.



*Figura 3. Museo de minerales luminiscentes de Pulpí (Pulpí, Almería) (foto: Francisco J. Fernández Amo).*

Una de estas iniciativas surgió tras la visita del equipo de gobierno de Pulpí al Museo Geominero de Santa Marta. Este hecho, unido al descubrimiento por parte de los geólogos firmantes de la presente comunicación, de la luminiscencia de diversos minerales en la Mina Rica, motivó la creación del Museo y laboratorio de la luminiscencia en Pulpí (Sala Negra de Pulpí).

Dentro de la Mina Rica se encuentran minerales fluorescentes como calcita, epsomita, estronciocalcita, aragonito y algunos de los yesos con inclusiones. En el recorrido turístico por la mina se eligió la Sala del Cuartel para que los turistas se sorprendan con esta curiosa propiedad.

La Sala Negra de Pulpí (figura 3) es la mayor exposición de minerales luminiscentes de España y una de las más importantes de Europa. Cuenta con unas 1.000 muestras

expuestas en varias vitrinas, con minerales de todo el mundo fluorescentes a UVC y UVL, así como una vitrina de minerales fosforescentes.

La Sala Negra de Pulpí, es un proyecto cofinanciado por el Exmo. Ayto. de Pulpí y la Universidad de Almería, y surgió con el objetivo específico de la ampliación y mejora de los espacios geoturísticos visitables de Pulpí. Con ello se ha conseguido que, además de atraer a los turistas de la Geoda al propio Pulpí, se han incrementado las visitas en general y se ha mejorado la oferta geoturística, ofreciendo un nuevo espacio singular y atractivo.

### *Minas de Logrosán (Logrosán, Cáceres)*

Las Minas de Logrosán se explotaron intermitentemente a lo largo de varias décadas, desde finales del siglo XIX hasta prácticamente mediados del siglo XX, llegando a convertirse en el mayor yacimiento de fosfato de Europa a principios de los años 20. Actualmente se pueden visitar parte de la Mina Costanaza (Fernández Amo *et al.*, 2010b). En la visita se puede observar numerosos elementos de interés geológico y minero, tanto en el interior como en el exterior de la mina. El mismo filón de fosfatos de Costanaza fue explotado a principios de siglo en trincheras y pequeñas galerías en la zona conocida como El Polvorín.

Al final de la galería del Polvorín hay una pequeña sala que se usó durante la década de los años 40 como polvorín de la Mina Costanaza, y que actualmente se ha acondicionado para albergar una pequeña Sala Negra (figura 4), en la que hay expuestos unas 300 muestras de minerales fluorescentes de onda larga. En este año 2022 se amplía a unas 450 muestras, instalando una vitrina de minerales fluorescentes de onda corta.

Desde la apertura de esta sala, en el año 2016 hasta la actualidad, se ha convertido en uno de los principales recursos de las Minas de Logrosán, siendo uno de los elementos más valorados por el conjunto por los visitantes.



Figura 4. Sala Negra Minas de Logrosán (Logrosán, Cáceres) (foto: Francisco J. Fernández Amo).

### *Cuevas de Fuentes de León (Fuentes de León, Badajoz)*

Las Cuevas de Fuentes de León se sitúan en el municipio de Fuentes de León (provincia de Badajoz). Constituye uno de los conjuntos kársticos más interesantes de Extremadura, razón por la cual fue declarado Monumento Natural de Extremadura en 2001. Actualmente hay cuatro cuevas (Agua, Masero, Los Postes y Caballo) y otros espacios (centro de interpretación, centro de recepción de visitantes, museo geológico, museo de rocas, ruta botánica, surgencias kársticas, lapiaces y simas, etc.)

La cueva que tiene más interés de todo el conjunto es la Cueva Masero; realizando estudios geológicos en la cueva se descubrió que algunas de las formaciones eran fosforescentes, por lo que en una de las salas se decidió instalar focos de luz UVL (figura 5), para que los visitantes pudiesen contemplar estas formaciones bajo otro espectro de luz.

No se trata de una iluminación con luces de colores dentro de una cueva, se trata de una iluminación con un espectro de luz diferente, a través de la cual se puede ver la



*Figura 5. Sala de las Encinas (Cuevas de Fuentes de León), iluminada con luz UVL (foto: Francisco J. Fernández Amo).*

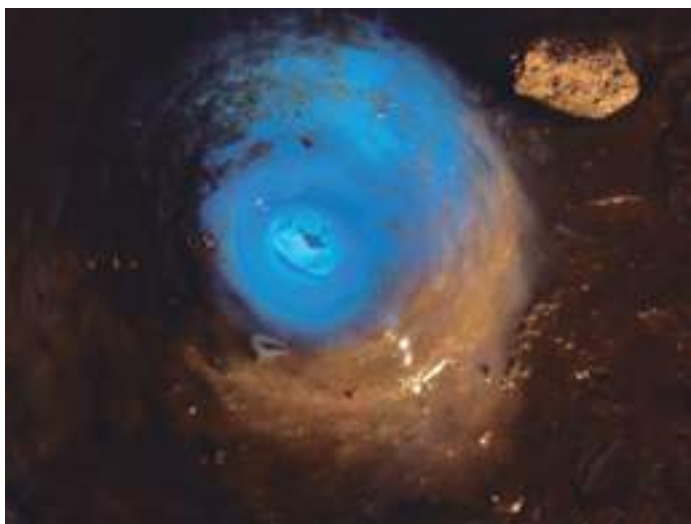
fosforescencia de algunas formaciones, lo cual causa asombro a los visitantes, siendo uno de los recursos geoturísticos que más sorprende y gusta a las visitas. Esta sala se iluminó con luz UVL en el año 2012.

### *Otros espacios y proyectos futuros*

Existen otros espacios que también usan la luminiscencia como recurso, como es el caso del Museo geominero de Burguillos del Cerro (Badajoz), que dispone de una vitrina de minerales luminiscentes, o bien algunas cuevas como Mendukilo o Los Cristinos (Navarra) (figura 6), en la que con linternas se muestra la fosforescencia de algunas formaciones, como un recurso que resulta atractivo y diferente.



Actualmente se están planteando dos nuevos proyectos en España. El primero de ellos es la creación de un nuevo museo de minerales luminiscentes en Aracena (Huelva), se tratará de una sala con una exposición de más de 1.000 minerales luminiscentes, que se va a instalar en un antiguo aljibe de aguas ubicado junto al Castillo de Aracena. Esta sala se instalará junto la colección de minerales, rocas y fósiles de la Gruta de las Maravillas de Aracena. Este nuevo espacio en el que los minerales fluorescentes tendrán un especial protagonismo pretende atraer más visitantes al Castillo y aumentar el tiempo de estancia de los turistas en Aracena, ofreciendo un nuevo y atractivo recurso geoturístico vinculado a Aracena.



*Figura 6. Estalagmita fosforescente (Cueva de Los Cristinos), iluminada con luz UVL.  
(foto: Francisco J. Fernández Amo).*

Otro proyecto a desarrollar en el año 2023 se abordará en las Minas de Santa Marta. El nuevo proyecto tendrá dos ámbitos de actuación: en primer lugar se hará el traslado y ampliación de la Sala Negra de las Minas de Santa Marta y se aumentará la colección hasta las 1.500 piezas. El objetivo es desvincularlo del MUGEMISA, y crear un museo independiente de minerales luminiscentes, en el que no sólo se podrá observar esta propiedad mineral, sino que también se experimentará con propiedades ópticas del mundo mineral: tenebrescencia, pleocroísmo, labradorescencia, asterismo, birrefringencia, etc.

El segundo ámbito de actuación será en las propias Minas de Santa Marta, con dos actuaciones en las que la luminiscencia será la protagonista.

La primera de ellas se llevará a cabo en el horno de tostación de las Minas de Santa Marta. Se trata de una de las infraestructuras más singulares del patrimonio arqueológico industrial-minero de Extremadura. Es un horno de medio cañón que tiene una longitud de 16 metros y una anchura de dos metros, con bóveda de arco de medio punto, y está

construido con mampostería de ladrillo macizo, piedras de la mina y argamasa minera. Data de 1890 y es una joya que estaba en estado de deterioro y que se ha recuperado y acondicionado. Dentro del horno se hará otra actividad sorprendente para los visitantes, ya que podrán observar la fluorescencia de los minerales de Santa Marta a plena luz del día. Para ello se cerrarán las puertas y compuertas del horno, quedando a oscuras dentro del mismo y con lámparas ultravioletas se iluminará todo el suelo y paredes (figura 7), recubiertas de minerales de calcita e hidrocincita, que a la luz ultravioleta toma colores de brasas incandescentes; todo ello se hará acompañado de sonidos de crepitación que



*Figura 7. Interior del Horno de Tostación de las Minas de Santa Marta (foto: M. Tremiño y M. Aldeguer).*

sorprenderá al visitante, aportando una experiencia sensorial diferente.

Otra de las actuaciones es la creación de un museo de minerales luminiscentes al aire libre. A lo largo del conjunto de escombreras se dispondrán senderos que las recorrerán hasta llegar a determinados enclaves donde se podrán observar, no ya sólo los minerales de Santa Marta, sino de todo el mundo.

Una de las minas de Santa Marta (Mina Tehh) se acondicionará para su visita en el año 2023. Esta mina tiene numerosos filones con minerales luminiscentes, el objetivo es iluminarlos con luz UVL y UVC para que los visitantes puedan contemplarlos *in situ*.

## Conclusiones

Los minerales y las rocas fluorescentes pueden estar presentes en las cuevas turísticas y las minas musealizadas y es algo que la mayoría de los gestores de estos espacios desconocen. Estos minerales y rocas pueden ser un recurso geoturístico a destacar en las visitas de estos espacios. Ayudados de lámparas de luz ultravioleta de onda corta y de onda larga, iluminando en la oscuridad el interior y exterior de las minas y cuevas; se puede sorprender a los visitantes con el bello colorido y brillo de los minerales y formaciones fluorescentes.

Los museos o salas con minerales luminiscentes son un complemento perfecto para las visitas a las minas y cuevas turísticas. Prueba de ello son los ejemplos de Santa Marta, Pulpí o Logrosán, donde estos museos o salas han generado un aumento y mejora de la oferta turística, y pasan por ser espacios muy valorados, generando un impacto muy positivo en el visitante por la singularidad y estética de la exposición.

Se trata de un complemento con marcado carácter científico, pero que a la vez resulta espectacular y no deja a nadie indiferente, causando emoción en los más pequeños y admiración en los mayores; a ello hay que unir que la inversión en este tipo de espacios es muy pequeña en comparación con los beneficios que se deriva de este tipo de iniciativas.

## Agradecimientos

Exmo. Ayto. de Pulpí por la creación de la Sala Negra de Pulpí y por su continua labor en el conservación y valorización del patrimonio geológico de Pulpí. A la Universidad de Almería por su continua colaboración en la investigación y puesta en valor de los minerales fluorescentes como recurso geoturístico. Al Exmo Ayto. de Santa Marta por creer y apostar por nuestras minas, museo y Sala Negra y por la creación de un espacio singular por la increíble belleza oculta de los minerales que alberga. A Minas de Logrosán, Cuevas de Fuentes de León, Exmo Ayto. de Aracena y otros espacios por apoyar e incentivar medidas de promoción en el que esta propiedad mineral puede suponer y supone un importante recurso geoturístico. A los guías de la Geoda de Pulpí, Minas de Santa Marta, Cueva de Mendukilo o de las Minas de Logrosán, siempre dispuestos a explicar y aprender sobre este bello fenómeno natural. Agradecimiento así mismo a Manuel Tremiño y Marisa Aldegue por las fotos realizadas.

## Referencias

Fernández Amo, F.J., Alcalde Molero, C., Subirón Garay, C. (2010a). Minas de Santa Marta de los barros (Badajoz). Singularidad Geológica y Patrimonio Minero. Una visión multidisciplinar del patrimonio geológico y minero. *Cuadernos del Museo Geominero*, 12, 257-267. ISBN: 8478408368, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

- Fernández Amo, F.J., Rebollada Casado, E., Carvajal Gómez, D.J. (2010b). Mina Costanaza: Patrimonio Minero y Lugar de interés Geoturístico. Una visión multidisciplinar del patrimonio geológico y minero. *Cuadernos del Museo Geominero*, 12, 269-276. ISBN: 8478408368, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Fernández Amo, F.J., Solanilla Rodrigo, J.A. (2018). Memoria para la Declaración como Monumento Natural de Andalucía de la Geoda de Pulpí y Mina Rica de Pilar de Jaravía (Pulpí, Almería). *Inéd.*
- Fernández Amo, F.J., Solanilla Rodrigo, J.A. (2022). Proyecto de Obras de accesos y acondicionamiento de la Mina Rica de Pulpí y Geoda de Pulpí para visitas turísticas. *Inéd.*
- González del Tanago, J., Fernández Santín, S., Laiglesia, A., Rius, J. (2003). Calderonite, a new lead-iron-vanadate of the brackebuschite group. *American Mineralogist*, 88 (11-12), 1703–1708. <https://doi.org/10.2138/am-2003-11-1210>.
- Robbins, M.A. (1983). *The Collector's Book of Fluorescent Minerals*. Springer New York, ISBN: 9781475747942, 289 pp. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4792-8>.
- Robbins, M.A. (1994). *Fluorescence: Gems and Minerals Under Ultraviolet Light (Rocks, Minerals and Gemstones)*. Geoscience Press, ISBN: 094500513X, 383 pp.
- Schneider, S. (2011a). *The World of Fluorescent Minerals (Schiffer Book for Collectors)*. Ed. Schiffer Publishing Ltd., 192 pp.
- Schneider, S. (2011b). *Collecting Minerals fluorescent*. Ed. Schiffer Publishing Ltd., ISBN: 0764336193, 208 pp.

## **Control microclimático de la dispersión bacteriana en cavidades con arte rupestre: aplicación de estrategias de conservación para la Cueva de La Garma (Cantabria)**

Ángel FERNÁNDEZ CORTÉS <sup>(1)</sup>, Valme JURADO LOBO <sup>(2)</sup>,  
José Luis GONZÁLEZ PIMENTEL <sup>(3)</sup>, Soledad CUEZVA ROBLEÑO <sup>(4)</sup>,  
Tamara MARTÍN POZAS <sup>(6)</sup>, Roberto ONTAÑÓN PEREDO <sup>(5)</sup>, Pablo ARIAS CABAL <sup>(5,7)</sup>,  
Bernardo HERMOSÍN CAMPOS <sup>(2)</sup>, Cesáreo SAIZ JIMÉNEZ <sup>(2)</sup>, Sergio SÁNCHEZ MORAL <sup>(6)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Biología y Geología, Universidad de Almería. acortes@ual.es

<sup>(2)</sup> Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, IRNAS-CSIC.  
vjurado@irnase.csic.es, saiz@irnase.csic.es

<sup>(3)</sup> Laboratório HERCULES, Universidade de Évora. Portugal. pimentel@uevora.pt

<sup>(4)</sup> Departamento de Geología, Geografía y CC. Ambientales, Universidad de Alcalá de Henares. soledad.cuezva@uah.es

<sup>(5)</sup> Museo de Prehistoria y Arqueología de Cantabria. Santander. ontanon\_r@cantabria.es

<sup>(6)</sup> Museo Nacional de Ciencias Naturales, MNCN-CSIC. Madrid. tmpezas@mncn.csic.es, ssmilk@mncn.csic.es

<sup>(7)</sup> Departamento de Ciencias Históricas, Universidad de Cantabria. Santander. pablo.arias@unican.es

---

### **Resumen**

El patrimonio natural y cultural de las cuevas se ve a menudo amenazado por el turismo y por otras actividades de carácter científico que las expone a riesgos que pueden provocar la alteración irreversible de sus condiciones ambientales de carácter irreversible. Las cuevas con arte rupestre y yacimientos arqueológicos suponen un caso especial y complejo. Cualquier modificación en sus condiciones climáticas conlleva un cambio en el ecosistema subterráneo que, a menudo, favorece el desarrollo y proliferación de poblaciones microbianas que llegan a colonizar los diferentes sustratos presentes en la cueva. La cueva de La Garma constituye un ejemplo destacado de cavidad con una larga frecuentación humana desde el Paleolítico antiguo hasta la Edad Media. Desde su descubrimiento en noviembre de 1995, la cueva sólo es accesible para la investigación arqueológica y la monitorización de sus condiciones ambientales. En este trabajo se presentan los resultados del estudio detallado de sus condiciones microclimáticas, y su influencia en la dispersión de microorganismos en el aire subterráneo y en el desarrollo de biofilms sobre la superficie de las rocas y los sedimentos. La dispersión bacteriana en el aire de la cueva está directamente influenciada por la circulación del aire, con fuertes incrementos durante los pulsos de ventilación vinculados a los vientos de componente sur en el exterior. Las conclusiones del estudio desaconsejan la adecuación de la cueva para su uso turístico y el control exhaustivo de cualquier trabajo arqueológico que implique perforaciones, zanjas o movimientos de tierras- sedimentos, ya que se favorecería la proliferación inmediata de colonias microbianas y con ello el desarrollo de procesos irreversibles de biodeterioro.

**Palabras clave:** Conservación de cavidades, monitorización microclimática, aerobiología, arte rupestre.

## **Microclimatic control of bacterial dispersion in caves with rock art: application of conservation strategies for the "Cueva de la Garma" (Cantabria)**

### **Abstract**

The natural and cultural heritage of caves are often threatened by tourism or, even, by other activities seeking to explore their scientific values, which exposes them to different degradation risks that which sometimes provokes irreversible changes. Caves with rock art and archaeological sites are a special and complex case. Any change in climatic conditions leads to a change in the subterranean ecosystem, which often favours the development and proliferation of microbial populations that colonize the different substrates present in the cave. La Garma is an outstanding example of a cavity with a long history of human occupation from the ancient Paleolithic to the Middle Ages. Since its discovery in November 1995, the cave is accessible only for archeological research and control of microclimatic parameters. We conducted a comprehensive study of the cave climate controlling the dispersion of airborne microorganisms and its influence on the biofilms colonizing cave rocks and sediments. The bacterial dispersion in the cave air is directly influenced by air circulation with sharp rises during the ventilation pulses linked to southern winds at the exterior. The derived conclusions for this study discourage the adaptation of the cave for tourist use and exhaustive control of any archaeological work involving drilling, trenching, or earthmoving since this would favor the immediate proliferation of microbial colonies and thus the development of irreversible biodeterioration processes.

**Keywords:** *Cave conservation, microclimate monitoring, aerobiology, rock-art.*

### **Introducción**

Las cuevas constituyen entornos confinados estables y frágiles y, por lo tanto, son muy susceptibles a las perturbaciones derivadas de las actividades humanas o bien a cambios en las condiciones ambientales en el ambiente externo circundante. La perturbación del entorno subterráneo puede provocar reacciones en cadena incontroladas que son el origen de los procesos de corrosión de la superficie de la roca de paredes y techos que, en algunas cavidades, son el soporte de pinturas y grabados prehistóricos. La dispersión de microorganismos, la sustitución de las comunidades microbianas naturales por poblaciones microbianas alóctonas introducidas por el hombre, o el conjunto de microorganismos patógenos que prosperan en el interior de las cuevas (Fernández-Cortés *et al.*, 2011) es menos conocido.

Las cuevas suelen albergar elementos geológicos y culturales muy conocidos y de gran valor que, en algunos casos, lo hacen merecedoras de formar parte de la Lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO o bajo otras figuras legales de protección. España y

Francia contienen la mayor parte del arte paleolítico europeo y sus cuevas son objeto de una protección especial, muchas de las cuevas del norte de España están abiertas a los visitantes y otras están siendo consideradas como futuras cuevas turísticas. Por ello, la Cueva de Altamira y el arte rupestre paleolítico del norte de España fueron declarados Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. En este contexto, la Cueva de la Garma, en Omoño, Cantabria, fue incluida en esta lista de sitios en 2008.

El reconocimiento de los valores geológicos y culturales puede despertar el interés turístico y, por tanto, convertirse en un potencial recurso económico para diferentes organismos regionales y locales o entidades privadas. Este hecho a su vez exige la puesta en marcha de iniciativas de conservación preventiva, orientadas a mantener y preservar este patrimonio subterráneo. Una parte fundamental e inicial de los planes de gestión de estas cuevas es el análisis de los principales factores de riesgo y las medidas adecuadas para prevenirlos o mitigarlos. Este análisis debe realizarse antes de definir cualquier programa de gestión de accesos, bajo criterios de sostenibilidad establecidos en función de la capacidad de carga de visitas a la cueva. Por lo tanto, es imprescindible el control de los parámetros que influyen en los procesos de degradación de los elementos del patrimonio cultural (pinturas y grabados prehistóricos) y natural (p.e. espeleotemas) en entornos confinados como las cuevas. Este control ambiental incluye el seguimiento de los microorganismos transportados por el aire, junto con el control de los parámetros ambientales físicos (temperatura, humedad relativa, dióxido de carbono), permite evaluar los impactos, naturales y antrópicos, así como servir de base para formular decisiones de gestión sólidas para proteger el ecosistema subterráneo. Uno de los puntos clave en este control ambiental es el seguimiento de la entrada y la dispersión de microorganismos y nutrientes en el interior de la cueva, que depende de las tasas de intercambio de aire entre la atmósfera interior y el exterior.

En el presente trabajo se estudian las condiciones climáticas de la cueva y las comunidades bacterianas presentes en el aire de la Cueva de la Garma, incluyendo la cuantificación de las unidades formadoras de colonias y diversidad bacteriana en cinco sectores representativos de las diferentes galerías de la cueva y en el exterior. El objetivo de este estudio es determinar la dinámica de las bacterias presentes en el aire a lo largo de las diferentes estaciones del año y evaluar la influencia de los procesos aerodinámicos exterior-interior en la dispersión de las bacterias.

## **Zona de estudio y antecedentes**

La Cueva de la Garma se localiza en una colina cercana al pueblo de Omoño y forma parte de un complejo sistema cárstico de galerías situadas a diferentes alturas y conectadas por simas verticales. La cueva tiene un extenso asentamiento paleolítico con pinturas desde el Paleolítico antiguo hasta el Magdaleniense y su suelo está ampliamente ocupado por evidencias de actividad humana (esqueletos humanos, huesos de animales, fragmentos de carbón, etc.) hasta la Edad Media. Las pinturas muestran bisontes, ciervos, caballos, trazos no figurativos y huellas de manos (Arias y Ontañón, 2012). La cueva es accesible

únicamente para realizar excavaciones arqueológicas y para las tareas de control y mantenimiento de los equipos de monitorización de parámetros microclimáticos.

En un estudio previo realizado en 1998, poco después de su descubrimiento en noviembre de 1995, cuando sólo 64 personas visitaron la cueva con un tiempo total de estancia de 45 h y 30 min, se observaron relativamente pocos biofilms microbianos (Schabereiter-Gurtner et al., 2004). Estos autores indicaron que las variaciones en las condiciones climáticas, el aporte de materia orgánica al ecosistema y el crecimiento de colonizadores secundarios traídos por los visitantes, incluso en pequeños grupos, podrían modificar las comunidades naturales del ecosistema subterráneo.

Estas predicciones se han confirmado en el presente estudio, realizado tras 24 años. De hecho, ahora la cueva muestra una extensa colonización microbiana en la superficie de rocas y sedimentos de las galerías superiores (figura 1), lo que sugiere que las mínimas actividades antropogénicas y la propia la ventilación natural de la cueva han derivado en el aumento de las superficies colonizadas a lo largo de los años.

Recientemente, se realizó un estudio que combinaba el muestreo aerobiológico junto con la monitorización del microclima para evaluar los factores que controlan el origen de los hongos transportados por el aire en la cueva de La Garma (Sánchez-Moral et al., 2021). En este estudio se concluye que la combinación de la monitorización climática con los estudios aerobiológicos es esencial para entender los patrones de dispersión de los microorganismos en la cavidad y es una herramienta útil para el desarrollo de estrategias de conservación de estos ambientes tan especiales.



Figura 1. Sección transversal de la Cueva de la Garma. Se indican la ubicación de las estaciones de control ambiental, del contador de partículas en suspensión y de los puntos de muestreo aerobiológico. EH, sala de entrada; MG, galería intermedia; S#, sectores numerados de la galería inferior.



## Material y métodos

### *Control microclimático y seguimiento del proceso de renovación de aire de la cueva*

Las condiciones microclimáticas se registraron en diferentes sectores de la cueva: tres puntos de la Galería Inferior (Sector I, IV y IX), dos en la Galería Intermedia y otro en la Galería Superior (sala de Entrada), así como en el exterior (figura 1). En las galerías Media y Superior y en el Sector IX, la temperatura del aire se registró cada media hora con termo-higrómetros Tinytag TGP-4500 (Gemini). Los datos de la temperatura del aire de los sectores I y IV se obtuvieron con un registrador de temperatura con termistor externo (SBE 56, Sea-Bird Electronics). La concentración de CO<sub>2</sub> se registró cada hora en los sectores I y IV mediante el uso de sondas NDIR GMM222 (Vaisala). Cada sonda CO<sub>2</sub> se conectó a un registrador CR1000 (Campbell Scientific). El seguimiento de la dinámica del aire de la cueva se complementó con la instalación de anemómetros de ultrasonidos WindSonic (Gill Instruments) que miden la velocidad y la dirección del viento en dos localizaciones clave de la cueva: sectores I y IV. Los datos se transmitieron mediante el protocolo SDI-12 a cada registrador CR1000. Se obtuvieron datos adicionales sobre los vientos predominantes en el exterior de la cueva (velocidad y dirección del viento) de una estación de la red Meteoclimatic (<http://www.meteovillaverdepontones.es/meteodata/>, modelo Davis Vantage Pro2 Plus) situada en Villaverde de Pontones (43° 24' 48"N, 3° 42' 05"W), a menos de 3 km de la entrada de la cueva.

Las partículas en suspensión (aerosoles) son arrastradas y transportadas por la atmósfera de la cueva; por tanto, son una herramienta útil para delimitar en el tiempo el intercambio de masa de aire con el exterior por fuerzas advectivas y el potencial transporte de biomasa dentro del entorno subterráneo. Se utilizó un contador de partículas en el aire portátil TSI Aerotrak Modelo 9306 para el seguimiento temporal de las concentraciones de aerosoles en el Sector IV. Las partículas transportadas por el aire se registraron de forma continua a lo largo de un año pero, para esta investigación, el análisis de las partículas se centró en el periodo más intenso en términos de intercambio de aire con el exterior, es decir, durante el final del verano y el principio del otoño.

### *Muestreos aerobiológicos*

Se realizaron tres campañas de muestreo en un total de cinco puntos en el interior de la cueva y uno en el exterior. Los puntos muestreados fueron: Galería Superior (Sala de Entrada), Galería Intermedia y Galería Inferior (Sector IV, Sector IX y Sector I). Se tomó una muestra del aire exterior como control (figura 2). Estos muestreos periódicos coincidieron con los principales periodos característicos de la dinámica del aire de la cueva: ventilación (marzo), aislamiento (noviembre), y etapa de pulsos de ventilación al final del verano (septiembre) (Sánchez-Moral *et al.*, 2021). El muestreo se realizó con el sistema Duo SAS (Surface Air System) Super 360. Este equipo es un tipo de colector de impacto por succión, que permite la detección de una gran diversidad de microorganismos cultivables al filtrar un volumen de aire preseleccionado a través de dos cabezales provistos de una

serie de orificios. Las muestras se tomaron por duplicado. El volumen de aire filtrado fue de 100 L (Porca *et al.*, 2011). El medio de cultivo utilizado para promover el crecimiento de las bacterias fue agar de tripticasa de soja (TSA, BD) suplementado con cicloheximida (Applichem) (50 µg/mL). Los recuentos y los aislamientos en cultivo puro se realizaron de forma independiente para cada tipo de colonia con diferentes características morfológicas, y para cada réplica de muestra de aire. Las bacterias se aislaron en un medio de cultivo TSA. Las cantidades finales de bacterias en cada muestra de aire se expresaron como unidades formadoras de colonias por metro cúbico siguiendo las instrucciones del fabricante.

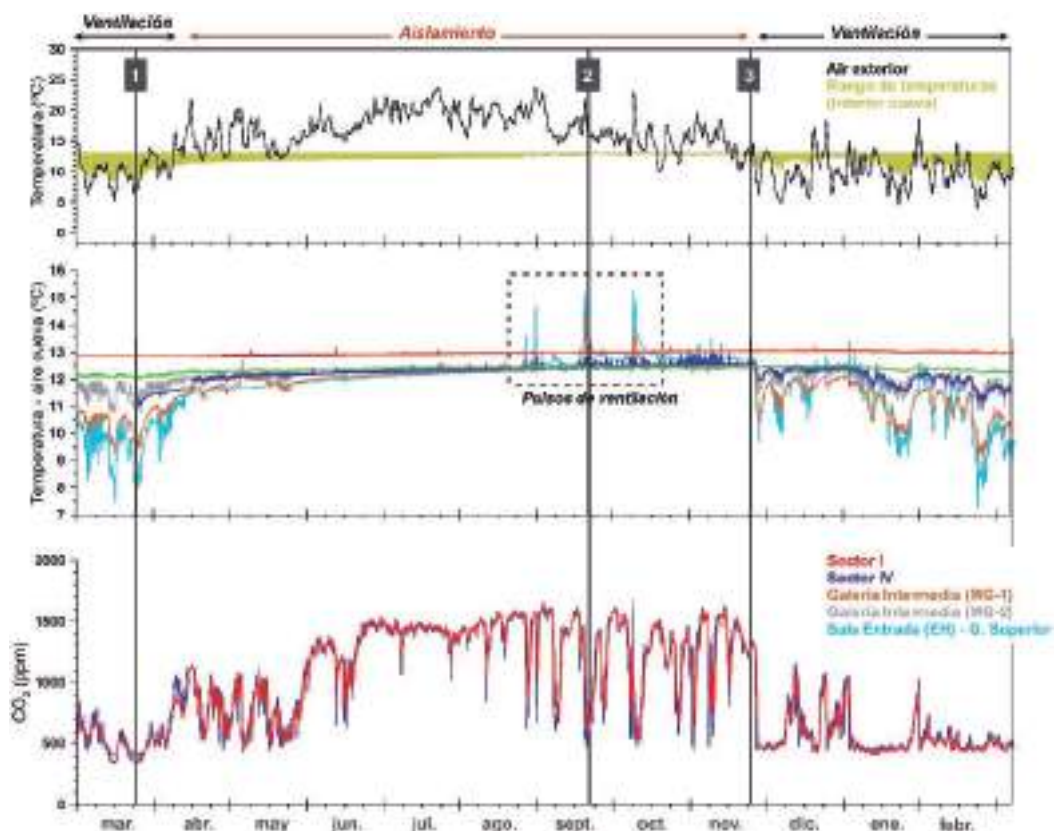
## Resultados y discusión

### *Patrones estacionales de las condiciones microclimáticas y de la renovación del aire en la cueva*

Un análisis gráfico combinado de la evolución temporal de la temperatura del aire, la humedad relativa, la concentración de CO<sub>2</sub> y la velocidad del aire en la cueva de La Garma (figura 2) indica la alternancia de dos patrones estacionales distinguibles en la aerodinámica de la cueva a lo largo del año (Cuezva *et al.* 2016, Sánchez-Moral *et al.*, 2021).

En primer lugar, la cueva experimenta un intenso intercambio de aire con el exterior desde finales de noviembre hasta mediados de abril (periodo de ventilación de la figura 2). El aire del exterior, más frío y denso que el de la cueva, entra en la cavidad por las galerías superiores (galerías superior y media) y, en consecuencia, la masa de aire de la cueva se desaloja principalmente por el techo de estas galerías. Este proceso de renovación del aire conlleva una conexión aerodinámica con la atmósfera exterior, que afecta especialmente a la galería superior y media y al sector IV de la galería inferior (figura 1). Durante este periodo, se producen marcadas oscilaciones termohigrométricas con periodicidad semanal e incluso diaria, provocando descensos térmicos pronunciados y generalizados que alcanzan los -3 °C en las galerías superior y media (figura 2). La galería inferior también se ve afectada, por lo que el sector IV registra las temperaturas mínimas durante los meses de febrero y marzo (aproximadamente 11 °C, de media). Sin embargo, las zonas más distales, como los sectores IX y I, permanecen relativamente aisladas de este régimen de circulación del aire, registrando descensos térmicos muy suaves. En particular, el sector I registra una temperatura del aire casi constante a lo largo del año (12,97±0,06 °C) como consecuencia de su situación geomorfológica alejada de la trayectoria de la célula convectiva descrita, lo que le proporciona una destacada estabilidad térmica y, a su vez, una mayor fragilidad ambiental ante cualquier posible perturbación.

El proceso de ventilación también provoca una notable dilución gaseosa de la atmósfera de la cueva (figura 2). Las estaciones de control situadas en los sectores I y IV experimentan descensos simultáneos de la concentración de CO<sub>2</sub> hasta alcanzar niveles mínimos (alrededor de 500 ppm), es decir, cercanos al fondo atmosférico local. Dentro de este periodo, también se registraron aumentos bruscos de CO<sub>2</sub> a partir de este nivel de base (aproximadamente +500 ppm) entre diciembre y febrero, en respuesta a aumentos coetáneos de la temperatura exterior



por encima del rango de temperatura de la cueva que provocaron aislamientos puntuales y recargas de CO<sub>2</sub> de corta duración en la atmósfera de la cueva.

En segundo lugar, el periodo de aislamiento de la cueva (figura 2), comienza una vez que la temperatura del aire exterior aumenta progresivamente desde mediados de abril, hasta situarse claramente por encima del rango de temperatura de la cueva a partir de finales de mayo. A lo largo del verano, las temperaturas del aire de la cueva tienden a igualarse, variando en un estrecho rango entre 12,3 y 12,5 °C en todas las galerías, excepto en el sector I que se mantiene constante 0,5 °C por encima del resto de localizaciones de la cueva. El CO<sub>2</sub> en el sector I y IV evoluciona conjuntamente hasta un valor máximo relativamente estable en torno a 1500 ppm, entre mediados de junio y mediados de agosto. Este patrón de CO<sub>2</sub> y la homogeneidad espacial de la temperatura indican que prevalece una atmósfera subterránea casi inmóvil, con un mínimo intercambio de aire con el exterior. Durante este periodo, la circulación de aire se limita a las galerías superiores, con entrada de aire más cálido, posiblemente a través de la entrada Garma B, y salida de aire más frío a través de la entrada Garma A (figura 1). Esta

renovación puntal del aire provoca disminuciones a corto plazo de los niveles de CO<sub>2</sub> desde mediados de junio hasta mediados de agosto (figura 2).

### *Estabilidad espacial, condensación y pulsos de ventilación que favorece la dispersión de partículas y bacterias*

A principios y mediados del verano, la renovación del aire de la cueva sólo afecta a las galerías superiores a través de la entrada de aire exterior más cálido hacia el entorno más frío de la cueva, lo que desencadena un destacado fenómeno de condensación en el inicio de la Galería Intermedia y su conexión con la Galería Superior (figura 1). En estos lugares de la cueva con altas tasas de condensación, también se observa un intenso desarrollo de la colonización microbiana, de la cual ya se informó en el momento del descubrimiento de la cueva de La Garma (Schabereiter-Gurtner *et al.*, 2004). La colonización microbiana progresa hacia la zona interna de la Galería Intermedia (figura 1). Por el contrario, la estabilidad térmica durante la mayor parte del verano es una característica distintiva de la Galería Inferior, que apenas se ve afectada por el fenómeno de ventilación descrito para las galerías superiores.

La situación de alta estabilidad térmica en verano se ve frecuentemente alterada por ciclos de corta duración de vientos cálidos con componentes S-SW, registrados en el exterior desde finales de agosto hasta noviembre. Estos vientos del sur suelen superar los 10 km/h, activando una célula convectiva de aire en las galerías superiores debido a la entrada de aire más cálido a través de fisuras y discontinuidades, probablemente situadas a mayor altura que la Galería Intermedia, y su posterior evacuación por la entrada de Garma A. Estos pulsos de ventilación provocan intensos aumentos de la temperatura del aire en la Galería Superior y en la Galería Intermedia de hasta casi 3 °C, que llegan a invertir el gradiente térmico entre las zonas de la cueva (figura 3). Así, la temperatura de la Galería Superior llega incluso a ser muy superior a la de la Galería Inferior (incluyendo el Sector I). Las inestabilidades térmicas entre las zonas de la cueva pueden durar varios días y la alta ventilación resultante provoca fuertes descensos en la concentración de CO<sub>2</sub> en toda la Galería Inferior (figura 3). Los descensos en los niveles de CO<sub>2</sub> alcanzan aproximadamente 800 ppm en el Sector I y 1000 ppm en el Sector IV. Esta dilución generalizada de la atmósfera de la cueva, por tanto, afecta a ambos sectores simultáneamente, lo que demuestra la intensidad del proceso de renovación del aire en toda la cueva.

La presencia de partículas de tamaño grueso en el Sector IV es también un claro indicativo de la prevalencia de una ventilación intensa. Así, los pulsos de ventilación por viento de componente sur también provocaron que la concentración de partículas gruesas en el aire (> 1 µm) aumentara por encima de las 100 partículas/litro, lo que se aleja de los niveles de fondo casi nulos registrados durante los periodos anteriores de estabilidad térmica y ausencia de vientos del sur (figura 3, las partículas en suspensión con diámetros superiores a 1 µm se agruparon en una sola clase, con el fin de simplificar el análisis comparativo con el resto de los parámetros del entorno de la cueva). Los incrementos repentinos de las partículas en suspensión son coetáneos a un mayor movimiento del aire

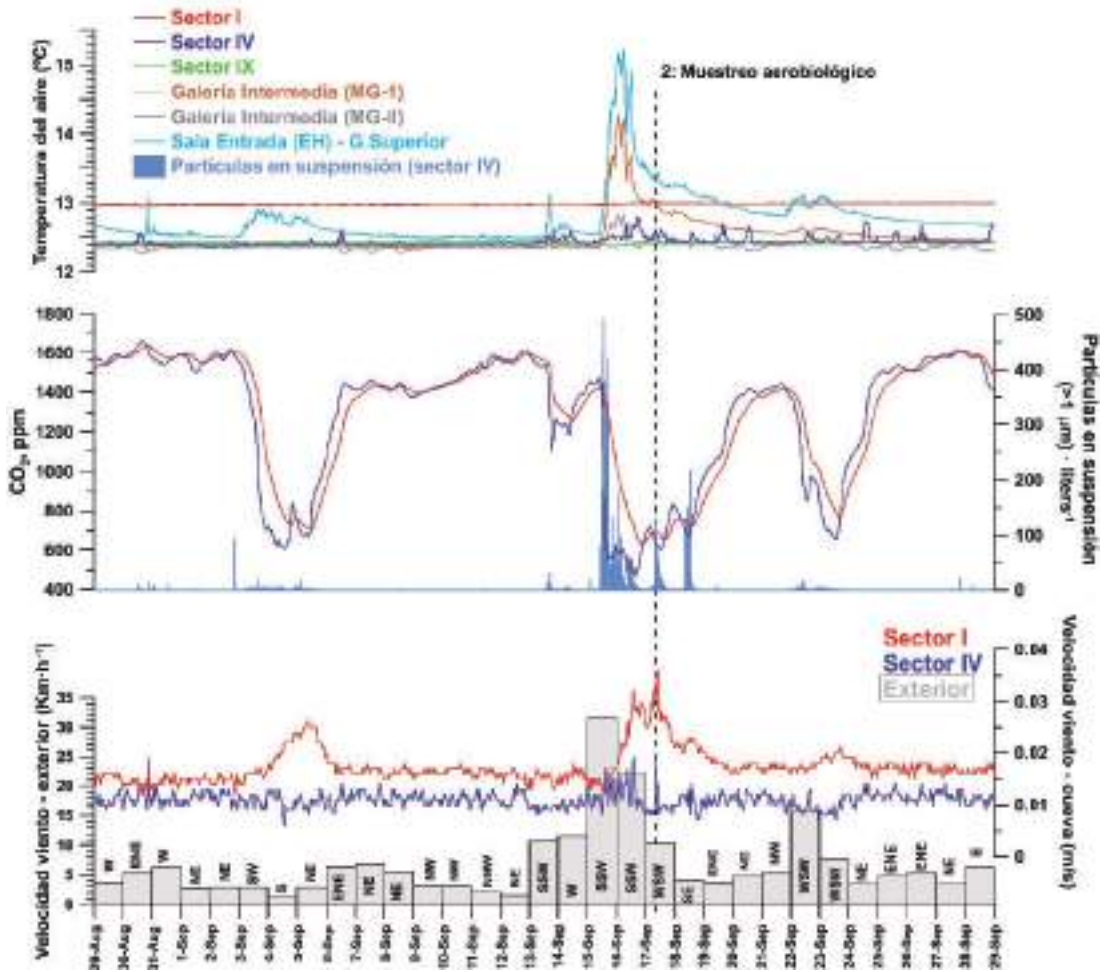


Figura 3. Evolución temporal detallada de las temperaturas, la concentración de CO<sub>2</sub>, las partículas en suspensión y la velocidad del aire en el interior de la cueva de La Garma durante el final del verano. En el panel inferior se indica la velocidad y dirección predominantes del viento exterior.

de la cueva. Una vez que se activa la célula convectiva en el aire de la cueva por aparición de los vientos intensos de componente sur en el exterior, la velocidad del aire de la cueva también experimenta algunos incrementos notables de 1 a 2 cm/s en el Sector I y algunos incrementos suaves en el Sector IV. Los mayores valores de velocidad del aire registrados en el sector I se deben a que es una galería estrecha y ciega cerca de la superficie que provoca un efecto túnel en el movimiento del aire de la cueva. Sin embargo, el sector IV representa un gran volumen abierto situado en la base de un gran pozo donde los cambios de velocidad del aire no son fácilmente detectables.

## Aerobiología y bacterias predominantes

Las tasas de bacterias transportadas por el aire en el interior de la cueva oscilaron entre 30 UFC·m<sup>-3</sup> (etapa de aislamiento, en sala de entrada) y 550 UFC·m<sup>-3</sup> (periodo de pulsos de ventilación, en sector IV) (tabla 1). En el exterior, la concentración de bacterias varió entre 2580 UFC·m<sup>-3</sup> (periodos de viento intenso con componente sur) y 280 UFC m<sup>-3</sup> (etapa de ventilación de la cueva). La comparación de los diferentes sectores y galerías indica que marzo (ventilación) fue el mes con menor concentración de bacterias en suspensión en el aire de la cueva (excepto en el Sector IX). En septiembre (pulsos de ventilación) y noviembre (etapa de aislamiento), la concentración bacteriana fue variable entre los diferentes sectores. En general, en la etapa de ventilación los valores de UFC·m<sup>-3</sup> fueron menores que en el periodo de aislamiento (tabla 1), exceptuando el sector IX en la fase de ventilación y el sector IV en los periodos de pulsos de ventilación. Esto podría explicarse por el hecho de que el Sector IX está conectado por un pozo con la galería basal, a una altitud de 30 m s.n.m., en la que está activo un río subterráneo y el agua circula y emerge al exterior a través de del manantial "Fuente en Cueva", (figura 1). En el Sector IX hay una corriente de aire limitada que entra por esta galería basal (Cuezva *et al.*, 2016). En cambio, el sector IV es un gran volumen abierto situado tras un proceso pozo con proceso de renovación de aire y partículas en suspensión relativamente importante.

	1-Ventilación	2-Pulsos ventilación	3-Aislamiento
Exterior	280 ± 71	2580 ± 64	490 ± 134
Galería Superior	N/A	430 ± 14	30 ± 7
Galería Intermedia	180 ± 14	340 ± 7	220 ± 113
Sector I	190 ± 184	220 ± 127	400 ± 134
Sector IV	280 ± 233	550 ± 113	310 ± 120
Sector IX	340 ± 106	120 ± 113	240 ± 191

Tabla 1. Concentración de bacterias en suspensión en el aire de la Cueva de La Garma (valores en Unidades Formadoras de Colonias, UFC, por m<sup>3</sup> de aire). N/A: sin datos. 1-2-3 indican los muestreos de aerobiología (ver figura 2)

La composición bacteriana del aire de la cueva de La Garma muestra una relativa homogeneidad a lo largo de las tres fechas de muestreo, así como en las diferentes galerías y sectores de la cueva. En general, las mayores concentraciones de todas las especies de bacterias se encontraron al final del verano, lo que corresponde a la etapa de intensos pulsos de ventilación en la cueva. Individualizado por periodos del año (etapas de ventilación, aislamiento y/o intensos pulsos de ventilación), no se observó un patrón definido en el comportamiento de las bacterias más allá de la abundante aparición de *Streptomyces* en todas las etapas, así como la presencia de *Pseudomonas* en la etapa de ventilación, de géneros *Arthrobacter* en los pulsos de ventilación y géneros *Bacillus* en la etapa de aislamiento. La presencia de todos estos géneros bacterianos es común en las cuevas y señalan que su abundancia debe estar relacionada con la capacidad de producir esporas que son fácilmente transportadas por el aire.

Tanto en términos de abundancia relativa como de presencia de bacterias en cada muestreo aerobiológico, destaca la detección de tres especies de *Streptomyces*: *S. pratensis*, *S. cyaneofuscatus* y *S. avidinii*. Estas bacterias también se encontraron en el exterior de la cueva, en cantidades variables. Otras bacterias abundantes fueron *Peribacillus simplex*, *Micrococcus yunnanensis* y *Streptomyces rhizoserihabitans*. Bacterias como *Paeniglutamicibacter sulfureus*, *Pseudarthrobacter siccitolerans*, *Arthrobacter* sp. (*A. oryzae/pascens*) y *Rhodococcus cerastii* no se detectaron en la etapa de ventilación de la cueva. Destaca la abundante aparición de *Streptomyces* spp., en los tres periodos de muestreo, así como *Pseudomonas helmanticensis* en la ventilación, *Paeniglutamicibacter sulfureus*, *Pseudarthrobacter siccitolerans* y *Arthrobacter* spp. en los pulsos de ventilación y *Peribacillus simplex* en las etapas de aislamiento de la cueva. La aparición de estas especies de bacterias es común en la mayoría de las cuevas (Fernández Cortés et al., 2011; García-Antón et al., 2014; Domínguez-Moñino et al., 2021).

Los patrones aerobiológicos entre hongos y bacterias son diferentes, mientras que en los hongos se observaron claras diferencias entre los periodos de ventilación y de estancamiento (Sánchez- Moral et al., 2021), las bacterias no parecen estar muy controladas por la dinámica de la ventilación, ya que en los periodos de ventilación y de estancamiento los valores medios de concentración son similares. Las diferencias en el patrón espacial de las bacterias y los hongos podrían deberse a que los hongos transportados por el aire se presentaban en forma de esporas, fácilmente transportadas por los flujos de aire y cultivables, mientras que la mayoría de bacterias transportadas en suspensión están compuestas por taxones formadores de esporas, además de bacterias adheridas a aerosoles. No obstante, un gran número de bacterias de las cuevas no son cultivables en el laboratorio (Cuezva et al., 2012; Porca et al., 2012)

## Conclusiones

El patrón de dispersión bacteriana está claramente influenciado por la circulación del aire en el ecosistema subterráneo. Considerando el conjunto de los tres muestreos estacionales, las mayores concentraciones de bacterias se encontraron al final del verano, coincidiendo con la etapa de intensos pulsos de ventilación en la cueva. No se observa un patrón estacional definido en el comportamiento de las bacterias más allá de la abundante aparición de especies de *Streptomyces* en todas las estaciones, junto con la presencia destacable de *Pseudomonas* en la etapa de ventilación, especies de *Arthrobacter* en los pulsos de ventilación y especies *Bacillus* en la etapa de aislamiento. La presencia de todos estos géneros de bacterias es común en cuevas y su abundancia está relacionada con la capacidad de producir esporas que son fácilmente transportadas por el aire.

Los resultados de este estudio confirman que La Garma es una cueva frágil desde el punto de vista de la ecología microbiana, en la que cualquier tipo de material introducido en la cueva o expuesto a la atmósfera subterránea (p.e. sedimentos en el caso de las excavaciones arqueológicas) es susceptible de ser colonizado debido al cambio de las condiciones microambientales o a la alteración del equilibrio ecológico. Partiendo de la base de que no existe una única estrategia de conservación de la cueva, la gestión debe fomentar la

aplicación de medidas correctoras encaminadas a reducir la llegada de nutrientes al interior, mantener el microclima interno lo más estable posible y reducir las tasas de intercambio de materia y energía con el exterior. Todo ello se resume en evitar acciones susceptibles de producir partículas en suspensión y/o la movilización de bacterias, en particular aquellas más abundantes en el aire por presentar formas de diseminación esporuladas. El aumento de visitantes o las adaptaciones para las visitas turísticas supondrían un grave impacto por la movilización de masas de aire y la dispersión de microorganismos aéreos. En conclusión, los resultados de este estudio confirman la necesidad de realizar una gestión orientada a la conservación preventiva de la cueva de La Garma, tratando de evitar o minimizar todos los impactos ambientales que puedan ser perjudiciales para su conservación. El enfoque utilizado en este trabajo debería extenderse a otras cuevas para controlar las condiciones ambientales y los microorganismos transportados por el aire, así como para anticiparse a los posibles brotes microbianos.

## Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la Consejería de Universidades, Igualdad, Cultura y Deporte del Gobierno de Cantabria y el Ministerio de Ciencia e Innovación a través de los proyectos PID2019- 110603RB-I00 y PID2020-114978GB-I00. Los autores agradecen el apoyo de la Plataforma Temática Interdisciplinar del CSIC Patrimonio Abierto: Investigación y Sociedad (PTI-PAIS).

## Referencias

- Arias, P., Ontañón, R. (2012). La Garma (Spain): Long-term human activity in a karstic system. In: Bergsvik, K.A., Skeates, R. (Eds.), *Caves in context*. Oxbow Books, Oxford, pp 191-117.
- Cuezva, S., Fernández-Cortés, A., Porca, E., Pasic, L., Jurado, V., Hernández-Marine, M., Serrano-Ortiz, P., Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S., Saiz-Jiménez, C. (2012). The biogeochemical role of Actinobacteria in Altamira Cave, Spain. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 81, 281-290. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2012.01391.x>.
- Cuezva, S., Fernández-Cortés, A., Jurado, V., Saiz-Jiménez, C., Ontañón, R., Arias, P., Hernandez- Vicente, I., Sánchez-Moral, S. (2016). Investigación aplicada a la conservación preventiva del sistema kárstico de La Garma (Omoño, Ribamontán al Monte, Cantabria). In: *Andreo, B., Durán, J.J. (eds.), El Karst y el Hombre: las Cuevas como Patrimonio Mundial*, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, pp. 307-318.
- Domínguez-Moñino, I., Jurado, V., Rogerio-Candelera, M.A., Hermosin, B., Saiz-Jiménez, C. (2021). Airborne bacteria in show caves from Southern Spain. *Microb. Cell.*, 8, 247-255. <https://doi.org/10.15698/mic2021.10.762>.
- Fernández-Cortés, A., Cuezva, S., Sánchez-Moral, S., Porca, E., Jurado, V., Saiz-Jiménez, C. (2011). Detection of human-induced environmental disturbances in a show cave. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 18, 1037-1045. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0513-5>.
- García-Antón, E., Cuezva, S., Jurado, V., Porca, E., Miller, A.Z., Fernández-Cortés, A., Saiz-Jiménez, C., Sánchez-Moral S. (2014). Combining stable isotope ( $\delta^{13}C$ ) of trace gases and aerobiological data to monitor the entry and dispersion of microorganisms in caves. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 21, 473- 484. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1915-3>.
- Porca, E., Jurado, V., Martín-Sánchez, P.M., Hermosin, B., Bastian, F., Alabouvette, C., Saiz-Jiménez, C. (2011). Aerobiology: An ecological indicator for early detection and control of fungal outbreaks in caves. *Ecol. Indic.*, 11, 1594-1598. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.04.003>.
- Porca, E., Jurado, V., Zgur-Bertok, D., Saiz-Jiménez C., Pasic L. (2012). Comparative analysis of yellow microbial communities growing on the walls of geographically distinct caves indicates a common core of



- microorganisms involved in their formation. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 81, 255-266. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2012.01383.x>.
- Sánchez-Moral, S., Jurado, V., Fernández-Cortés, A., Cuezva, S., Martín-Pozas, T., González-Pimentel, J.L., Ontañón, R., Saiz-Jiménez, C. (2021). Environment-driven control of fungi in subterranean ecosystems: the case of La Garma Cave (northern Spain). *Int. Microbiol.*, 24, 573-591. <https://doi.org/10.1007/s10123-021-00193-x>.
- Schabereiter-Gurtner, C., Saiz-Jiménez, C., Piñar, G., Lubitz, W., Rolleke, S. (2004). Phylogenetic diversity of bacteria associated with Paleolithic paintings and surrounding rock walls in two Spanish caves (Llonin and La Garma). *FEMS Microbiol. Ecol.*, 47, 235-247. [https://doi.org/10.1016/s0168-6496\(03\)00280-0](https://doi.org/10.1016/s0168-6496(03)00280-0).



# La nueva legislación en el cálculo de dosis debida al radón: ¿un peligro para la gestión de las cuevas turísticas?

Ismael FUENTE MERINO <sup>(1)</sup>, Luis Santiago QUINDÓS PONCELA <sup>(1)</sup>, Carlos SAINZ FERNÁNDEZ <sup>(1)</sup>, Daniel RÁBAGO GÓMEZ <sup>(1)</sup>, Santiago CELAYA GONZÁLEZ <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad de Cantabria, Laboratorio de Radiactividad Ambiental (LaRUC), Avda. Cardenal Herrera Oria, s/n. 39011 Santander, Cantabria. fuentei@unican.es, luis.quindos@unican.es, carlos.sainz@unican.es, daniel.rabago@unican.es, santiago.celaya@unican.es

---

## Resumen

El gas radón, elemento radiactivo de origen natural forma parte del aire que respiramos y ha sido objeto de estudio con relación a la dosis que recibimos debido a fuentes naturales. En el ámbito laboral, desde principios de los años 50 ha formado parte de una de las componentes de la dosis recibida por los trabajadores de las minas de uranio. Más recientemente, a raíz de la publicación de la Directiva Europea de 1996, EURATOM, el radón presente en recintos como las galerías de minas, aunque no sean de uranio, en las instalaciones balneoterapias y especialmente en las cuevas turísticas ha pasado a ser no solo un problema de salud si no, además, del mantenimiento real y supervivencia de dichas cuevas. Hasta la publicación de la reciente Directiva 59/EURATOM, 2013, el factor de conversión a dosis publicado en el BOE de 2001 ha sido de 5 mSv/WLM. Sin embargo, la nueva ICRP 137 recoge un nuevo valor de 20 mSv/WLM para trabajos en minas que requieran alto esfuerzo y cuevas turísticas, lo que sin duda genera un problema importante de gestión de dichas cuevas. En este trabajo se analizan los fundamentos y consecuencias de la aplicación de este nuevo factor de conversión a dosis con un ejemplo descriptivo de su aplicación.

**Palabras clave:** cuevas, dosis, gestión, radiactividad, radón

## ***The new legislation in calculating doses due to radon: A danger for the management of show caves?***

### **Abstract**

*Radon gas, a radioactive element of natural origin, is part of the air we breathe and has been the subject of study in relation to the dose we receive due to natural sources. In the workplace, since the early 1950s it has been part of one of the components of the dose received by workers in uranium mines. More recently, as a result of the publication of the European Directive of 1996, EURATOM, the radon present in areas such as mine galleries, even if they are not uranium mines, in spa facilities and especially in show*

*caves, has become not only a health problem but in addition to the actual maintenance and survival of these caves. Until the publication of the recent 2013 Directive, the dose conversion factor published in the BOE of 2001 has been 5 mSv/WLM. However, the new ICRP 137 includes a new value of 20 mSv/WLM for heavy underground places and tourist caves which undoubtedly generates a significant management problem for these caves. The paper analyzes the foundations and consequences of the application of this new dose conversion factor with descriptive examples of its application.*

**Keywords:** *caves, dose, management, radioactivity, radon*

## Introducción

El gas radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) procede de la desintegración radiactiva del radio ( $^{226}\text{Ra}$ ) presente en la práctica totalidad de materiales de la corteza terrestre en concentraciones variables. (World Health Organization, 2009; ICRP, 1993). Pueden encontrarse concentraciones en aire en un rango de varios órdenes magnitud, siendo mínimas en el aire exterior, y aumentando según la tasa de producción y el grado de aislamiento en recintos y lugares cerrados. El radón del ambiente se transforma, por desintegración radiactiva alfa, en descendientes sólidos de vidas medias cortas, del orden de minutos. El comportamiento de los descendientes es complejo, por una parte, se pueden depositar en superficies macroscópicas del entorno o, por el contrario, pueden permanecer en el aire. De la fracción de descendientes que no se han depositado y han permanecido en el aire, una parte se vincula a aerosoles y se denomina attached fraction, con un espectro dimensional amplio desde decenas nanómetros, hasta más de una décima de micra (Reineking *et al.*, 1988), y por otra parte se pueden encontrar descendientes del radón no vinculados a aerosoles, la denominada fracción libre ( $f_p$ ).

Cuando se respira una mezcla de gas radón y descendientes, el carácter de gas noble del primero hace que tan solo una fracción insignificante quede retenida en el aparato respiratorio. Sin embargo, el carácter sólido de los descendientes provoca que estos queden fijados en diferentes regiones del tracto respiratorio en función de su tamaño (Reineking y Porstendörfer, 1988). Teniendo en cuenta el carácter de emisores alfa de algunos de estos descendientes, se entiende perfectamente que son los descendientes y no el radón los principales responsables de la irradiación de los pulmones (ICRP, 2017). Por este motivo, cuando se pretende realizar una estimación adecuada de la dosis recibida por inhalación de radón y descendientes, resulta indispensable conocer tanto el factor de equilibrio  $F$ , definido como la ratio entre la concentración equivalente de radón en equilibrio  $EEC$ , evaluada a partir de las concentraciones de los descendientes del radón, y la concentración de gas radón  $C$ , como la fracción libre  $f_p$ .

La inhalación continuada de aire con radón en puestos de trabajo supone un riesgo para la salud científicamente contrastado, que depende principalmente de los niveles a los que se está expuesto y de la duración del periodo de exposición. En 1988, la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC), incluyó al radón en la categoría

principal de agentes cancerígenos (IARC, 1988). Más recientemente, la Organización Mundial de la Salud (WHO), con la colaboración de más de 100 científicos y expertos en radón desarrolló un proyecto internacional que culminó en la publicación "WHO handbook on indoor radon: a public health perspective" (World Health Organization, 2009) que recoge los principales aspectos de la problemática del radón a nivel mundial.

La primera publicación de la International Commission on Radiological Protection (ICRP) dedicada exclusivamente a la protección frente a la exposición al radón fue la ICRP 65 que apareció en el año 1993 (ICRP, 1993). Ya entonces se estableció la distinción entre viviendas y puestos de trabajo como situaciones de exposición con características claramente diferenciables. Esta clasificación se ha mantenido en sucesivas publicaciones acerca del radón, llegándose a la más reciente ICRP 137 de 2017 (ICRP, 2017), donde se presenta un abanico mayor de escenarios de exposición.

Es bien conocido que el caso de la exposición a radón en cuevas turísticas constituye un escenario particular dadas las características de su aire interior. Normalmente, la concentración promedio de partículas ( $Z$ ) en la atmósfera interior de una cueva es muy inferior a la que se encuentra en el aire exterior, lo cual da lugar a la ocurrencia de fracciones libres de descendientes mayores que las que pueden encontrarse en otros lugares de trabajo o en viviendas (Sainz *et al.*, 2007). Además, la relación superficie/volumen suele tener un valor típicamente bajo, disminuyendo la deposición en superficies, principal mecanismo de reducción de descendientes en el aire, y aumentando por tanto el factor de equilibrio  $F$ . Aunque habitualmente la relación entre el  $F$  y  $f_p$  es inversa (Vargas *et al.*, 2000), el factor de conversión a dosis derivado de esta última puede ser muy elevado, debido a la gran carga dosimétrica que poseen los descendientes de radón no vinculados, de tamaño entre 1 y 10 nm (Porstendörfer, 2002).

Todas estas características generales de una gran mayoría de cuevas turísticas, hacen necesario el desarrollo de metodologías de evaluación de dosimetría personal que permitan regular los tiempos de exposición con la mayor eficacia posible. En este trabajo se presenta el uso de diferentes metodologías de evaluación de dosis para estimar las tasas de dosis recibidas en el interior de dichas cavidades. En algunos apartados haremos alusión a la Cueva de Altamira en la que mantenemos una actividad de seguimiento de las condiciones ambientales desde 2013 de manera ininterrumpida y en la que el CSIC desarrollo una labor muy importante (Elez *et al.*, 2013).

## **Materiales y métodos**

### *Medida de la concentración de gas radón*

La concentración de radón en la cueva de Altamira se ha obtenido mediante dos métodos. Por una parte, se ha medido el radón en continuo en intervalos de 1 hora con monitores de radón en las salas del Hall, Sala de Policromos y la Sala del Pozo. Por otra parte, se han utilizado detectores de trazas, que proporcionan un valor integrado de la concentración

de radón en el tiempo, en las salas mencionadas. Los dispositivos colocados en la misma sala se sitúan cerca con el fin de contrastar resultados e identificar posibles errores de funcionamiento. Los monitores de radón y los detectores de trazas son sustituidos cada 2 semanas y medidos en nuestro laboratorio.

El monitor de radón utilizado para medir la concentración en continuo es el Radon Scout (SARAD GmbH). Su modo de operación ya ha sido descrito en anteriores artículos (Fuente et al, 2018). La medida en continuo de la concentración de radón con dispositivos electrónicos en ambientes con un alto grado de humedad relativa, como es el caso de la atmosfera de la cueva, entraña una dificultad añadida. La humedad puede modificar la eficiencia de detección y la recolección de descendientes dentro de la cámara (George, 1996). Con el fin de minimizar la esta influencia, los monitores de radón se introducen en bolsas de plástico con una permeabilidad al radón muy alta que permiten el paso de radón y sin embargo frenan el paso de humedad al dispositivo. Además, los monitores son sustituidos por otros de iguales características cada 2 semanas.

Los detectores de trazas utilizados están constituidos por una cámara de difusión y una parte sensible formada por un plástico CR-39, modelo RSKS (Radosys Ltd.). Este tipo de detector pasivo proporciona la exposición al radón a partir de la cual se puede obtener la concentración de radón media conociendo el tiempo de exposición. El factor de calibración que permite convertir la densidad de trazas en exposición viene proporcionado por el fabricante, sin embargo, este factor se obtiene independientemente en la cámara de radón del laboratorio de radiactividad ambiental de la Universidad de Cantabria (LaRUC), recientemente acreditado ENAC para la calibración de monitores de radón, tanto activos como de trazas (ENAC N° 279/LC10.245, 2022).

Todas las medidas de la concentración de radón llevadas a cabo están sujetas a un estricto control de calidad. El LaRUC está acreditado de acuerdo con la UNE-EN ISO/IEC 17025:2017 para medidas de radón (ENAC 1204/LE2219, 2016).

### *Medida de la concentración de partículas*

La concentración de partículas se mide en diferentes puntos tanto en el interior de la Cueva como en el exterior con una periodicidad quincenal. This parameter was measured by means of a condensation particle counter CPC TSI Model 3007 (TSI Incorporated). En este dispositivo, el aire se bombea a una velocidad de 70 cm<sup>3</sup>/min y pasa a través de una fibra porosa que contiene alcohol isopropílico líquido. Este flujo entra en el equipo y se divide mediante un bypass en 2 flujos, uno de 100 cm<sup>3</sup>/min que se utiliza para el análisis de la muestra y el resto (600 cm<sup>3</sup>/min) que se desprecia. Este flujo es independiente del modo de medida seleccionado en el equipo. La medida realizada con este contador de partículas de condensación determina la concentración de las partículas/cm<sup>3</sup> presentan un tamaño entre 0.01 a más de 1 µm con un 20% de incertidumbre.

## Estimación de dosis

Para estimar la dosis derivada de la inhalación de descendientes de radón es necesario evaluar la exposición a los descendientes del radón, para lo cual es necesario conocer la concentración equivalente de equilibrio (*EEC*) (Hofmann *et al.*, 2012). Esta magnitud, expresada en Working Level (WL), corresponde a la misma potencial alpha energy

$$EEC = \frac{C \cdot F}{3700} \quad (Eq. 1)$$

concentration que una mezcla en equilibrio con una concentración de radón de 3700 Bq m<sup>-3</sup>, y se relaciona con la concentración de gas radón C (Bq m<sup>-3</sup>) a través del factor de equilibrio F:

$$E_{eq} = \frac{EEC \cdot \Delta t}{170} \quad (Eq. 2)$$

A partir de la *EEC* puede evaluarse su valor integral para un periodo de tiempo dado, es decir, la exposición equivalente de equilibrio ( $E_{eq}$ ), que expresada en Working Level Month (WLM) es:

donde  $\Delta t$  (h) es el periodo de exposición considerado.

$$H = E_{eq} \cdot DCF \quad (Eq. 3)$$

La dosis efectiva H (mSv) recibida durante el periodo de exposición puede calcularse a través de la siguiente expresión:

$$H (mSv) = 1.6 \cdot 10^{-6} \cdot C \cdot DCF \cdot F \cdot \Delta t \quad (Eq. 4)$$

siendo DCF (mSv/WLM) es el coeficiente o factor de conversión a dosis. Combinando las Eq. (1) y Eq. (2), esta expresión puede desarrollarse como:

Evaluando H a partir de valores promedio de la concentración C de radón, y asumiendo  $\Delta t = 1$  h, se obtiene valores de tasa media de dosis (mSv h<sup>-1</sup>) para los diferentes periodos considerados (mensual y anual). Teniendo en cuenta que la concentración de radón puede ser medida con bastante precisión, las mayores fuentes de incertidumbre en esta evaluación son *DCF* y *F*. Para la adecuada determinación del factor de equilibrio, además de la medida de la actividad de gas radón, es necesaria la determinación de las actividades de cada uno de sus descendientes, lo cual requiere un equipamiento costoso que no siempre está disponible. Por ese motivo, es habitual utilizar valores representativos procedentes de la literatura. En el caso de cuevas, algunos estudios de revisión muestran valores frecuentes de F entre 0.2 y 0.9 (Cigna, 2004), siendo común adoptar el valor de 0.4 tal y como recomienda la ICRP 137 para el caso de cuevas turísticas

(ICRP, 2017). En este trabajo se van a considerar, para cada aproximación de evaluación del riesgo, tanto el valor recomendado de 0.4. Con el fin de ilustrar la gran variabilidad que puede producirse en la evaluación de la dosis dependiendo del factor de conversión a dosis elegido, en este trabajo se comparan cuatro aproximaciones al riesgo derivado de la exposición al radón en la cueva de Altamira, considerando en cada una de ellas los dos posibles valores de  $F$  anteriormente indicados.

### *Modelo ICRP 65 (ICRP, 1993)*

Como se ha mencionado, esta es la primera publicación de la ICRP dedicada exclusivamente a la protección contra el radón. En ella se presenta el estado del arte con respecto a los efectos sobre la salud de la exposición al radón, proporcionando estimaciones de los coeficientes de detrimento para una exposición durante toda la vida, tanto de trabajadores como de público en general. También en esta publicación se recomendaron niveles de acción para la concentración de radón en edificios, y se puso énfasis en las características diferenciales de los puestos de trabajo con respecto a las viviendas. Además de la necesidad de intervención en los edificios donde se supere el nivel de acción, se pone de manifiesto la necesidad de establecer controles continuos de la exposición al radón en puestos de trabajo. Basándose en los factores de riesgo obtenidos de los estudios epidemiológicos disponibles hasta la época de publicación, la Comisión recomendó un factor de conversión a dosis para trabajadores de  $5 \text{ mSv WLM}^{-1}$ . Es importante reseñar que los factores de conversión a dosis de esta publicación 65 son los actualmente vigentes en la legislación española.

### *Modelo ICRP 115 (ICRP, 2010)*

La publicación del año 2010 de la ICRP presentó una actualización del análisis de los estudios epidemiológicos sobre el riesgo de cáncer de pulmón por exposición a radón y descendientes en la población en general. Como resultado principal se evaluó el factor de riesgo por unidad de exposición en  $5 \cdot 10^{-4} \text{ WLM}^{-1}$ , lo cual supuso un aumento de casi el doble con respecto al riesgo estimado en 1993. Como consecuencia de lo anterior, el coeficiente de conversión a dosis recomendado pasó a ser de  $12 \text{ mSv WLM}^{-1}$  para trabajadores (ICRP, 2009; ICRP, 2010).

### *Modelo ICRP 137 (ICRP, 2017)*

La más reciente publicación de la ICRP incluyendo recomendaciones sobre radón contiene evaluaciones dosimétricas basadas en el modelo dosimétrico descrito en la publicación ICRP 66 (ICRP, 1994) para diferentes situaciones de exposición. En particular, se realiza una revisión de diferentes estudios de exposición a radón en cuevas que proporcionan información sobre los parámetros más relevantes del modelo dosimétrico como son la fracción libre de descendientes, el factor de equilibrio, el espectro dimensional de los



aerosoles o las condiciones de humedad. Como consecuencia, el nuevo coeficiente de conversión recomendado para actividades en cuevas turísticas es de 20 mSv WLM<sup>-1</sup> (ICRP, 2017).

## Aproximación dosimétrica basada en fracción libre (DAUF)

Existen numerosas aplicaciones estadísticas del modelo dosimétrico de la ICRP 66 (ICRP, 1994) a situaciones diversas teniendo en cuenta las características de los aerosoles atmosféricos y otros factores como la tasa y tipo de respiración o el nivel de actividad física (Harrison & Marsh, 2012), que acaban dando lugar a una distribución de factores de conversión a dosis aplicables a cada situación analizada. Con el fin de obtener una aproximación más detallada al caso de la exposición al radón en la cueva de Altamira se han utilizado medidas de concentración de partículas en el aire para evaluar la fracción libre de descendientes. Teniendo en cuenta la aproximación semiempírica (Porstendörfer, 2001) y usada en trabajos previos (Sainz *et al.*, 2007):

$$f_p = \frac{414}{Z} \quad (\text{Eq.5})$$

donde Z (cm<sup>-3</sup>) es la concentración de partículas en el aire. Dado que el ambiente de la cueva de Altamira se caracteriza por tener concentraciones muy bajas de aerosoles, la aplicación en este estudio de la Eq.5 queda restringida a los periodos en los que la concentración de partículas supera los 500 cm<sup>-3</sup>. Para valores de Z inferiores a este valor, la fracción libre superaría significativamente el valor de 1, lo cual no resulta plausible en un ambiente con tan escasa ventilación como es el del interior de la cueva (Sainz *et al.*, 2018). A partir del valor de  $f_p$ , puede evaluarse el coeficiente de conversión a dosis por medio de la siguiente expresión (Porstendörfer, 2002):

$$DCF \left( \frac{mSv}{WLM} \right) = 6.1 + 42 \cdot f_p \quad (\text{Eq.6})$$

Esta ecuación se ha obtenido para lugares con una tasa de ventilación inferior a 0.5 h<sup>-1</sup> y sin fuentes de aerosoles adicionales, de este modo el tamaño de las partículas se ve desplazado hacia valores de 200 nm y hay una gran deposición de las partículas más grandes. La tasa de respiración media considerada en este caso es de 0.75 m<sup>3</sup>/h. La tasa de ventilación obtenida para la cueva de Altamira cumple con el requisito tal y como puede verse en Sainz *et al.* (2018 y 2020).

## Resultados

### *Medida de la concentración de radón y partículas*

Para realizar las estimaciones de dosis se ha utilizado la base de datos de medidas de concentración de radón obtenida por nuestro grupo de investigación desde el año 2013

Mes	Sala Polícromos		Cueva de Altamira	
	Media (Bq/m <sup>3</sup> )	SD (Bq/m <sup>3</sup> )	Media (Bq/m <sup>3</sup> )	SD (Bq/m <sup>3</sup> )
Enero	5325	809	5336	689
Febrero	5332	843	5197	582
Marzo	5096	857	4999	706
Abril	4835	572	4736	594
Mayo	3772	944	3500	912
Junio	1292	383	1435	195
Julio	622	165	893	120
Agosto	679	116	1020	196
Septiembre	1257	418	1797	439
Octubre	2469	749	3105	927
Noviembre	4801	1443	5015	886
Diciembre	5777	1223	5457	639

Tabla 1. Valores medios mensuales de radón durante el periodo de estudio

La concentración de radón en las diferentes zonas dentro de la cueva experimenta variaciones estacionales relacionadas con los intercambios de aire que la cueva realiza con el exterior en función principalmente de los gradientes existentes en la densidad del aire entre el interior y el exterior (Sainz *et al.*, 2018). En el caso de Altamira, las concentraciones de radón presentan valores mínimos durante el verano, época durante la cual la temperatura del aire interior es significativamente inferior a la del aire exterior, produciéndose una desgasificación a través del sistema poroso de grietas y fisuras presentes en el karst. Por el contrario, durante el invierno, el sistema kárstico pierde la mayor parte de su permeabilidad para el intercambio de gases con el exterior, produciéndose un proceso de acumulación de gases interiores como el CO<sub>2</sub> y el radón. Por este motivo se registran los valores máximos de concentración de radón en todas las salas durante el periodo invernal.

Por otra parte, para la evaluación de la dosis usando el modelo dosimétrico basado en la fracción libre (DAUF) se han utilizado las medidas de concentración de partículas que se muestran en la Tabla 2. Los valores de la fracción libre han sido calculados a partir de Eq. (5).

Los valores de concentración de partículas en las diferentes salas, en general, los valores máximos aparecen en el verano, que es la época de mayor intercambio gaseoso con el exterior. Por el contrario, durante el invierno la concentración de partículas en suspensión es mínima.

## Evaluación de dosis

Las entradas a la Cueva de Altamira están cuidadosamente restringidas tanto para el público en general, como para investigadores involucrados en las tareas de conservación preventiva del arte rupestre.

Media	Exterior			Sala Polícromos			Altamira cave		
	Mean ( $\text{cm}^{-3}$ )	SD ( $\text{cm}^{-3}$ )	$f_x$	Mean ( $\text{cm}^{-3}$ )	SD ( $\text{cm}^{-3}$ )	$f_p$	Mean ( $\text{cm}^{-3}$ )	SD ( $\text{cm}^{-3}$ )	$f_R$
Enero	4363	2198	0.09	66	32	-	130	65	-
Febrero	1922	797	0.22	105	63	-	159	72	-
Marzo	2943	3434	0.14	67	28	-	89	37	-
Abril	4248	1959	0.10	168	155	-	196	216	-
Mayo	7957	3696	0.05	235	183	-	338	342	-
Junio	7401	6336	0.06	780	207	0.53	863	227	0.48
Julio	2879	1916	0.14	766	329	0.54	813	411	0.51
Agosto	3960	1390	0.10	1002	419	0.41	894	389	0.46
Septiembre	6735	6083	0.06	915	237	0.45	802	262	0.52
Octubre	4865	2951	0.09	503	221	0.82	430	155	-
Noviembre	4051	1709	0.10	150	136	-	190	155	-
Diciembre	5340	2055	0.08	48	15	-	99	93	-

Tabla 2. Valores de concentración de partículas en la cueva.

Desde el año 2013 se permiten visitas públicas guiadas todos los viernes en las que uno o dos guías turísticos entran con cinco personas. Durante estas visitas no se permanece en ninguna de las salas más de 15 minutos, por lo que las dosis recibidas por el público serán mínimas. Por otro lado, las entradas de investigadores pueden tener mayor duración y se enfocan principalmente en la Sala de Polícromos, donde se centran gran parte de los esfuerzos de conservación. Estas entradas, relacionadas con la toma de muestras, registro de datos ambientales, control de estado de conservación, y reparación o sustitución de instrumentos de medida siempre tienen una duración controlada y limitada por las variaciones de parámetros como la temperatura del aire o la concentración de  $\text{CO}_2$  en la Sala de Polícromos.

Por estos motivos, las estimaciones de dosis que se presentan a continuación se han realizado sobre la base de periodos de exposición de  $\Delta t = 1$  hora. Las tasas así evaluadas pueden servir como orientaciones prácticas para la evaluación de las dosis personales recibidas por guías turísticos e investigadores.

A pesar de que el patrón de evolución temporal de la concentración de radón es semejante en todas las salas, los valores mensuales difieren entre sí dependiendo del nivel de intercambio de cada estancia con las contiguas y, fundamentalmente, del grado de conexión de cada estancia con el exterior. En la tabla 3 se muestran los valores medios mensuales de la tasa de dosis evaluada según cada una de las tres aproximaciones descritas. También se muestra el valor promedio mensual para la cueva en su conjunto y el rango de variación.

Como puede apreciarse, las diferencias en la tasa de dosis evaluada por diferentes aproximaciones tienen una componente constante, correspondiente a las ratios entre los diferentes  $DCF$  y a las existentes entre los factores de equilibrio usados, y otra componente variable debida a las diferentes concentraciones de partículas registradas cada mes. Estas diferencias son máximas durante el periodo de otoño e invierno, entre

DCF (mSv/WLM)	ICRP 65		ICRP 115		ICRP 137		DAUF	
	5		12		20		6.1+42·f <sub>p</sub>	
Eq. factor F=	0.4	0.7	0.4	0.7	0.4	0.7	0.4	0.7
Enero	0.017	0.030	0.041	0.072	0.068	0.120	-	-
Febrero	0.017	0.029	0.040	0.070	0.067	0.116	-	-
Marzo	0.016	0.028	0.038	0.067	0.064	0.112	-	-
Abril	0.015	0.027	0.036	0.064	0.061	0.106	-	-
Mayo	0.011	0.020	0.027	0.047	0.045	0.078	-	-
Junio	0.005	0.008	0.011	0.019	0.018	0.032	0.024	0.005
Julio	0.003	0.005	0.007	0.012	0.011	0.020	0.016	0.003
Agosto	0.003	0.006	0.008	0.014	0.013	0.023	0.017	0.003
Septiembre	0.006	0.010	0.014	0.024	0.023	0.040	0.032	0.006
Octubre	0.010	0.017	0.024	0.042	0.040	0.070	-	-
Noviembre	0.016	0.028	0.039	0.067	0.064	0.112	-	-
Diciembre	0.017	0.031	0.042	0.073	0.070	0.122	-	-
Promedio	0.011	0.020	0.027	0.048	0.045	0.079	0.022	0.004

Tabla 3. Tasa de dosis (mSv/h) promedio mensual correspondiente a cada modelo.

los meses de octubre y marzo, y mínimas durante el periodo de verano. Este hecho puede explicarse teniendo en cuenta que los valores mínimos de Z registrados durante el periodo de menor intercambio con el exterior (Otoño/Invierno) dan lugar a una atmósfera con mayor fracción libre, de acuerdo con la Eq. (5) y, por tanto, el DCF obtenido con la Eq. (6) aumenta significativamente con respecto al correspondiente al periodo de verano, en el que Z es máxima y f<sub>p</sub> es mínima

La tabla 3 presenta, para los tres modelos empleados y dos valores del factor de equilibrio, la tasa de dosis por hora correspondiente a cada valor promedio mensual considerado como anteriormente como promedio desde 2013 hasta el 2018 obtenido a partir de la Eq. (4) teniendo en cuenta los diferentes factores derivados de la ICRP.

## Conclusiones

El presente estudio proporciona nuevas estimaciones de las dosis que pueden recibirse en la cueva de Altamira debido al radón y sus descendientes. Las dosis efectivas asociadas a la inhalación de radón y descendientes han aumentado significativamente desde la propuesta de los primeros factores de conversión a dosis en el año 1993. Los datos que se han utilizado corresponden a series temporales de medidas continuas durante 5 años de monitorización. Dada la regularidad en el comportamiento estacional y anual de la concentración de radón en el interior de la cueva, estas estimaciones pueden ser de utilidad para futuras evaluaciones dosimétricas, teniendo en cuenta la variabilidad interanual propia de la meteorología exterior.

Se ha evaluado la tasa de dosis por exposición al radón recibida en el interior de la Cueva de Altamira teniendo en cuenta los principales factores de variabilidad que influyen en dicha evaluación. Aunque los valores mínimos, procedentes de la aproximación basada en la Publicación 65 de la ICRP, son las actualmente usadas en la legislación española, el uso de los últimos factores recomendados en la Publicación 137 tiene un importante valor orientativo para apreciar de manera más acorde con el estado actual del conocimiento la magnitud de las dosis que pueden recibirse en ambientes como el estudiado.

Por otro lado, las estimaciones aquí presentadas a partir de la aproximación basada en la relación entre la concentración de partículas y la fracción libre (DAUF) pretenden ser un primer paso hacia futuras investigaciones más detalladas acerca de la dosimetría detallada y adaptada a las condiciones específicas de exposición al radón en la Cueva de Altamira de aplicación a otras cuevas con distintas características. Con esta aproximación se ha puesto de manifiesto que las elevadas concentraciones de radón presentes en el interior de la cueva de Altamira, junto con la reducida concentración de aerosoles en suspensión de su atmósfera interior, pueden dar lugar a dosis significativamente superiores a las producidas en otros ambientes con niveles de radón semejantes. Además, la variabilidad que presenta el número de partículas a lo largo del año llevaría consigo la necesidad de establecer medidas adicionales de esta magnitud que, sin lugar a duda, podrían significar el cierre de algunas de las actuales instalaciones turísticas.

El cumplimiento de la legislación española vigente (Consejo de Seguridad Nuclear, 2012), hace que sea necesario aplicar una limitación al tiempo de permanencia anual total de los trabajadores dentro de la Cueva para cumplir con los criterios de protección radiológica establecidos en dicha Instrucción. La Instrucción indica la posibilidad de alcanzarse hasta 6 mSv/año, valor por encima del cual se requeriría la realización de medidas de protección radiológica de mayor complejidad técnica y administrativa. Dicha tasa de dosis se alcanzaría en la cueva de Altamira con permanencias anuales que oscilarían entre unas 300 h si se considera la aproximación basada en ICRP 65 con  $F = 0.7$ , y de unas 120 h si se aplica la aproximación basada en ICRP 137 usando el mismo valor de  $F$ . En cualquier caso, los nuevos coeficientes de conversión a dosis representan un peligro para la supervivencia de muchas cuevas turísticas ya que las "potenciales" dosis que recibirán los trabajadores pueden alcanzar valores muy importantes

## Referencias

- Cigna, A.A. (2004). The distribution of radon concentration in caves. *International Journal of Speleology*, 32(1), 8. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.32.1.8>.
- Consejo de Seguridad Nuclear (2012). Instrucción IS-33, Sobre Criterios Radiológicos Para la Protección Frente a la Exposición a la Radiación Natural. *Boletín Oficial del Estado (BOE)*, Spain, p. 22.
- Elez, J., Cuezva, S., Fernández-Cortés, A., García-Antón, E., Benavente, D., Cañaveras, J. C., Sánchez-Moral, S. (2013). A GIS-based methodology to quantitatively define an Adjacent Protected Area in a shallow karst cavity, The case of Altamira cave. *Journal of environmental management*, 118, 122-134. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.020>.
- Fuente, M., Rábago, D., Herrera, S., Quindós, L., Fuente, I., Foley, M., Sainz, C. (2018). Performance of radon monitors in a purpose-built radon chamber. *Journal of Radiological Protection*, 38(3), 1111. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aad969>.

- George, A.C. (1996). State-of-the-art instruments for measuring radon/thoron and their progeny in dwellings-a review. *Health Physics*, 70(4), 451-463. <https://doi.org/10.1097/00004032-199604000-00001>.
- Harrison, J.D., Marsh, J. W. (2012). Effective dose from inhaled radon and its progeny. *Annals of the ICRP*, 41(3-4), 378-388. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2012.06.012>.
- Hofmann, W., Arvela, H. S., Harley, N. H., Marsh, J. W., McLaughlin, J., Röttger, A., Tokonami, S. (2012). Characteristics and Behavior of Radon and Radon Progeny. *Journal of the ICRU*, 12(2), 55-70. <https://doi.org/10.1093/jicru/ndv007>.
- IARC (1988). *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Man-made Mineral Fibres and Radon*, 43. Lyon, France.
- ICRP (1993). Protection against Radon-222 at Home and at Work. *ICRP Publication 65. Ann. ICRP* 23 (2). <https://doi.org/10.1080/09553009414551371>
- ICRP (1994). Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. *ICRP Publication 66. Ann. ICRP* 24 (1-3).
- ICRP (2009). ICRP Statement on Radon. (ICRP/Ref 00/902/09)
- ICRP (2010). Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. *ICRP Publication 115, Ann. ICRP* 40(1). <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2011.08.011>.
- ICRP (2017). Occupational intakes of radionuclides: Part 3. *ICRP Publication 137. Ann. ICRP* 46(3/4). <https://doi.org/10.1177/0146645317734963>.
- Porstendörfer, J. (2001). Physical parameters and dose factors of the radon and thoron decay products. *Radiation Protection Dosimetry*, 94(4), 365-373. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006512>.
- Porstendörfer, J. (2002, February). Influence of physical parameters on doses from radon exposures. In: *International Congress Series*, Vol. 1225, 149-160. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0531-5131\(01\)00510-6](https://doi.org/10.1016/S0531-5131(01)00510-6).
- Reineking, A.K.H.J., Becker, K. H., Porstendörfer, J. (1988). Measurements of activity size distributions of the short-lived radon daughters in the indoor and outdoor environment. *Radiation Protection Dosimetry*, 24(1-4), 245-250. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a080279>.
- Reineking, A., Porstendörfer, J. (1988). Activity size distributions of the shortlived radon decay products and their influence on the deposition probability in the human lung. *Journal of Aerosol Science*, 19(7), 1331-1337. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(88\)90167-X](https://doi.org/10.1016/0021-8502(88)90167-X).
- Sainz, C., Quindós, L. S., Fuente, I., Nicolás J., Quindós L. (2007). Analysis of the main factors affecting the evaluation of the radon dose in workplaces: the case of tourist caves. *Journal of hazardous materials*, 145(3), 368-371. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.033>.
- Sainz, C., Rábago, D., Celaya, S., Fernández, E., Quindós, J., Quindós, L., Quindós, L. S. (2018). Continuous monitoring of radon gas as a tool to understand air dynamics in the cave of Altamira (Cantabria, Spain). *Science of the total environment*, 624, 416-423. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.146>.
- Sainz, C, Rabago, D., Fernández, E., Quindós, J, Quindós L, Fernández, A., Fuente, I, Arteche, J.L., Quindós, L.S., Celaya, S. (2020). Variations in radon dosimetry under different assessment approaches in the Altamira Cave. *Journal of Radiological Protection*, 40, 367. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab6fd2>.
- Vargas, A., Ortega, X., Porta, M. (2000). Dose conversion factor for radon concentration in indoor environments using a new equation for the F-fp correlation. *Health physics*, 78(1), 80-85. <https://doi.org/10.1097/00004032-200001000-00013>.
- World Health Organization (2009). *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*. Geneva: World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/44149>.

## Comunicación online de cuevas turísticas

María GALLEGO FERNÁNDEZ <sup>(1)</sup>, Rafael PAGÉS RODRÍGUEZ <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE) [cuevasturisticas@cuevasturisticas.es](mailto:cuevasturisticas@cuevasturisticas.es)

---

### Resumen

Las redes sociales suponen, en 2022, una herramienta fundamental para la comunicación social. Pero, ¿qué hay del aspecto corporativo? En la Asociación de las Cuevas Turísticas Españolas (ACTE) hacemos uso de estas plataformas (Facebook, Twitter e Instagram), con los objetivos de incrementar el conocimiento de la entidad entre la sociedad científica, fomentar la divulgación y el estudio del mundo subterráneo y ampliar la visibilidad de los miembros de la entidad en el sector turístico, apostando por una opción sostenible del ocio de vacaciones y de fin de semana. En este trabajo se profundiza en dos líneas que consideramos primordiales para entender el trabajo realizado en ACTE desde abril de 2020 hasta la actualidad. Las tareas llevadas a cabo durante la época COVID y post COVID y las acciones que se presentan, en modo de guía básica, para la gestión de redes sociales en el ámbito de las Minas y de las Cuevas Turísticas Españolas. Una tarea de comunicación interna ante el primer confinamiento (pensado en principio para 15 días), para información a los miembros de ACTE de la situación y de las medidas posteriores, tras las primeras normativas nacionales. Y un trabajo de divulgación externa, dirigida principalmente a los turistas, de concienciación sobre los contagios y de la visión de los espacios representados como lugares seguros y libres de COVID. Posteriormente, tras la relajación de las medidas sanitarias, la labor de la asociación se ha enfocado en retomar la visita a las cuevas y mantener el espíritu, que siempre la ha caracterizado, de preservar y de potenciar el turismo sostenible. Por último, se incluye una guía básica de gestión de redes sociales para entidades de Minas y Cuevas Turísticas españolas, con el fin de guiar a los gestores de estos espacios en el mundo de la comunicación online.

**Palabras clave:** comunicación online, época COVID, redes sociales, minas, cuevas turísticas.

## Online communication of show caves

### Abstract

*Social Media is, in 2022, a leading tool for social communications. But, what about the corporate area? The Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, ACTE, uses these platforms (Facebook, Twitter and Instagram) with the aim of improving the association visibility in the scientist society; to keep on the divulgation and the study of the subterranean world; and enhancing the visibility of the members of ACTE in the tourism sector, betting on sustainable options for weekend and holiday trips. In with this document, we will try to focus on two basic lines, both of them fundamental for understanding the work developed by ACTE since April, 2020 up to the present: actions during COVID and post-COVID phases and a guide to managing Social Media in the area of the Spanish Show Mines and Caves. A first*

*task is included in this analysis about internal communications for the first lockdown (firstly thought for 15 days) to inform our members about the situation and later normative. A list of external divulgations, focusing on tourists and representing our caves as safe and COVID-free spaces, is also explained in this document. After the relaxation of laws referring to the pandemia, the Asociacion de Cuevas Turísticas Españolas has returned to the visits maintaining the spirit, which has always characterized ACTE, of preserving and promoting sustainable tourism. At last, in this work, we will include a basic guide to manage Social Media for Spanish companies who run Show Caves and Mines in order to help them to communicate online with their public.*

**Keywords:** COVID era, online communications, , show caves and mines, social Media.

## **Antecedentes**

La Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE) nace en 1997 y tiene entre sus fines fomentar el turismo subterráneo, además de promover la conservación y protección de todas las cavidades y suscitar el interés del público por las cuevas turísticas. Es por ello que, desde su creación, ha llevado a cabo tareas de promoción turística, participando en ferias de turismo y realizando diversas publicaciones, como la "Guía de Cuevas Turísticas de España", el libro "Yo descubro el mundo subterráneo", etc., además de iniciar en 2005 la celebración del Congreso de Cuevas Turísticas de España, CUEVATUR.

Desde el punto de vista digital, ACTE lanza en el año 2001 la página web [www.cuevasturisticas.es](http://www.cuevasturisticas.es), que se ha convertido en un referente en lo relativo a la información de las cuevas turísticas en formato digital. A partir de 2012, las cuevas turísticas aparecen en las redes sociales, primero en Facebook, posteriormente en Twitter y, por último, en Instagram, convirtiéndose estas vías digitales en la primera vía de promoción turística de la Asociación.

## **Contexto y fechas**

Para poder entender el porqué de este trabajo, es necesario conocer el contexto en el que se basa nuestro análisis. El 15 de marzo de 2020, comienza el confinamiento en España. Pensado en inicio para 15 días, se prolongó hasta el 28 de abril de 2020, cuando dio comienzo el escalonamiento de las medidas y el incremento de las salidas permitidas, según las zonas de España y el número de contagios por COVID. El estado de alarma, asimismo, duraría hasta el 21 de junio de 2020.

Con medidas cambiantes prácticamente todas las semanas, se produjo en el mundo una situación nueva, inesperada y más larga de lo que todos los sectores de actividad previeron. Entre los principales afectados, el sector turístico, en el que se incluyen nuestras cuevas y minas.

Su actividad, paralizada durante el confinamiento, se recuperó de manera gradual y desigual en toda España, atendiendo a la normativa por pandemia de cada Comunidad Autónoma. Al reinicio de las visitas, además, nuestros espacios tuvieron que adaptarse al nuevo régimen organizativo, atendiendo a aforos y a medidas sanitarias. Todo ello,



sumado al exhaustivo protocolo ya existente de conservación de los espacios naturales. Así, algunas de nuestras cuevas decidieron esperar para poder continuar con su labor, una vez más, relajados los requisitos de agrupamiento para las visitas.

Durante este tiempo, en la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas hemos realizado una doble labor comunicativa: la interna, dirigida a los miembros de ACTE, y la externa, enfocada a la comunidad científica y a los turistas.

## **Comunicación interna en pandemia**

La comunicación interna se define como la información que se transmite, de manera oficial y profesional, a los miembros de una empresa, de una administración o, en nuestro caso, de una asociación conformada por minas y cuevas Turísticas de gestión pública, privada y mixta. El objetivo es la creación de vínculos y la interconexión de los participantes en la entidad.

La comunicación interna sirve, además, para la difusión de las estrategias planteadas por la matriz, así como para la información ante situaciones de crisis, como es el caso de la pandemia. Este tipo de relación, en COVID, ha tenido que superar grandes retos: consolidarse como área estratégica, equipos deslocalizados (en el caso de ACTE, con cese de actividad), redes sociales y nuevas tecnologías (Soler, 2021).

En palabras de Corporate Excellence (2022): "Todas las acciones implementadas deben potenciar el acercamiento con los empleados, impulsar un liderazgo humano y cercano, y aumentar el *engagement* de los trabajadores: afianzar su compromiso y sentido de pertenencia con la empresa. Para ello, la transversalidad del propósito y valores en cada una de las iniciativas, es la clave" ..

La comunicación interna ha de ser el espacio "seguro" de los más cercanos a la corporación. Es fundamental, en este punto, crear herramientas que permitan crear identidad y que sirvan de consulta básica para las organizaciones dependientes de, en este caso, la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.

El 12 de abril de 2020 se produce la primera comunicación oficial, no oficiosa, de la Asociación, tras la formalización de la continuación del confinamiento por parte del Gobierno.

*"En estos momentos, en los que la pandemia del COVID-19, en su avance por todo el mundo, ha obligado al cierre de todas nuestras cuevas y minas, nos gustaría lanzar un mensaje.*

*Desde la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), queremos enviar nuestro apoyo a todas aquellas personas que continúan trabajando para preservar los más importante, la salud.*

*Estamos seguros de que vamos a salir juntos de esta crisis. Por ello, en ACTE ya estamos trabajando para que, cuando volvamos a la normalidad, la reapertura de*

*cuevas y minas turísticas de todo el mundo se realice bajo los más altos estándares de sanidad tanto para trabajadores como para visitantes.*

*Por ello, estamos redactando un Manual de Actuaciones que garantice, en todos los casos, la calidad y la seguridad en las visitas al mundo subterráneo.*

*Esperando vernos muy pronto, te pedimos #QuédateEnCasa."*

Posteriormente, se cumple con una de las premisas básicas en comunicación: cumplir lo prometido. Se publica, así, el 11 de mayo, la "Guía básica de directrices de la Asociación Internacional de Cuevas Turísticas (ISCA) para las cuevas turísticas en relación con la pandemia del virus SARS-CoV2" (ISCA, 2020), elaborada junto con la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. "Se trata de un documento de uso público y consultivo, realizado por científicos españoles y dirigido a todas las cuevas y minas turísticas. El objetivo es que éstas tengan a su disposición los protocolos de actuación que permitan la visita a estos espacios subterráneos con las debidas garantías de higiene, desinfección y seguridad para visitantes y trabajadores (Cuevas Turísticas Españolas)".

Esta comunicación se extendió, además, al público externo, como un signo de compromiso de las cuevas turísticas ante la sociedad, trabajando durante el cierre de los espacios para abrir, de nuevo, en las condiciones de excelencia que han caracterizado a sus miembros.

Para poder incidir en la comunicación interna, se creó un canal gratuito de *Slack*, en la que se incluyó a los representantes de todos los miembros para crear una vía de interlocución instantánea y en el móvil, favoreciendo la circulación de las comunicaciones principales y como soporte al correo electrónico, la herramienta más utilizada en la asociación.



Figura 1. Comunicación entre cuevas turísticas durante el confinamiento producido durante la pandemia [www.cuevasturisticas.com](http://www.cuevasturisticas.com). (Durán Valsero et al., 2020).

De manera paralela, se fomentaron mensajes internos con las palabras clave de "apoyo", "consulta", "disposición" y conceptos similares, con mensajes periódicos a todos los miembros y con un canal, a través de correo electrónico, de resolución de dudas sobre la guía de recomendaciones ante la reapertura tras la COVID. La comunicación interna, que tradicionalmente había sido de información, se adaptó a la situación, convirtiéndose en un sistema de consulta y de sostenimiento.

Esta faceta de la comunicación se ha continuado durante las diferentes fases de la pandemia, aportando material a las cuevas y minas turísticas para la adaptación de sus mensajes a la atracción de turistas, en base a las estrategias planteadas, de manera paralela, en la comunicación externa y que analizaremos más adelante. En la figura 1 se muestran algunos ejemplos.

## Comunicación externa durante la COVID. Seguridad

A la hora de explicar qué acciones se han llevado a cabo a lo largo de la COVID, hemos de analizar primero la estrategia básica que se sigue en la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas en el ámbito digital (figura 2).

Si en el área interna se daban herramientas básicas para la gestión de las cuevas, así como la elaboración de mensajes que poder copiar y redistribuir a través de las redes sociales propias, en la comunicación externa, durante la COVID, se potenciaron los mensajes de las cuevas turísticas como entornos seguros y en base a los conceptos de "turismo de cercanía" (fundamental

**La estrategia de contenido de ACTE en un vistazo**

- Web**
  - Actualización con contenido propio una vez a la semana
  - Publicación en redes sociales
- Instagram**
  - Actualización dos veces por semana
  - Contenido propio de las Cuevas Turísticas
  - Uso en cada publicación de plantilla para homogeneización de perfil
- Twitter y Facebook**
  - Al menos una publicación diaria
  - Contenido de medios de comunicación afines sobre refugio, turismo, turismo sostenible y minas turísticas
  - Información compartida de miembros de ACTE
  - Los contenidos propios de ACTE aparecen con la imagen corporativa blanca adaptada al formato de cada red para reforzar la importancia de nuestros mensaje
  - Los contenidos externos, de socios de la asociación o de otros medios, nunca se comparten directamente. Se añade texto propio para dar personalidad al mensaje

**En la medida de lo posible, cada red social y cada publicación tienen un copy propio**

Figura 2. Estrategia de ACTE referida a los contenidos en redes.



Figura 3. Mensajes de para potenciar las cuevas turísticas como entornos seguros durante el COVID.

durante los cierres perimetrales) y comunicando las medidas implementadas en los espacios para convertirse en áreas libres de contagios, tanto en web como en redes sociales (figura 3).

Se continuó, además, con la elaboración de contenidos que trataban de adelantarse a la “vuelta a la normalidad”:

- Especiales por comunidad autónoma con los miembros de ACTE.



Figura 4. Campañas de información durante todo el año para potenciar la visita a las cavidades turísticas.

- Contenido original basado en las experiencias de visitar el mundo subterráneo, con titulares llamativos: "5 razones para visitar las Cuevas Turísticas", "Propósitos de Año Nuevo con cuevas turísticas", "El Guía en las cuevas turísticas", etc. siguiendo, además, reglas de posicionamiento orgánico, SEO.
- Campañas especiales para otoño, invierno, primavera y verano, aportando información sobre cómo visitar las cuevas durante todo el año y fomentando las visitas, también, fuera de temporada alta (figura 4).

## PostCOVID. Sigamos apostando por la sostenibilidad

A medida que la normativa sobre COVID se iba relajando, desde la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas adaptábamos los mensajes al público externo, potenciando especialmente las campañas de verano, temporada alta de nuestros espacios subterráneos. Todas ellas tienen un elemento en común: la vuelta a la normalidad. En todas las publicaciones (remitidas a través de comunicación interna a nuestros miembros), se incluyen mensajes "adicionales" relativos a NATURALEZA, SOSTENIBILIDAD Y TURISMO DE CERCANÍA. Algunos ejemplos que destacamos:

- *Las campañas de verano de ACTE* merecen una mención especial porque suelen ir acompañadas de una mayor cantidad de creatividades (con posibilidad de adaptarse a cada miembro). En los últimos años, se han lanzado "Este verano, vuelve al origen", "#SomosTurismo", "Vuelta a la Cueva" y "Re-toma Cuevas Turísticas", enfocando el mensaje a las opciones de turismo que se permitían en cada fase del desconfinamiento.

**Campañas de verano en ACTE**

**Comunicación interna**

- Envío del material original a los miembros de la Asociación para su adaptación y reproducción en canales propios.

**Comunicación externa**

- Ejemplos de creatividades de verano
- Cada campaña presenta un mensaje adaptado a la situación real (COVID y postCOVID) de nuestras cuevas.
- Mensajes con la misma temática cada año, con diferentes frases receptoras a lo largo de la estación, modificando imágenes.
- Se busca la mayor representatividad posible de todos nuestros asociados y se fomenta un mayor conocimiento de las opciones ante nuestro público.

Las creatividades mostradas son:

- 1. "Este verano vuelve al origen" (con imagen de cueva).
- 2. "#SomosTurismo" (con imagen de cueva).
- 3. "Re-toma #CuevasTurísticas" (con imagen de cueva).
- 4. "Re-experimenta se de sabios" (con imagen de cueva).

Figura 5. Campañas postCovid difundidas por ACTE durante el verano.



Figura 6. Cartel del concurso "Re-trata Cuevas Turísticas".

- *Vídeos cortos dando visibilidad a los guías.* Una de las acciones que se lanzaron en la primavera de 2021, poniendo voz a los principales artífices de las visitas y a los que nos ayudan a visibilizar nuestras Cuevas Turísticas.
- *Manifiesto por el Turismo Sostenible.* Tras las jornadas profesionales de Mallorca (ver apartado referente a los congresos), se lanzó un manifiesto, organizado por ACTE, en el que se clamaba hacia la necesidad de apostar por la sostenibilidad en la gestión turística. Se llevó a cabo una publicación en la web, en redes sociales y se remitió a medios de comunicación (ACTE, 2021).
- *Concursos en redes sociales.* Cada año, se lanza un concurso para animar al público a interactuar en nuestros perfiles (figura 6). Con el pretexto del regalo de entradas para conocer nuestras cuevas, se fomenta una mayor participación entre la Asociación y el público potencial. En estos últimos años, se ha celebrado "La Cueva es el Premio", "Re-trata Cuevas Turísticas" y "Atrapa la Entrada", éste último, por primera vez, de manera simultánea en Facebook, Twitter e Instagram.

## Próximos retos. Vuelta a los congresos

Durante los dos últimos dos años, siempre teniendo como referencia abril de 2020, la presencia de la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas en los congresos y actividades presenciales del sector se ha visto paralizada con motivo de la COVID.

No obstante esto, a lo largo de estos años, ACTE ha organizado los siguientes eventos:

- *Jornadas de Minas y de Cuevas Turísticas del Suroeste Ibérico "Espeleoturismo y Desarrollo Sostenible",* del 22 al 23 de octubre de 2021 en Extremadura.



Figura 7. Vuelta a la actividad. Jornadas y congresos tras la pandemia.

- *Jornadas “Las Cuevas Turísticas durante la pandemia de la COVID-19: un antes y un después”, del 16 al 19 de septiembre de 2021 en Mallorca.*

Cabe destacar CUEVATUR 2022, el gran congreso de las Cuevas y del Mundo Subterráneo que la asociación organiza junto con el Ayuntamiento de Pulpí y la Geoda de Pulpí, que tuvo lugar del 19 al 22 de octubre en Pulpí (Almería). Este evento, que celebra su octava edición, es el gran referente en la gestión de cuevas y de minas, el campo de la espeleología y el turismo subterráneo.

En todos los casos, se ha creado una imagen y un programa con creativities propias y se ha retransmitido información sobre las comunicaciones y conferencias, prácticamente en directo, en Twitter, Facebook e Instagram. Así, se han publicado las principales citas de los participantes y las conclusiones de cada uno de los eventos de manera simultánea al mismo, generando un canal online para los profesionales que no pudieron asistir a los mismos.

ACTE ha participado, asimismo, en:

- *Segundo Congreso Internacional de Espeleología de Marruecos, del 19 al 21 de noviembre de 2021, con la ponencia “Turismo Subterráneo en cuevas naturales: el caso de España”.*
- *Exposición “Málaga, territorio kárstico”, de octubre a diciembre de 2021.*



Figura 8. Participación de ACTE en el Año Internacional de las Cuevas y el Karst.

- *Seis de junio, el Día Internacional de las Cuevas y del Mundo Subterráneo*, ediciones desde 2016. Si nos centramos en los años 2020, 2021 y 2022, se ha llevado a cabo una convocatoria online que ha seguido los preceptos que se analizan en la figura anterior (figura 8).
- *Año Internacional de las Cuevas y del Karst, 2021*, que se explica en la figura 8.

## Decálogo básico de comunicación online para Cuevas y Minas Turísticas

A continuación, se resumen las acciones principales que se ha de seguir a la hora de la gestión de la comunicación digital en el Mundo Subterráneo (figura 9), con los objetivos de llegar a un mayor número de potenciales visitantes y de divulgar la necesidad de conservación de estos espacios naturales, siempre con las premisas planteadas por el Turismo Sostenible. Este decálogo se ha planteado, según la experiencia de la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, desde abril de 2020 y en torno a las siguientes líneas básicas:

1. *Profesionalización.* Es fundamental que la gestión de las comunicaciones de nuestro espacio subterráneo caiga en manos de profesionales, que conozcan el medio digital y que cuenten con formación especializada en dicho ámbito: “No vale saber publicar en Facebook”.
2. *Adaptar las necesidades y los retos planteados a los recursos.* La gestión de la comunicación (tanto web como redes sociales) conlleva tiempo y conocimientos. En muchas ocasiones, querer estar en todos los canales no es eficiente. Hemos





Figura 9. Decálogo básico de comunicación online para cuevas y minas turísticas.

de analizar previamente a nuestro público (edad, hábitos, formación, etc.) y, en base a ello, seleccionar las herramientas que vamos a utilizar.

3. *Seguidores y delimitación de público.* En nuestro caso, la "demografía" online, la comunidad a la que podemos llegar, es limitada. No debemos centrarnos en el número de seguidores, sino en factores como la interacción y la tipología de tu comunidad, ¿a qué público quieres llegar? No es tan importante llegar a un mayor número de seguidores sino que la comunidad sea fuerte, interaccione con tu contenido y comparta tus valores: Turismo Sostenible, preservación de los espacios naturales e interés por el mundo subterráneo, el turismo experiencial, el turismo deportivo, la ciencia y también la espeleología.
4. *Líneas de información.* Establecer los tipos de contenido (sin caer en el exceso) que queremos difundir. Éstos han de combinarse, a lo largo del tiempo, de manera que no caigamos en la publicación monótona de ámbitos de trabajo de nuestros espacios, creando aburrimiento entre nuestra comunidad.
5. *Contenido propio y lenguaje.* Se han de utilizar conceptos y palabras entendibles, de manera general, por nuestro público, explicando aquellos de nueva introducción en nuestros medios (figura 10). Además, la gramática y la creación de frases han de seguir las normas del idioma en el que nos comuniquemos con la comunidad. En cuanto al uso de hashtags, no por utilizar más somos más populares. El resultado final, en la combinación de palabras y de simbología online (*hashtag*) ha de ser elegante y sencillo (figura 10).
6. *Web. Menos secciones, más éxitos.* El exceso de información diluye la atención del usuario de nuestra web, por lo que ésta ha de ser justa en su cantidad, bien organizada



Figura 10. recomendaciones para la difusión online de contenido propio y contenido externo.

(con una página fácil de utilizar) y adaptada a los diferentes dispositivos de acceso (*responsive* para móvil).

- 7. Compromiso.** Crear un calendario de publicaciones para la organización de las publicaciones, combinando el tipo de contenido que queremos realizar. Las redes sociales y la web han de actualizarse de manera periódica, no necesariamente diariamente. Si no tenemos información interesante, podemos esperar un par de jornadas para la actualización de nuestras redes, pero no abandonar los perfiles durante semanas. La constancia es la que otorga los resultados.
- 8. No somos influencers.** Caer en todos los "challenge" de las redes sociales, especialmente en la época de TikTok, es un error. Hemos de analizar qué se está viralizando y si podemos participar con algún contenido novedoso y diferente, adelante. Un hashtag mal aplicado es un tiempo mal empleado.
- 9. Escuchar y compartir.** La comunidad participa de manera activa en la creación de contenido si la escuchamos. Esto se consigue monitorizando los comentarios en redes sociales, así como analizando las analíticas que nos presentan las diferentes plataformas (Google Analytics para la web).
- 10. Herramientas principales.**
  - **Excel.** Para la calendarización de contenido, es lo más sencillo y económico. Desde Google, nos descargamos una plantilla tipo con el calendario anual y gestionamos las actividades principales que sabemos que se llevarán a lo largo del año. A partir de ahí, creamos el resto de las campañas y el "grosso" de las acciones. Hemos de conocer muy bien los picos altos de actividad de nuestra

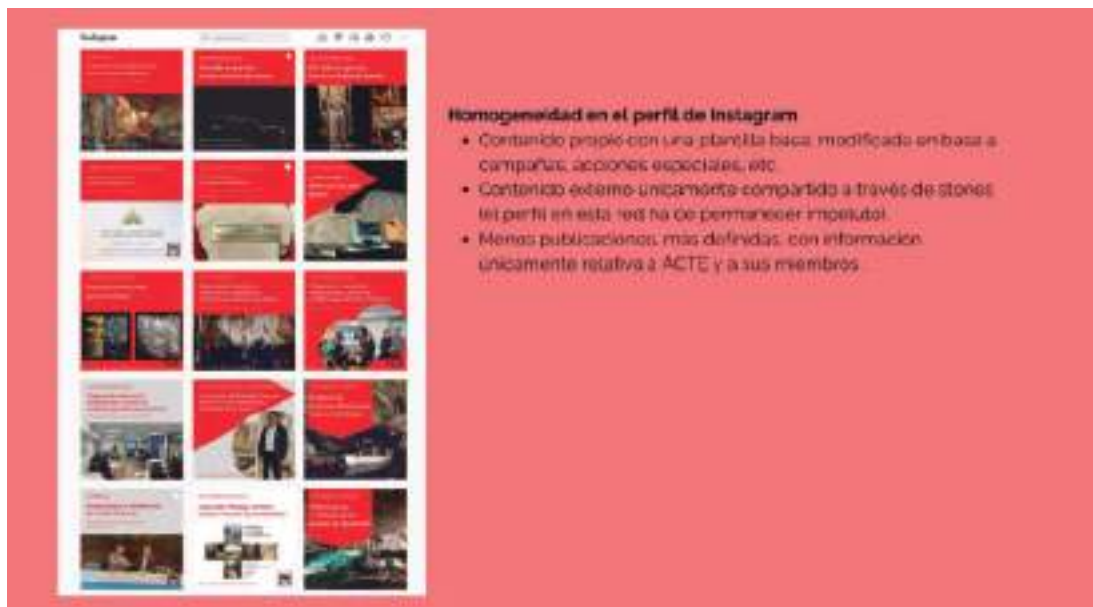


Figura 11. Creación un contenido homogéneo en las redes sociales.

cueva o mina para concretar los principales *inputs* para los meses más fuertes para nuestro negocio.

- *Hootsuite*. Para la realización de "copies" (textos para redes sociales) con imágenes. Se pueden programar a lo largo de los días, semanas y meses, si bien la versión gratuita tiene limitado el número de programaciones que se pueden realizar, así como el número de redes sociales (cuatro y dos, respectivamente). Es una herramienta fundamental.
- *Canva*. Permite realizar, también con versión gratuita, creatividades con formato para cada una de las redes sociales en la que estemos, también la realización de vídeos cortos. Nos permitirá crear una identidad propia, que repetiremos en el tiempo y en nuestro perfil, para darle homogeneidad a nuestras comunicaciones.
- *Campañas de pago*. Invierte solo si es necesario y teniendo en cuenta que tu demografía online está bien definida. Si no, estamos tirando el dinero. Los grandes dispendios, sin control y sin un objetivo claro no son útiles. Es mejor crear una estrategia de contenido de pago a medio/largo plazo para consolidar resultados.

## Agradecimientos

Los autores de este análisis quisieran agradecer a la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, en especial a su Presidente, D. Manuel Durán Hidalgo, haber apostado por la comunicación de la entidad en un periodo tan sumamente difícil como la pandemia.

También a los gestores y demás colaboradores de las cavidades que forman parte de la asociación, que siempre nos han guiado en la comunicación del mundo subterráneo, aportando conocimientos científicos y turísticos.

## Referencias

- ACTE-Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (2021). Sobre el Turismo Subterráneo del siglo XXI. ACTE. <https://www.cuevasturisticas.es/documentos-ap/noticias/CartadeCampanet.pdf>.
- Corporate Excellence (2020). Comunicación interna en tiempos de COVID. <https://www.corporateexcellence.org/recurso/comunicacion-interna-en-tiempos-de-covid/3f704f8f-2c20-aa41-257d-198367c2ee85>.
- Durán Valsero, J.J., Durán Laforet, S.R., Morales García, R., Robledo Ardila, P.A. (2020). Cómo visitar una Cueva Turística. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. <https://www.cuevasturisticas.es/documentos-ap/noticias/instruccionesvisitarcuevasturisticasdef comprimido.pdf>.
- ISCA - International Show Caves Association (2020). Guía básica de directrices de la Asociación Internacional de Cuevas Turísticas (ISCA) para las Cuevas Turísticas en relación con la pandemia del virus SARS-CoV2". Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. <https://www.cuevasturisticas.es/documentos-ap/noticias/Recomendacionesparacuevasturisticas.ISCACOVID19.abril2020.pdf>
- Soler, N. (2021). Los retos de la comunicación interna en 2021 más allá del teletrabajo. <https://www.observatoriorh.com/orh-posts/los-retos-de-la-comunicacion-interna-en-2021-mas-alla-del-teletrabajo.html>.

## **El Pozo Sotón, una experiencia turística única**

Lilia GARCÍA LORENZO <sup>(1)</sup>, Javier MENÉNDEZ RODRÍGUEZ <sup>(1)</sup>, Dulce VEGA GONZÁLEZ <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>SADIM Ingeniería. Grupo HUNOSA.

lilia.lorenzo@sadim.es, javier.menendez@sadim.es, dulce.vega@sadim.es

---

### **Resumen**

El Pozo Sotón, una mina centenaria, enclavada en plena cuenca hullera central asturiana, es uno de los primeros pozos de extracción vertical de carbón. Comienza a excavar en 1917, sobre una amplia explanada ganada al río Nalón, de mano de la Sociedad Metalúrgica Duro Felguera. En 1967, Pozo Sotón, junto con todas las minas de la Sociedad Metalúrgica Duro Felguera, y junto con las minas de una veintena de empresas carboneras asturianas, pasa a formar parte de Hulleras del Norte S.A., HUNOSA. En diciembre de 2014, el Pozo Sotón deja de extraer carbón y apenas seis meses después, en junio de 2015, se pone en marcha el proyecto de visitar la mina. Un proyecto pionero y único en España, que permite a las visitas conocer una mina real de carbón y recorrer galerías mineras a casi 600 metros de profundidad. El proyecto pretende dar a conocer, por una parte, la realidad del oficio de un minero del carbón. Pero también pretende conservar y dar a conocer la memoria de una parte de la historia asturiana, estrechamente ligada a la minería del carbón. En estos siete años de andadura, el proyecto del Pozo Sotón se ha completado con la oferta de dos alternativas a las visitas. Aparte de conocer el interior de la mina, Pozo Sotón ofrece un recorrido por parte de las instalaciones exteriores del pozo, declaradas Bien de Interés Cultural en marzo de 2014. Y, además en la casa de aseos y lampistería del pozo se ha instalado un espacio expositivo, el Centro de Experiencias y Memoria Minera - CEMM. Se trata de una exposición que desarrolla la historia de HUNOSA a través de la experiencia y la interactividad del visitante con elementos reales y virtuales.

**Palabras clave:** Experiencia minera, mina de carbón visitable, Pozo Sotón.

## **El Pozo Sotón (Asturias), a unique tourist experience**

### **Abstract**

*Pozo Sotón, a century-old mine, located in the heart of the central asturian coal basin. It is one of the first vertical coal extraction shafts, which began to be excavated in 1917, on a wide esplanade reclaimed from the Nalón river, by Sociedad Metalúrgica Duro Felguera.*

*In 1967 Pozo Sotón, together with all the mines of Sociedad Metalúrgica Duro Felguera, and together with the mines of about twenty Asturian coal companies, became part of Hulleras del Norte S.A., HUNOSA. In December 2014, Pozo Sotón stops extracting coal, and barely six months later, in June 2015, the project to visit the mine is launched. A pioneering and unique project in Spain, which allows visitors to get to know a real coal*

*mine. And tour mining galleries almost 600 meters deep. The project aims to show, on the one hand, the reality of the work of a coal miner. But it also aims to preserve and make known the memory of a part of Asturian history, closely linked to coal mining. In these seven years of existence, the Pozo Sotón project has been completed with the offer of two alternatives for visits. In addition to visiting the inside of the mine, Pozo Sotón offers a tour of part of the shaft's exterior facilities, declared an Asset of Cultural Interest in March 2014. In addition, an exhibition space, the Mining Experience and Memory Center (Centro de Experiencias y Memoria Minera - CEMM), has been installed in the pit's toilet and lamp houses. It is an exhibition which develops the history of HUNOSA through the visitor's experience and interactivity with real and virtual elements.*

**Keywords:** *Mining experience, visitable coal mine, Pozo Sotón.*

## Una mina centenaria

El Pozo Sotón, una mina centenaria enclavada en plena cuenca hullera central asturiana, es uno de los primeros pozos de extracción vertical de carbón de la cuenca del río Nalón. El momento de creación del Pozo Sotón coincide con el cambio de tendencia y progresivo abandono de la minería de montaña, por agotamiento de las vetas de carbón. En consecuencia, a principios del siglo XIX (figura 1), las minas de montaña de la cuenca hullera asturiana se comienzan a abandonar. De manera paralela, y en muchas ocasiones coetánea durante años, se inicia el proceso de explotación del carbón que se encuentra por debajo de los valles, a través de la instalación de pozos verticales, para perseguir esas vetas de carbón, ya agotadas en las montañas.

En este contexto, en 1917 se comienza a excavar el Pozo Sotón, de mano de la Sociedad Metalúrgica Duro Felguera. Se busca para Sotón un emplazamiento junto a unas minas de montaña, también propiedad de la Duro las Minas de Santa Ana. Con ellas comparte ciertos espacios de producción durante los primeros años. Y de ellas, se conservan vestigios, en forma de bocaminas, frente a las actuales instalaciones del Pozo Sotón<sup>1</sup>.

Para la preparación de la plaza de maniobras o espacio productivo exterior del Pozo Sotón, la Sociedad Metalúrgica Duro Felguera organiza un espacio amplio y perfectamente estructurado. Para lo que además realiza la tarea de ganar espacio al río Nalón, con el que comparte la linde en su margen izquierda. El Pozo Sotón pronto se convierte en un emblema para la compañía, por lo que pone especial cuidado y esmero en el acabado de todas sus edificaciones, incluso a lo largo de los años en las posteriores ampliaciones que experimentarán algunos de sus edificios más significativos. Como es el caso de la casa de máquinas, ampliada en los años cincuenta<sup>2</sup>, cuya obra es prácticamente imperceptible, conservando en su conjunto la apariencia y armonía estética de la original.

El Pozo Sotón pertenece a la Sociedad Metalúrgica Duro Felguera hasta 1967, momento en que todas sus minas, junto con las minas de una veintena de empresas mineras

---

<sup>1</sup> Es el caso de las bocaminas La Sallosa o Generala.



*Figura 1. Vista de los castilletes, réter y edificio de oficinas del pozo Sotón a primeros del siglo XX. Fuente: Archivo Histórico de HUNOSA – Pozo Fondón.*

asturianas, pasan a formar parte de la que será, desde su primer día de nacimiento, la mayor empresa carbonera española, Hulleras del Norte SA, HUNOSA<sup>3</sup>.

Ya en manos de HUNOSA se continúa explotando carbón y ampliando las instalaciones del pozo. En la década de los años setenta se produce la concentración de la actividad extractiva en el Pozo Sotón, lo que da lugar a un significativo aumento de la plantilla, que alcanza los 1.500 trabajadores. En ese momento se construye el último de los edificios del pozo, una nueva casa de aseos, lo que provoca el cambio de uso de la original, que se destina a espacio de almacén. El declive de la minería de principios del siglo XXI provoca el cierre sucesivo de los diferentes pozos asturianos. Para Sotón, el cese en la extracción de carbón llega en diciembre de 2014.

La estructura protagonista del pozo, como en cualquier instalación de estas características, es el castillete. Pero el Pozo Sotón cuenta con dos castilletes, el principal o maestro y otro

---

<sup>2</sup> La casa de máquinas es uno de los primeros edificios que se construye en el Pozo Sotón, entre 1917 y 1922. La Sociedad Metalúrgica Duro Felguera diseña un edificio destinado a albergar las máquinas de extracción, que sostienen y manipulan las jaulas de entrada a la mina. Con el tiempo se instala en este espacio otra maquinaria complementaria, como los compresores o el grupo eléctrico. En 1954 el edificio se queda pequeño por lo que se lleva a cabo una reforma consistente en la ampliación de su lado sur en unos veinte metros. A pesar de las dificultades, y de lo costoso del proyecto, la reforma respetará todas las características y la estética del edificio original. De esta forma, una vez más, la Duro Felguera demuestra el interés por mantener la armonía estética del centro productivo, convirtiendo al Pozo Sotón en un emblema de la empresa minera.

<sup>3</sup> El decreto de constitución de HUNOSA establecía en el artículo 1 que la empresa tendría por objeto "la explotación de minas de carbón, así como la realización de cuantas actividades con ella se relacionen, en la que participarán el Estado, a través del Instituto Nacional de Industria, y las empresas Sociedad Metalúrgica Duro-Felguera, S.A., Industrial Asturiana Santa Bárbara, S.S., Fábrica de Mieres, S.A., Hullera Española S.A., Compañía de Carbones, Industria y Navegación, S.A., Compañía Industrial Minero-Astur, S.A., y Nueva Montaña Quijano, S.A."

auxiliar. Envolviendo y conectando los dos castilletes se desarrolla el réter, cuya función principal es la clasificación del mineral. Este elemento, al encontrarse en altura, libera espacio en la plaza y, además, facilita la carga y transporte del carbón. El mineral ya seleccionado se vuelca directamente desde el réter a través de grandes tolvas instaladas en él.

La construcción de los dos castilletes y del réter (figura 1) fue realizada por la Sociedad Metalúrgica Duro Felguera, en 1917, de manera paralela a las labores de profundización. Durante estos primeros años se construye también el edificio original de la casa de aseos, la casa de máquinas y el primer edificio de oficinas administrativas. Este conjunto de elementos es declarado Bien de Interés Cultural<sup>4</sup>, con la categoría de Monumento, en marzo de 2014.

El Pozo Sotón además ha sido incluido en la lista de 100 Elementos del Patrimonio Industrial en España, según identifica el Comité Internacional para la conservación y defensa del Patrimonio Industrial (TICCIH).

## Las visitas a la mina

El cierre administrativo del Pozo Sotón se produce en diciembre de 2014, pero el Pozo Sotón continúa abierto, y apenas seis meses después, en junio de 2015, se pone en marcha un proyecto pionero y único en España, que abre las puertas de una mina real de carbón al público, para mostrar las tareas propias de un minero del carbón (figura 2).

El proyecto de HUNOSA pretende no sólo dar a conocer el medio minero, si no preservar en la memoria de las generaciones futuras la historia e identidad de la minería del carbón asturiano.

Desde sus comienzos, el proyecto ha sido bien acogido, no sólo por el público en general, también ha sido nombrado Embajador Turístico de Asturias en 2017 por la patronal asturiana de hostelería y turismo del Principado (OTEA), por la "acertada reconversión de una instalación minera para uso turístico y cultural". También ha sido declarado *Anchor Point* por el *European Route Industrial Heritage* (ERIH), por sus valores culturales y turísticos, e integrado en la Red Europea de Museos Mineros.

El Pozo Sotón, como recurso cultural turístico ofrece tres posibilidades: la visita al interior de la mina, la visita a las instalaciones exteriores y la visita al espacio expositivo, conocido como Centro de Experiencias y Memoria Minera (CEMM).

La visita al interior de la mina es, sin duda, la experiencia que más caracteriza y la que más representa al Pozo Sotón. Es una propuesta solamente accesible a mayores de 16

---

<sup>4</sup> BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, no 99. Decreto 31/2014, de 5 de marzo, por el que se declara bien de interés cultural, con la categoría de monumento, el pozo Sotón, en el concejo de San Martín del Rey Aurelio. 24/04/2014. "Los elementos del pozo Sotón que se entienden afectados por la declaración como Monumento son los dos castilletes, el réter, la casa de máquinas y las oficinas sindicales".





*Figura 2. Visita al interior de la mina del Pozo Sotón, picando carbón a la izquierda y recorriendo una galería a la derecha. Fuente: HUNOSA.*

años, por lo que la oferta se completa con las otras dos opciones, que en todos los casos pretenden relatar a las visitas en qué consiste el oficio de un minero del carbón y lo que ha significado para Asturias la minería del carbón.

## **La visita al interior de la mina**

El paulatino y reciente cierre de las explotaciones mineras de la Cuenca Central asturiana conlleva la desaparición de una actividad industrial de gran arraigo en Asturias. Pero además se corre el riesgo de la pérdida de la experiencia profesional, del conocimiento técnico del oficio y de la cultura derivada de un modo de vida transmitido de generación en generación. Sin embargo el abandono de las instalaciones mineras producida en los últimos 30 años ha despertado el interés por la conservación de parte de su patrimonio.

En esta línea de trabajo HUNOSA se propone, en 2013, el acondicionamiento para visitas de uno de sus pozos, en aquel momento activo, el Pozo Sotón. De manera previa a la puesta en valor de sus instalaciones, con el objetivo de darles un uso parcialmente turístico, se analizaron una serie de recorridos visitables seguros (tanto en exterior como en interior) y adaptables a distintos tipos de público. Asimismo, se elaboró un inventario de puntos o localizaciones con especial interés para ser visitados durante el desarrollo de las distintas actividades. Las visitas a la mina se plantean como el principal atractivo de la oferta, contando con la originalidad de realizarse dentro de unas instalaciones conservadas de un modo genuino.

El proyecto finalmente se pone en marcha en junio de 2015, y consiste en la organización de visitas guiadas al interior de las instalaciones de la mina de carbón del Pozo Sotón. Para ello, previamente a la bajada a la mina, se provee a las visitas de la ropa adecuada y habitual de un minero: mono azul, camiseta, calcetines, cinturón de cuero y botas de seguridad de caña larga. A continuación se reúne al grupo de visitantes para la charla formativa de seguridad, donde se completa el atuendo con el casco, la lámpara de luz y el equipo auto-rescatador.

El recorrido por el interior de la mina discurre por las plantas 8a, 9a y 10a, alcanzando una profundidad respecto a la superficie del terreno de entre 386 y 556 m (figura 3). El



*Figura 3. Visita al interior de la mina del Pozo Sotón, descendiendo escaleras a la izquierda y descendiendo una chimenea de ventilación (La Jota) a la derecha. Fuente: HUNOSA.*

acceso a la mina se realiza a través de la jaula de personal, que desciende a una velocidad cuatro veces superior a la de un ascensor convencional.

Durante la visita se recorren diferentes elementos propios de una mina de carbón, conociendo los métodos de explotación empleados, las funciones de los distintos equipos y máquinas, los tipos de sostenimiento aplicados, la organización del transporte en la mina, los sistemas de control ambiental (CO, CO<sub>2</sub>, anemómetros, grisúómetros...), los sistemas de comunicación (teléfonos, genéfonos, etc.) y automatización, los sistemas de bombeo y achique, puertas de ventilación, etc.

Las condiciones dentro de la mina son muy especiales: oscuridad, iluminación artificial, ruidos, sensación de confinamiento, humedad, calor, presencia de polvo en el ambiente, por lo que la experiencia se enmarca dentro del conocido en los últimos años como turismo de aventura.

Pero la experiencia de visitar el interior de la mina del Pozo Sotón también se encuadra dentro de la categoría de turismo cultural. Al frente de la visita, los guías, mineros de profesión, velan por la seguridad del grupo, a la vez que describen los diferentes espacios que se recorren.

## **La visita exterior**

Como en la opción anterior, la visita a las instalaciones exteriores del Pozo Sotón también está dirigida por experimentados mineros que han reorientado su actividad profesional y ahora realizan tareas de guías por lo que ha sido desde siempre su entorno de trabajo, la mina (figura 4). El recorrido exterior ofrece un paseo por las instalaciones del Pozo Sotón



*Figura 4. Interior de la casa de máquinas del pozo Sotón, a la izquierda. Visitantes ante los castilletes y réter del pozo a la derecha. Fuente: HUNOSA.*

que han sido catalogadas como Bien de Interés Cultural, para posteriormente introducirse en diferentes galerías construidas en el exterior del pozo. Estas galerías, llenas de hitos mineros a modo de escenarios simulados, se han construido con los mismos materiales que se utilizan de manera y habitual en el interior de la mina.

Para realizar el recorrido, el visitante tendrá que portar la lámpara minera y el casco. Durante la visita se muestran los distintos métodos de explotación en seis galerías didácticas creadas para ayudar a comprender la labor minera y las características de la maquinaria utilizada en el interior de la mina.

## **El Centro de Experiencias y Memoria Minera (CEMM)**

Para completar la oferta turística del Pozo Sotón, HUNOSA, a través de su filial SADIM, diseña el Centro de Experiencias y Memoria Minera de HUNOSA (CEMM) (figura 5). El Centro fija como principal objetivo desarrollar la historia de la empresa, HUNOSA, a través de la experiencia y la interactividad del visitante con elementos reales y virtuales. La exposición se instala en la segunda casa de aseos y lampistería que tuvo el Pozo Sotón, construida en 1976, a apenas quince metros de los castilletes.

El Centro de Experiencias se ha diseñado como un instrumento de aprovechamiento de unas estructuras mineras de gran valor patrimonial en un momento idóneo, pocos meses después del cierre administrativo del pozo, estando sus instalaciones aún en uso.

El centro fija como principal objetivo desarrollar la historia de la empresa, HUNOSA, a través de la experiencia y la interactividad del visitante con elementos reales y virtuales.

El 90% de los elementos expuestos se han recuperado y/o reutilizado de pozos mineros cerrados. El espíritu del Centro es el de aprovechar todos los materiales disponibles. La selección de piezas de pozos cerrados se utiliza para su exposición directa, o se reutilizan para dar soporte a material expositivo.



Figura 5. El CEMM; botiquín a la izquierda y reproducción, de una vivienda obrera a la derecha. Fuente: HUNOSA.

Pero el proyecto pretende ir más allá del hecho de difundir entre el público una información. Busca involucrar al visitante. Estimular su curiosidad e interés y conseguir que forme parte de la muestra y de su contenido. El relato se desarrolla en base a la creación de experiencias en el visitante, como bajar y subir una percha de la casa de aseos, empujar un vagón de mina de casi una tonelada, experimentar la oscuridad más absoluta o interactuar con novedosos y variados recursos tecnológicos.

## Referencias

- Álvarez Areces, M. (coord.) (1987). *El carbón, una historia con historia*. GH Editores SA – HUNOSA. 1987. 121pp. De Ávila, L.J. (1999). *Uno de los nuestros, Don Vicente Vallina, el médico de los mineros*. Ed. Nobel – HUNOSA, 205 pp.
- Gascué, F. (2007). *Colección de artículos industriales acerca de las minas de carbón de Asturias [1888]*. Ed. Hunosoa.
- Días-Faes Intriago (1979). *La Minería de la hulla en Asturias (un análisis histórico)*. Servicio de publicaciones Universidad de Oviedo, 240 pp.
- Tamames, R., Rueda, A. (2022). *Estructura Económica de España*. 26ª Edición. Alianza Editorial.
- Suarez Antuña, F. (2011). *Memoria histórica y descriptiva del Pozo Sotón (San Martín del Rey Aurelio)*. Consejería de Cultura y Turismo del Principado de Asturias, 109 pp.
- Uría, J. (coord.) (2008). *El Archivo de HUNOSA*. Ed. HUNOSA, 255pp.

# El Soplao, 15 años telemonitorizado en tiempo real

José Antonio GÁZQUEZ PARRA <sup>(1)</sup>, Nuria NOVAS CASTELLANO <sup>(1)</sup>, Manuel FERNÁNDEZ ROS <sup>(1)</sup>, Rosa GARCÍA SALVADOR <sup>(1)</sup>, Jaime Mc LENNAN <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Ingeniería. Universidad de Almería.

jpgazquez@ual.es, nnovas@ual.es, mfernandez@ual.es, rgarciasalvador@ual.es

<sup>(2)</sup> Cueva de El Soplao. Turismo del Nansa. direccion@turnansa.com

---

## Resumen

La Cueva de El Soplao (Cantabria, España) es una maravilla de la naturaleza y para preservar su uso sostenible, desde su apertura al público en 2006, ha tenido un seguimiento de sus parámetros medioambientales en tiempo real. Un proyecto novedoso fruto de la colaboración entre geólogos e ingenieros en Electrónica de la Universidad de Almería, ha desarrollado un sistema de telemonitorización en tiempo real específico, para la medición de parámetros ambientales en cuevas turísticas. El sistema registra temperatura, humedad relativa, concentración de CO<sub>2</sub>, presión atmosférica, velocidad del aire, presencia y paso de visitantes. Los datos se indexan en una base de datos interactiva. A lo largo de estos 15 años se han realizado estudios de la evolución de los parámetros medioambientales y ello ha permitido un uso sostenible de la cueva. La modificación del frágil microclima en el interior de la cueva puede dañar o destruir las formaciones geológicas específicas, algunas únicas en este lugar. El sistema también brinda una seguridad para los visitantes y los guías; por ejemplo, si se produjese una subida excesiva de la concentración de CO<sub>2</sub>, en alguna zona, los guías lo detectarían antes de hacer el recorrido, evitando así cualquier problema. Hasta la fecha, todos los parámetros se han mantenido dentro de rangos aceptables. Una cueva puede ser visitada mientras su microclima es mantenido dentro del rango cercano al estado prístino y los sistemas de monitorización son la herramienta para ello.

**Palabras clave:** cavidad turística, Cueva de El Soplao, parámetros medioambientales, telemonitorización.

## *El Soplao, 15 years telemonitored in real time*

### **Abstract**

*El Soplao Cave (Cantabria - Spain) is a wonder of nature and in order to preserve its sustainable use, since its opening to the public in 2006, its environmental parameters have been monitored in real time. A novel project, the result of collaboration between Geologists and Electronics Engineers from the University of Almería, has developed a specific real-time telemonitoring system for the measurement of environmental parameters in tourist caves. The system records temperature, relative humidity, CO<sub>2</sub> concentration, atmospheric pressure, air speed, presence and passage of visitors. The data is indexed in an interactive database. Throughout these 15 years, studies of the evolution of the environmental variables have been carried out and this has allowed for*

*a sustainable use of the Cave. Modification of the fragile microclimate inside the cave can damage or destroy the specific geological formations, some of which are unique to this site. The system also provides safety for visitors and guides, e.g. if there is an excessive rise in CO<sub>2</sub> concentration in any area, the guides will detect it before the tour in that area, thus avoiding any problems. To date, all parameters have been kept within acceptable ranges. A cave can be visited as long as its microclimate is kept within the range close to the pristine state and monitoring systems are the tool for this.*

**Keywords:** *El Soplao Cave, environmental parameters, telemonitoring, tourist cave.*

## Introducción

Las cuevas (y cavidades subterráneas) se han utilizado desde que los hombres tienen memoria con fines diferentes, como refugio para humanos o para animales, producción de alimentos como quesos o vinos entre otros, hasta su actual explotación como cavidades turísticas. En la actualidad las cavidades de interés turístico, han permitido la acuñación del término geoturismo. El geoturismo se centra en la geología y promueve la conservación de la geodiversidad y el aprendizaje de las ciencias de la tierra en las cuevas. El turismo geológico está en auge y tiene implicaciones socioeconómicas en las localidades donde se realiza, ya que este tipo de turismo implica a un bien natural, que hay que preservar de su destrucción, un desarrollo económico local a través de las empresas de servicios necesarias como transporte, alojamiento, explotación del bien natural, etc. (Buonincontri *et al.*, 2021). Todo estas implicaciones suponen que más de 100 millones de personas dependan de los ingresos directa o indirectamente de este geoturismo en el mundo (Cigna, 2016).

Las cuevas no sólo tienen interés turístico o recreativo, sino científico y cultural, ya que son un registro geológico preservado en el tiempo.

El interés de este turismo se fundamenta en formaciones geológicas, por lo general, únicas de la zona y que constituyen una maravilla de la naturaleza. El principal inconveniente es que estas formaciones se han formado a lo largo de los siglos en unas condiciones climáticas muy específicas y tanto algunos agentes externos como la presencia de los humanos pueden alterar fácilmente su equilibrio químico-físico y biológico, en determinadas ocasiones de forma irreversible (Addesso *et al.*, 2022). En definitiva, la influencia humana como agente externo dominante puede destruir en poco tiempo lo que la naturaleza ha tardado tanto tiempo en construir. Para evitar estas situaciones, hay una tendencia mundial en el sentido de aplicar criterios de sostenibilidad que mantengan estas formaciones en equilibrio medioambiental. Además, el turismo sostenible no sólo implica optimizar la explotación de los recursos ambientales para preservar el patrimonio natural y la biodiversidad, sino que se debe respetar la identidad y la autenticidad cultural de la comunidad anfitriona y garantizar condiciones socioeconómicas a largo plazo mediante los beneficios que producen (Haid y Albrecht, 2021). Los turistas ven como un bien la etiqueta de sostenible y actúa de reclamo publicitario.

En la sustentabilidad ambiental se pondera que el desarrollo turístico debe adaptarse al uso aceptable de los recursos naturales, mediante el respeto a la geodiversidad y a la biodiversidad. Esto es posible mediante la planificación de una forma de turismo que se preocupe por la protección, la preservación, pero también por la mejora del entorno natural de las cuevas, a través de un compromiso informativo y educativo con los turistas (Aly *et al.*, 2021). De esta forma, es posible implementar una estrategia de geoconservación en la que se integren intereses científicos, educativos y recreativos (Čech *et al.*, 2021). Algunos trabajos relacionados con la conservación de El Soplao (Calaforra *et al.*, 2011, Calaforra y Gázquez, 2017) y el cálculo de la visitabilidad a la cavidad (Guirado *et al.*, 2014) fueron la antesala de la importante monitorización ambiental en esta cavidad.

En este trabajo se presentan los resultados de un proyecto novedoso fruto de la colaboración entre geólogos e ingenieros en Electrónica de la Universidad de Almería, que ha dado lugar al desarrollo de un sistema de telemonitorización en tiempo real de la cueva turística de El Soplao, sita en Cantabria (norte de España) (Novas *et al.*, 2017). En la Cueva-Mina de El Soplao se registra temperatura, humedad relativa, concentración de CO<sub>2</sub>, presión atmosférica, velocidad del aire, presencia y paso de visitantes. Los datos se indexan en una base de datos interactiva. A lo largo de estos 15 años se ha realizado el estudio de la evolución de estos parámetros y ello ha permitido un uso sostenible de la cueva.

## Metodología

La Cueva-Mina El Soplao es una maravilla de la naturaleza que se encuentra en la Sierra de Arnero (Cantabria, norte de España). La cueva se extiende a lo largo de 22.600 m, con apenas 50 metros de variación de altitud, aunque la zona acondicionada para el turismo



Figura 1. Vista de la Sala de los Fantasmas, Cueva de El Soplao.

es de 1500 m. La longitud total del conjunto cueva-mina, incluidas las galerías mineras, es de aproximadamente 52.600 m (Hernández y Mora, 2016). En la figura 1 se observa la vista del sector habilitado al turismo, aunque dispone de más salas de igual o mayor belleza, que atrapa la atención de los miles de turistas que la visitan al año. En este apartado se describe la estructura del sistema, las técnicas de almacenamiento, sensorización y comunicación y finalmente las técnicas de procesado de datos y control del sistema.

### *Estructura del sistema*

En 2005 se establecieron cinco sitios de monitorización o estaciones en distintas zonas de la cueva que se encuentran en la ruta turística (figura 2) y donde se registra temperatura (T), humedad relativa (HR), concentración de CO<sub>2</sub>, velocidad y dirección del aire dentro de la cavidad, caudal de goteo, presión barométrica (BP) dentro de la cavidad y estimación del flujo de visitantes a las áreas próximas a las estaciones de medición. También se registra el paso de turistas en dos estaciones de medidas, al inicio de la ruta turística y otra al final de la visita en la cueva. El sistema registra los detalles del número de visitantes por año o por visita. También hay una estación meteorológica exterior para evaluar la correlación con el clima interior (figura 2, Estación M). La instrumentación de las estaciones 1, 2, 3 y V se instaló 1 m por encima del suelo de la cueva en cajas herméticas y cerca de la pared de la cueva. Las estaciones E y S (Entrada y Salida de visitantes) se instalaron camufladas a 20 cm por encima del suelo de la cueva en un estrechamiento de la calzada de entrada y salida (figura 2, estaciones E y S). La estación C o estación de Goteo recoge la cantidad de goteo de agua en la zona de la cueva que mayor filtración recibe. Mediante la contabilización del agua filtrada, la estación C nos ofrece información del tiempo que tarda en filtrarse el agua de lluvia en el interior de la cueva y también ofrece una correlación entre la totalización de una lluvia y la cantidad de agua filtrada en ese punto. En resumen, hay un total de 26 sensores a lo largo de la galería visitable, distribuidos en 8 estaciones (figura 2, estaciones 1, 2, 3, V, C, E, S y M) que están comunicadas y alimentadas a través de un cable especial, que discurre de forma oculta y que finaliza en una Estación Central de Control (figura 2).

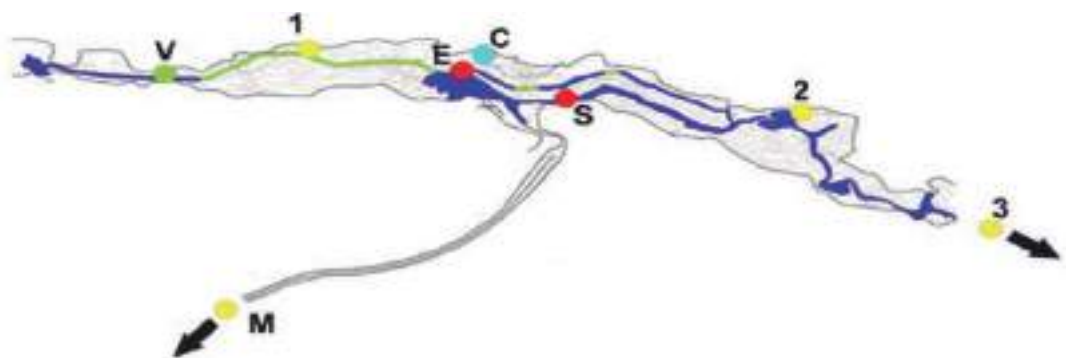


Figura 2. Estructura física de la Cueva del El Soplao.



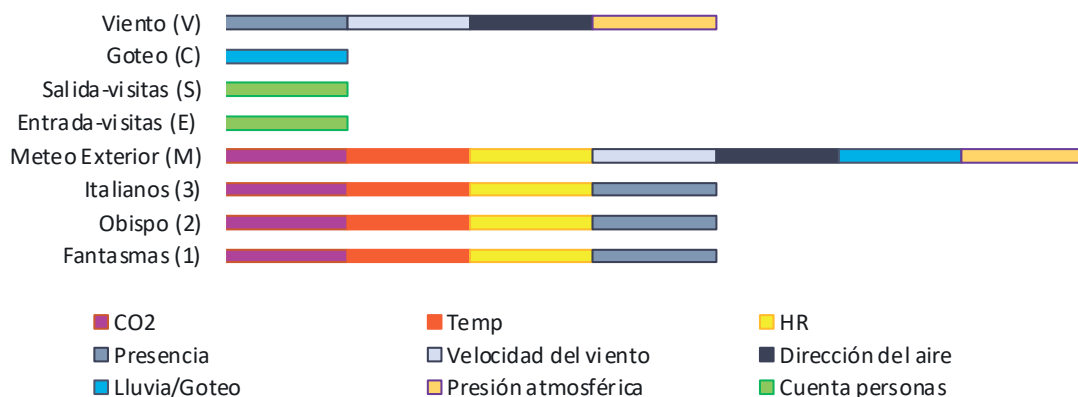


Figura 3. Distribución de sensores en las estaciones de medida de El Soplao.

El sistema tiene una arquitectura dinámica y extensible; ahora cuenta con un total de 26 sensores, 19 situados en el interior y 7 sensores en los alrededores externos de la cueva en la estación meteorológica donde se registra los mismos parámetros ambientales monitorizados en el interior de la cueva, lo que permite la comparación del clima interior y exterior. La figura 2 muestra en color verde y azul el área turística visitable de la cavidad y la distribución de los sensores en las estaciones de medición (estaciones remotas) se muestran en la figura 3. El cable especial de comunicaciones y electricidad recorre toda la galería. Este cable conecta todas las estaciones entre sí y con el centro de control (figura 4). En la zonavisitable de la

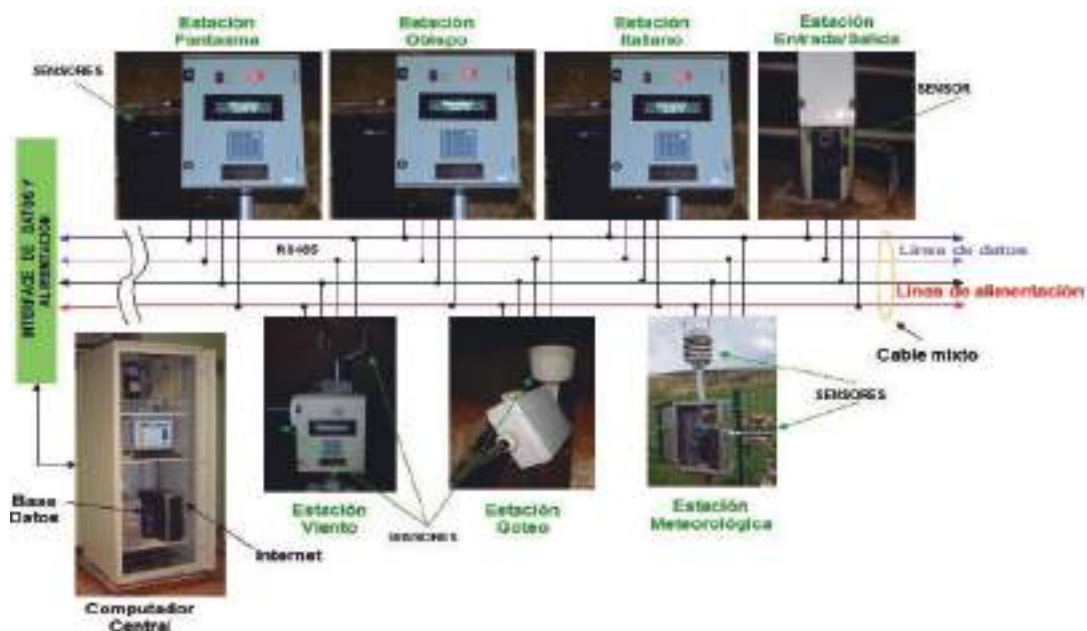


Figura 4. Arquitectura de comunicaciones de la estación central con las estaciones remotas.

cueva se ha instalado iluminación artificial de bajo impacto para preservar las condiciones bioclimáticas del interior.

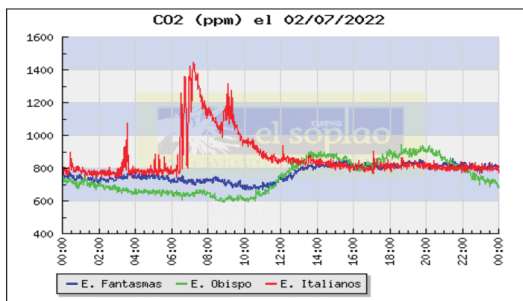
### Sensorización, almacenamiento y comunicación

La monitorización en cuevas tiene diversas tecnologías aplicables: desde dataloggers y sistemas cableados con almacenamiento local, hasta los sistemas más avanzados en tiempo real con almacenamiento distribuido y acceso ubicuo. Los sistemas inalámbricos dentro de las cuevas, no tiene demasiado alcance y como se trata de instalaciones fijas, necesitan cables de alimentación y por tanto el cable de comunicaciones no es un obstáculo adicional. Este último sistema es el que se optó implantar en El Soplao y supuso una novedad internacional (Hernández y Mora, 2016), (figura 4). El conjunto de datos procedentes de los sensores es registrado cada minuto, integrado en una base de datos MySQL y se pueden acceder remotamente y visualizar mediante una serie de representaciones gráficas y numéricas de la información recopilada en una estación central.

El sistema de telemetría de El Soplao fue diseñado e instalado por el grupo de investigación de Electrónica, Comunicaciones y Telemedicina "ECT" de la Universidad de Almería en colaboración con el grupo de Geología Ambiental también de la Universidad de Almería. Estos dos grupos habían realizado conjuntamente otros proyectos tecnológicos como como el Karst de Yesos (Gázquez et al., 2003). Este sistema está en funcionamiento desde 2006 (apertura al público). Actualmente, los ingenieros de ECT están a cargo del sistema de seguimiento técnico en colaboración con Turismo del Nansa (responsables de la conservación de la cueva). Los datos también están a disposición de los especialistas en geología (grupo de Geología Ambiental de la Universidad de Almería) junto con la dirección de El Soplao, para analizar su evolución y dotarlos de una herramienta que asegure una conservación óptima de la cavidad.

### Procesado de datos y control del sistema

La arquitectura y el motor de datos permiten un estudio dinámico del sistema y el desarrollo de aplicaciones de minería de datos para el estudio de la evolución de los parámetros. Ello permite tener una información exhaustiva y muy valiosa para poder ofrecer el mejor cuidado de la cavidad.



	A	B	C	D	E	F
1	Variable CO2	ppm				
2	Fecha	Hora	Meteorología	Fantasma	Obispo	Italianos
3	02-07-2022	00:00:00				
4	02-07-2022	00:01:00	471	764	737	794
5	02-07-2022	00:02:00	500	756	744	787
6	02-07-2022	00:03:00	497	771	717	804
7	02-07-2022	00:04:00	517	756	727	765
8	02-07-2022	00:05:00	511	759	725	784
9	02-07-2022	00:06:00	514	749	722	787
10	02-07-2022	00:07:00	503	747	737	804
11	02-07-2022	00:08:00	497	742	725	791
12	02-07-2022	00:09:00	506	749	717	765
13	02-07-2022	00:10:00	483	749	712	787
14	02-07-2022	00:11:00	503	749	712	794

Figura 5. Obtención de datos en formato gráfico y numérico (CO<sub>2</sub> del 2/07/2022).

Se pueden consultar datos por pantalla o descargarlos en diversos formatos: XLS, CSV, texto plano etc. Ello nos permite procesarlos directamente con herramientas como Excel o realizar procesados más complejos con aplicaciones como Matlab, un ejemplo se muestra en la figura 5. Mediante el procesado de los datos, se puede obtener información acerca de las tendencias climáticas dentro de la galería, detección de eventos que requieran un estudio más pormenorizado o realizar estudios comparativos con otras cavidades que posean sistema de monitorización.

El control del sistema se alimenta de los datos que se recogen y almacenan, y permite evaluar y programar elementos como la iluminación de la galería, la cual produce calor, el nivel de visitas o determinadas acciones de seguridad. Además, el sistema proporciona información de accesos no autorizados, que pueden alertar al servicio de seguridad.

## Resultados

Gracias a la completa bases de datos recopilada a lo largo de los últimos 15 años, se dispone de una información muy valiosa para el estudio de la evolución de la climatología de la cavidad y de posible influencia de factores externos en la misma.

Podemos estudiar mediante sensores situados en dos niveles diferentes de la Galería y una referencia comparativa, por medio de una estación meteorológica exterior, un enorme paquete de datos de Humedad Relativa, Temperatura, concentración de CO<sub>2</sub>, Presión Atmosférica, movimientos de aire y Conteo de visitantes en entrada y salida y detección de estos en las estaciones de medida.

### *Evolución de la humedad relativa*

La humedad relativa es un parámetro sensible a la presencia de personas en la cavidad, ya que el aire expirado es rico en vapor de agua, pero no es un parámetro determinante,



Figura 6. Evolución de la HR entre 2008 y 2022, relación con el número de visitantes.

ya que, de forma natural, las cavidades tienen una humedad relativa próxima a la saturación. La afluencia de agua es típico en cuevas y cavidades, y tanto mayor cuanto mayor tamaño y extensión tiene, factores como la filtración del terreno y la cercanía de acuíferos, favorecen este aspecto.

La figura 6 muestra la evolución de la Humedad Relativa en la cueva de El Soplao desde 2008 a 2022. Se puede observar que los valores son muy constantes, en todos estos años, en torno al 90% en las zonas de Fantasma y Obispo y del 95% en la zona de Italianos que está a un nivel inferior. La comparación con la humedad relativa exterior (Meteorología) y con la afluencia de visitantes, no aparenta tener correlación apreciable, a pesar de que, en la respiración, el aire exhalado contiene un 6% de vapor de agua.

### *Evolución de la temperatura*

La temperatura es también un parámetro sensible a la presencia humana. Es bien sabido, que de promedio una persona radia unos 100 vatios de potencia, lo que supone una energía de 180 Kjulios por persona y tiempo de visita (estimado en 30 minutos). Este factor no es nada despreciable, a pesar del gran tamaño de la galería, que necesitaría enormes cantidades de energía para elevar su temperatura. En los días de mayor afluencia de visitas, normalmente domingos y la mayoría de los días de agosto, puede haber hasta 2000 visitantes en un día.

La figura 7 presenta la evolución de la temperatura en tres zonas distintas de la cueva de El Soplao y la temperatura exterior, así como el número estimado de visitantes, desde 2008 al 2022. La curva de temperatura exterior presenta un comportamiento cíclico, con el máximo centrado en los meses de verano: julio y agosto, como es de esperar. La entrada de visitantes también tiene un comportamiento cíclico, con el máximo centrado en el mes de agosto, la temperatura de las zonas de la galería de Fantasma y Obispo, tienen una clara correlación en su máximo con el pico de visitas, que no siempre coincide en el mismo mes con el pico de temperatura externa. Luego como efecto inmediato, son las visitas y no la temperatura

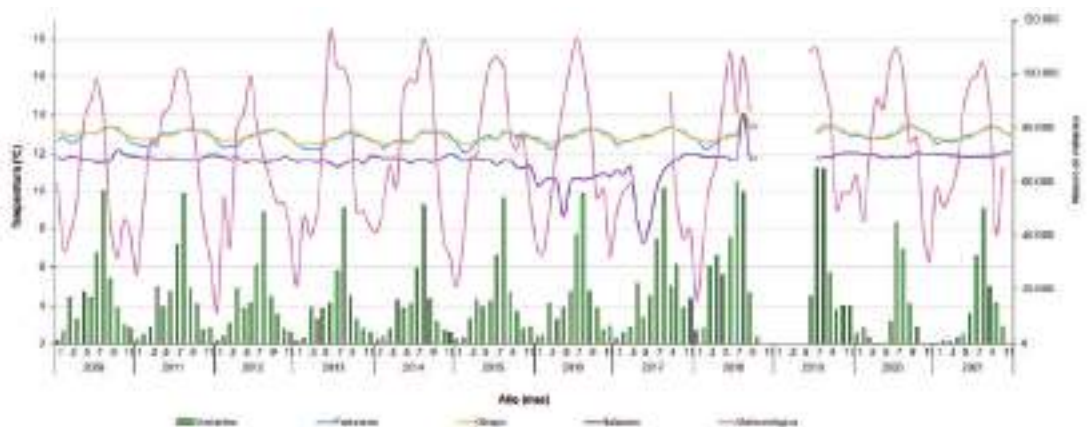


Figura 7. Evolución de la Temperatura entre 2008 y 2022, relación con el número de visitantes.

exterior, el factor más influyente en los cambios de temperatura de la cavidad. No obstante, al ser los sistemas térmicos, sistemas de orden 1, sin duda la temperatura ambiente actúa de forma retardada, colaborando a aumentar la temperatura hasta 30 días después de su pico. Se puede observar como en el año 2020, que por motivos de las restricciones derivadas de la pandemia del COVID-19, hay una más que sensible disminución de visitas, se sigue produciendo el pico de temperatura de  $13 \pm 0,5$  °C, con el mismo nivel que años anteriores.

En la zona de Italianos, un nivel inferior que Fantasmas y Obispo, la temperatura es mucho más constante y sobre  $1,3$  °C más fría. Aunque entre 2015 y 2018 se observan fenómenos de bajadas térmicas y también un pico, que tienen como explicación las corrientes de aire que se producen, al ser esta zona un sumidero de la galería hacia otras partes más profundas y con comunicación a la superficie.

### *Evolución del anhídrido carbónico*

El anhídrido carbónico, es sin duda un parámetro de vital importancia en el estudio de las galerías, primero porque un valor muy elevado de concentración de  $\text{CO}_2$  ( $> 8000$  ppm) puede ser nocivo para las personas que tengan problemas respiratorios o cardíacos, y en segundo lugar porque el  $\text{CO}_2$  es un factor que, en niveles elevados, puede influir en el deterioro de las cavidades.

La figura 8 presenta la evolución de la concentración de  $\text{CO}_2$  en la galería del El Soplao entre 2008 y 2022. El nivel de  $\text{CO}_2$  se mide en las zonas de Obispo y Fantasmas y en el nivel inferior de Italianos, como elementos de comparación se dispone de la concentración de  $\text{CO}_2$  externa y en un lugar ajeno a la contaminación del hombre y del número de visitantes. A la vista de la gráfica se observa una clara y potente dependencia de la concentración de  $\text{CO}_2$  con la entrada de visitantes. El aire exhalado de las personas contiene un promedio de 3,4%  $\text{CO}_2$  y se respiran unos 20 litros de aire por minuto de promedio; esto significa que una persona emite unos 20,5 litros de  $\text{CO}_2$  en un periodo de 30 minutos como duración

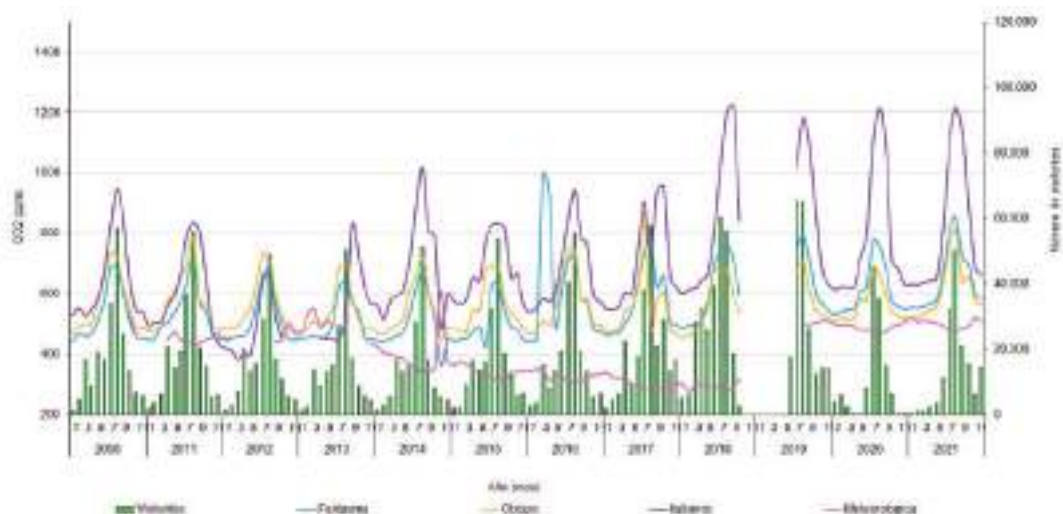


Figura 8. Evolución del  $\text{CO}_2$  entre 2008 y 2022, relación con el número de visitantes.

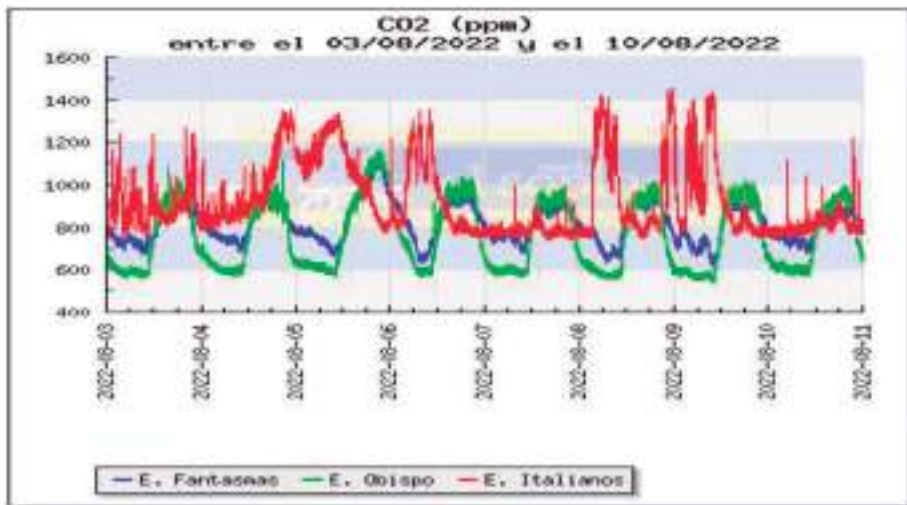


Figura 9. Evolución del CO<sub>2</sub> semanal, entre el 3 y el 10 de agosto de 2022.

típica de una visita. Los días de máxima afluencia, se vierten sobre 40 m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub>, o lo es lo mismo 80 kg de CO<sub>2</sub>, al tener este una densidad de unos 2 Kg/m<sup>3</sup>. Una cifra de 80 Kg de CO<sub>2</sub> en los días de máxima afluencia es un valor muy importante y sin duda es el factor que establece la concentración de CO<sub>2</sub> que se registra en la galería. La concentración de CO<sub>2</sub> exterior va oscilando entre 400 ppm y 500 ppm y es lo esperado en esta época y sus leves variaciones, no influyen en nada a las concentraciones interiores.

Las zonas de Obispo y Fantasma experimentan variaciones cíclicas diarias, tal como se aprecia en la figura 9, mientras que la concentración en la zona de Italianos, en nivel inferior, es más errática y con valor mucho más elevado. En cuando al promedio mensual de la Figura 8, las zonas de Italianos y Fantasma oscilan entre valores de 500 ppm y 700 ppm, claramente correlacionado con el número de visitantes, mientras que la zona de Italianos llega a alcanzar promedios mensuales de más de 1200 ppm. La explicación del comportamiento de la zona de Italianos se debe a dos factores:

1. La zona de Italianos, al ser de un nivel inferior, actúa como sumidero de CO<sub>2</sub>, que es más denso que el aire y recoge el exceso vertido por los visitantes, pasando de aquí a otras zonas de la galería, que tiene más de 20 km cartografiados.
2. Las corrientes de aire, que entran y salen de Italianos a otras zonas inferiores de la galería, alteran de manera rápida la concentración de CO<sub>2</sub>. Probablemente, el exceso de CO<sub>2</sub> que la zona de Italianos canaliza a otros lugares más distantes, donde queda en parte embolsado, puede retornar por efectos de los movimientos de aire y cambios de presión, produciendo aumentos súbitos de la concentración de CO<sub>2</sub> en dicha zona. Estos aumentos de CO<sub>2</sub> no correlacionados con visitas, apenas trascienden al nivel superior de Obispo y Fantasma. Los meses de 2020 de menor afluencia de visitantes debido las restricciones de la pandemia, Obispo y Fantasma denotan una reducción del pico de CO<sub>2</sub>, mientras que Italianos sigue presentando

picos de más 1200 ppm desde 2018 hasta la actualidad de 2022; el CO<sub>2</sub> acumulado en otros niveles inferiores puede tener la explicación.

3. Otra posibilidad puede ser debido a afloramiento naturales de CO<sub>2</sub> del subsuelo, hecho que ocurre en algunas cuevas (Gabrovšek y Dreybrodt, 2021).

## Discusión

Los entornos subterráneos naturales y artificiales, incluidas cuevas, asentamientos subterráneos, sitios de ciudades antiguas, catacumbas, minas y lugares sagrados del hipogeo, tienen un gran atractivo para los turistas debido a su valor ambiental y cultural (Zhang *et al.*, 2022). Pero la explotación turística de estos entornos se ve afectada modificando las condiciones ambientales de los micro o macro sistemas de la formación. Luego es necesario estudiar el impacto con la finalidad de preservarlo a lo largo del tiempo.

Los entornos subterráneos son patrimonios culturales muy distintos a los edificados en la superficie. La humedad relativa (HR) suele ser muy alta (85 % o superior) y estable, hay menor evaporación y las fuentes de sales atmosférica contribuyen solo en una cantidad menor (Zhang *et al.*, 2022). Los visitantes y personal de mantenimiento de estos entornos alteran la humedad relativa. Los gases, como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y el trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>), generalmente causan corrosión debido a la carbonatación y sulfatación bajo la acción del aire húmedo (Mammola *et al.*, 2022). Una HR excesivamente alta en el espacio subterráneo aumenta las actividades de los microorganismos subterráneos, como los mohos mohos (Cailhol *et al.*, 2020; Sanchez-Moral *et al.*, 2021). Por ello, el control de la humedad ambiental es particularmente importante para su preservación, manteniendo sus fluctuaciones dentro de un rango razonable.

Muchas de las cuevas turísticas están dentro de la lista de la UNESCO en los que el principio rector es proteger los bienes considerados únicos y universales para poder disfrutarlos y garantizar que este privilegio se transmita a las generaciones futuras (Buonincontri *et al.*, 2021). Los resultados del análisis de datos obtenidos a lo largo de 15 años en la Cueva-Mina de El Soplao muestran que mediante un control exhaustivo de los parámetros ambientales se puede mantener una explotación turística sin dañar las formaciones de su interior. Para ello es necesario planificar las visitas en función de las condiciones ambientales previas a la visita.

En otros lugares se han realizado estudios de la influencia de las visitas en cavidades turísticas mediante una red de sensores y su monitorización como forma de estudiar el comportamiento del microclima con las visitas como en el caso de estudio. En el estudio (Addesso *et al.*, 2022) se simuló la influencia del flujo del aire y su dispersión junto a las partículas de la respiración en la Cueva Pertosa-Auletta (Italia). Los resultados obtenidos proporcionaron las zonas más vulnerables y como poder planificar las visitas para evitar los ecosistemas más vulnerables durante la visita. Otro estudio utiliza la monitorización

del microclima en la cueva para predecir y gestionar el patrón de ventilación necesario para mejorar la ventilación de la cueva cuando hay personas en la cueva y evitar afectar negativamente a la colonia de luciérnagas que es el mayor atractivo turístico de la Cueva de Waitomo Glowworm (Nueva Zelanda) (Hendy *et al.*, 2022).

Otros autores exponen en sus conclusiones la necesidad de “Revisar las intervenciones técnicas en algunas cuevas, dada la fragilidad y vulnerabilidad del geosistema cavernario, con el fin de hacer un uso sostenible de estas áreas.” Como en el caso del estudio de 12 de estas cuevas, cinco de ellas pertenecen a la Lista del Patrimonio Mundial Natural de la UNESCO, situadas en el paisaje kárstico de la República Eslovaca en Europa Central (Čech *et al.*, 2021). Hasta el momento, el estudio técnico y geológico realizado y puesto en funcionamiento en la Cueva de El Soplao está ayudando correctamente para preservar la cueva en condiciones óptimas, aunque se revisan asiduamente con la finalidad de mejorarlo, a lo largo de estos años se ha mejorado el sistema de presentación de la información, la base de datos y los sistemas de calibración de los sensores.

## Conclusiones

La principal conclusión, es sin duda que la monitorización extensa de la cueva de El Soplao, nos proporciona una información muy valiosa para su conservación y su estudio. La segunda conclusión dice que el principal factor humano que actúa sobre la galería y altera de forma más significativa su equilibrio, es el CO<sub>2</sub>. 80 Kg de CO<sub>2</sub> vertidos cada día, los días de máxima afluencia, tienen un efecto más que considerable.

Si aún no se puede afirmar con certeza, si cabe la sospecha que importantes cantidades de CO<sub>2</sub> se embolsan en zonas más bajas que Italianos, ya fuera de la zona visitable de galería y parte de él, puede retornar en algunas ocasiones, debido a movimientos de aire o cambios de presión. Y como tercera conclusión, decimos que hasta ahora la salud de cueva de El Soplao es buena, en función del ritmo de visitantes, pero que no se descarta que en un futuro se deban restringir el número de visitas, si se llega a evidenciar una alteración persistente, de algún parámetro que así lo requiriese.

## Agradecimientos

Se agradece a la Consejería de Turismo de Cantabria por haber confiado en investigadores de la Universidad de Almería, la realización de este proyecto, también a la empresa Turismo del Nansa y Dirección del El Soplao que también año a año siguen contando con la Universidad de Almería para la conservación de este sistema de medida.

También agradecemos a la Junta de Andalucía, Universidad de Almería y CIAMBITAL, que a través de las ayudas al grupo de investigación TIC019, permiten dedicar más medios para investigar en la mejora de los sistemas de medida y en la interpretación de los informes medioambientales. Y por último nuestro sincero agradecimiento a José María Calaforra, por invitarnos a realizar el presente trabajo.



## Referencias

- Addesso, R., Pingaro, S., Bisceglia, B., Baldantoni, D. (2022). Sustainable Tourism and Conservation of Underground Ecosystems through Airflow and Particle Distribution Modeling. *Sustainability*, 14(13), 7979. <https://doi.org/10.3390/su14137979>.
- Aly, M. N., Hamid, N., Suharno, N. E., Kholis, N., Aroyandini, E. N. (2021). Community involvement and sustainable cave tourism development in tulungagung region. *Journal of Environmental Management and Tourism*, 12(2), 588–597. [https://doi.org/10.14505/jemt.v12.2\(50\).28](https://doi.org/10.14505/jemt.v12.2(50).28).
- Buonincontri, P., Micera, R., Murillo-Romero, M., Pianese, T. (2021). Where does sustainability stand in underground tourism? A literature review. *Sustainability (Switzerland)*, 13(22), 12745. <https://doi.org/10.3390/su132212745>.
- Cailhol, D., Ciadamidaro, L., Dupuy, D., Allegra, S., Girardot, F., Pfendler, S. (2020). Fungal and bacterial outbreak in the wine vinification area in the Saint-Marcel show cave. *Science of the Total Environment*, 733, 138756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138756>.
- Calaforra, J.M., Gázquez, F. (2017). *Conservación y espeleotemas "endémicos" de la cueva El Soplao*. 1er Congreso Científico Internacional de Cuevas y Minas "El Soplao", 203–221. Celis, Cantabria.
- Calaforra, J.M., Fernández-Cortés, A., Gázquez-Parra, J.A., Novas, N. (2011). Conservando la cueva de El Soplao para el futuro: control de parámetros ambientales. In: *El Soplao: una ventana a la ciencia subterránea*. El Soplao S. L y Conserjería de Cultura. Turismo y Deportes del Gobierno de Cantabria (ed.), 52–57.
- Čech, V., Chrástina, P., Gregorová, B., Hroněk, P., Klamár, R., Košová, V. (2021). Analysis of attendance and speleotourism potential of accessible caves in karst landscape of Slovakia. *Sustainability (Switzerland)*, 13(11), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su13115881>.
- Cigna, A. (2016). Tourism and show caves. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 60(2), 217–233. <https://doi.org/10.5038/1827-806x.29.1.1>.
- Gabrovšek, F., Dreybrodt, W. (2021). Early hypogenic carbonic acid speleogenesis in unconfined limestone aquifers by upwelling deep-seated waters with high CO<sub>2</sub> concentration: A modelling approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(5), 2895–2913. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2895-2021>.
- Gázquez, J. A., Calaforra, J. M., Novas, N., Fernández-Cortés, A. (2003). Intelligent telemetry watches cave visitors. *IEE Electronics Systems and Software*, 1(3), 24–27. <https://doi.org/10.1049/ess:20030304>.
- Guirado, E., Gázquez, F., Fernández-Cortés, Argumosa, A., Calaforra, J.M. (2014). Cálculo de la visitabilidad máxima en cavidades turísticas mediante el método Cavix: El Soplao (Cantabria). *Cuevatur*. Primer Congreso Iberoamericano y Quinto Congreso Español sobre Cuevas Turísticas, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), En: *Iberoamérica Subterránea* (J.M. Calaforra y J.J. Durán, eds.), 199–204. Aracena.
- Haid, M., Albrecht, J. N. (2021). Sustainable tourism product development: An application of product design concepts. *Sustainability (Switzerland)*, 13(14), 7957. <https://doi.org/10.3390/su13147957>.
- Hendy, C. H., Merritt, D. J., Corkill, S. (2022). Anthropogenic impacts on the Glowworm Cave, Waitomo, New Zealand: a microclimate management approach. *International Journal of Speleology*, 51(1), 59–68. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.51.1.2411>.
- Hernández, J. M., Mora, V. (2016). *NUEVOS DESCUBRIMIENTOS EN LA CUEVA DE EL SOPLAO*. 10, 58–73.
- Mammola, S., Meierhofer, M. B., Borges, P. A. V., Colado, R., Culver, D. C., Deharveng, L., Delgado, T., Di Lorenzo, T., Dražina, T., Ferreira, R. L., Fiasca, B., Fišer, C., Galassi, D. M. P., Garzoli, L., Gerovasileiou, V., Griebler, C., Halse, S., Howarth, F. G., Isaia, M., ... Cardoso, P. (2022). Towards evidence-based conservation of subterranean ecosystems. *Biological Reviews*, 97, 1476–1510. <https://doi.org/10.1111/brv.12851>.
- Novas, N., Gázquez, J. A., MacLennan, J., García, R. M., Fernández-Ros, M., Manzano-Agugliaro, F. (2017). A real-time underground environment monitoring system for sustainable tourism of caves. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2707–2721. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.005>.
- Sanchez-Moral, S., Jurado, V., Fernandez-Cortes, A., Cuezva, S., Martin-Pozas, T., Gonzalez-Pimentel, J. L., Ontañón, R., Saiz-Jimenez, C. (2021). Environment-driven control of fungi in subterranean ecosystems: the case of La Garma Cave (northern Spain). *International Microbiology*, 24(4), 573–591. <https://doi.org/10.1007/s10123-021-00193-x>.
- Zhang, J., Kwok, H. H. L., Luo, H., Tong, J. C. K., y Cheng, J. C. P. (2022). Automatic relative humidity optimization in underground heritage sites through ventilation system based on digital twins. *Building and Environment*, 216(January), 108999. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108999>.



## **Monitorización ambiental y dataciones preliminares de espeleotemas en la Cueva de los Órganos (Sierra de Mollina, Málaga)**

Fernando GÁZQUEZ SÁNCHEZ <sup>(1,2)</sup>, Ángel FERNÁNDEZ CORTÉS <sup>(1,2)</sup>, Lucía MARTEGANI <sup>(1,2)</sup>, Antonio GONZÁLEZ RAMÓN, Hu HSUN MING, Shen CHUAN CHOU, José María CALAFORRA CHORDI

<sup>(1)</sup> Grupo de Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Departamento de Biología y Geología. Universidad de Almería. f.gazquez@ual.es, acortes@ual.es lu.martegani@gmail.com, jmcalforra@ual.es

<sup>(2)</sup> Centro Andaluz de Evaluación y Seguimiento y del Cambio Global (CAESCG). Universidad de Almería.

<sup>(3)</sup> Instituto Geológico y Minero de España – CSIC, Granada. antonio.gonzalez@igme.es

<sup>(4)</sup> High-Precision Mass Spectrometry and Environmental Change Laboratory (HISPEC), Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan, ROC.  
hsunming.hu@gmail.com, river@ntu.edu.tw

---

### **Resumen**

Los espeleotemas se han convertido en una herramienta fundamental para estudiar el clima del pasado. Sin embargo, las reconstrucciones paleoclimáticas a partir de depósitos minerales de cuevas en el sur de la península Ibérica son todavía muy escasas. En este trabajo presentamos las primeras dataciones de espeleotemas holocenos de la Cueva de los Órganos (Sierra de Mollina, Málaga). Se han datado las bases y los ápices de 4 estalagmitas de aspecto relativamente reciente mediante el método de isótopos de uranio y torio. Además, los parámetros ambientales (humedad relativa, temperatura y CO<sub>2</sub>) de su atmósfera subterránea y la composición isotópica de su agua de goteo han sido monitorizados durante un ciclo anual, con el fin de conocer su funcionamiento hidroclimático. De las cuatro estalagmitas analizadas, solo una (ORG-8) presenta edades consistentes con su secuencia estratigráfica; es decir, su base es más antigua que su ápice (661±15 y 143±11 años antes del presente, respectivamente). El resto de estalagmitas analizadas parecen haberse visto afectadas por procesos de recristalización y apertura del sistema uranio-torio, por lo cual no podrán ser fechadas con este método. La atmósfera subterránea de la cavidad está bien ventilada, como sugieren las bajas concentraciones de CO<sub>2</sub> medidas durante todo el ciclo anual (<750 ppm). La temperatura de aire, humedad relativa y CO<sub>2</sub> disminuyen en invierno, mientras que alcanzan sus valores máximos en verano. Esto sugiere que la cavidad intercambia gases con el exterior durante el periodo frío, cuando la densidad del aire exterior es mayor que la de la atmósfera subterránea. Los resultados de la monitorización ambiental indican que la precipitación de carbonato en la cavidad podría ocurrir en desequilibrio isotópico, lo cual dificultaría las interpretaciones de los registros de δ<sup>18</sup>O y δ<sup>13</sup>C de la estalagmita ORG-8. No obstante, se podrían utilizar otros *proxies*, como la concentración de elementos traza, para reconstruir el clima en Andalucía durante los últimos 600 años a partir de esta estalagmita.

**Palabras clave:** dataciones, espeleotemas, monitorización ambiental.

## ***Environmental monitoring and preliminary dating of speleothems in Cueva de los Órganos (Sierra de Mollina, Málaga)***

### **Abstract**

*Speleothems provide a fundamental piece of information to investigate the climate of the past. However, paleoclimate reconstructions from cave deposits in the southern in Iberian Peninsula are still scarce. Here we investigate the chronology of Holocene speleothems from Cueva de los Órganos (Sierra de Mollina, Málaga). We analyzed the bases and the tops of 4 apparently recent stalagmites using the U-Th series method. In addition, we monitored environmental parameters in the cave atmosphere (relative humidity, temperature and CO<sub>2</sub>) and the isotopic composition of dripwater during an annual cycle, in order to determine the hydroclimatic functioning of the cave. Only one (ORG-8) of the four stalagmites investigated in study yielded consistent U-Th ages with no age reversals (661±15 and 143±11 yr BP). The rest of speleothems seem to have been affected by diagenesis because of recrystallization and U-Th leaching; thus, they cannot be dated using this method. The cave atmosphere is well ventilated, as suggested by low CO<sub>2</sub> content in air measured during the annual cycle (<750 ppm). The cave air temperature, relative humidity and CO<sub>2</sub> decrease in winter, while reach their highest values in summer. This suggests that the cave exchanges gases with the outside atmosphere during the colder season, when the density of the external atmosphere is higher than that of the in-cave atmosphere. The results of our environmental monitoring indicate that carbonate precipitation at present may not occur under isotopic equilibrium. This can hamper the interpretation of the δ<sup>18</sup>O and δ<sup>13</sup>C records from stalagmite ORG-8. However, other proxies, like trace elements, may be used in this stalagmite to reconstruct the climate of Andalusia over the past 600 years.*

**Keywords:** *Dating, environmental monitoring, speleothems.*

## **Introducción**

Los espeleotemas, y en particular las estalagmitas de carbonato cálcico, han proporcionado excelentes registros paleoclimáticos de ambientes continentales (Fairchild y Baker, 2012; Gázquez y Calaforra, 2016), debido a que en muchas ocasiones son capaces de capturar la respuesta de las cuevas al ambiente externo. Por ejemplo, la temperatura de las cuevas suele ser similar a la media de la temperatura anual en el entorno en el que se encuentra. Por otro lado, la tasa de goteo suele relacionarse con la cantidad de lluvia. En consecuencia, mediante el estudio de las pequeñas variaciones en las características químicas, mineralógicas y morfológicas de los espeleotemas, se puede obtener información relevante sobre las condiciones ambientales que predominaron en el momento de su precipitación (Fairchild y Baker, 2012; Gázquez y Calaforra, 2016).

De los varios parámetros que se pueden analizar en espeleotemas para obtener información paleoclimáticas, los isótopos estables de carbono y oxígeno (expresados como  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ , respectivamente, cuando son estandarizados con respecto a los patrones internacionales V-PDB y V-SMOW) son una pieza fundamental en paleoclimatología. Los isótopos estables pueden ofrecer información sobre la temperatura de la cavidad en el momento de formación del carbonato, así como sobre variaciones en la cantidad de lluvia o cambios en la vegetación sobre la cueva (Fairchild y Baker, 2012; Gázquez y Calaforra, 2016).

Una ventaja del uso de isótopos estables como herramienta paleoclimática es que en algunos casos permiten cuantificar cambios ambientales en el pasado. Sin embargo, para realizar una correcta interpretación de los resultados isotópicos de espeleotemas es fundamental monitorizar de forma exhaustiva los parámetros ambientales actuales en las cavidades, incluyendo sus oscilaciones térmicas, sus ciclos de ventilación y la variabilidad en la composición isotópica de sus aguas de goteo (Pérez-Mejía *et al.*, 2018).

Durante el Holoceno (últimos 11.700 años) la parte meridional de la Península Ibérica experimentó cambios climáticos significativos que quedaron registrados en sedimentos marinos y lacustres (García-Alix *et al.*, 2022). Sin embargo, los registros obtenidos a partir de espeleotemas durante este periodo en Andalucía son casi inexistentes y se reducen a un estudio petrográfico sobre una estalagmita de la Cueva de el Refugio (Málaga; Walczak *et al.*, 2015) y a un artículo más reciente sobre isótopos estables en una estalagmita de yeso del Karst en yesos de Sorbas (Almería; Gázquez *et al.*, 2020). Hasta la fecha no se han publicado resultados de isótopos estables de carbono y oxígeno en espeleotemas holocenos de cuevas andaluzas.

Para cubrir este vacío de información, en 2020 se comenzó a estudiar la Cueva de los Órganos (Sierra de Mollina, Málaga), con el fin de evaluar el potencial de sus espeleotemas recientes para investigar el clima del pasado. La cavidad está ubicada aproximadamente en el centro de Andalucía, a una cota relativamente baja (entre 652 y 520 m s.n.m). Los registros paleoclimáticos obtenidos a partir de los espeleotemas de la Cueva de los Órganos podrían ser fácilmente comparables con las secuencias sedimentarias de las lagunas de campiña andaluzas (García-Alix *et al.*, 2022) y aportarían información sobre el impacto del clima sobre las diversas civilizaciones que ocuparon el sur de la península Ibérica en los últimos milenios.

En este trabajo se presenta los primeros resultados de dataciones de espeleotemas holocenos de la Cueva de los Órganos. Para ellos se ha utilizado el método de series de isótopos de U y Th. Se discuten las inconsistencias en las edades obtenidas en las estalagmitas analizadas y las posibles causas de las mismas. Además, presentamos los resultados de la monitorización ambiental de la cavidad durante un ciclo anual. Ésta incluye mediciones de temperatura del aire, humedad relativa,  $\text{CO}_2$  y parámetros fisicoquímicos del agua de goteo (temperatura, pH y conductividad), así como sus isótopos estables de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) e hidrógeno ( $\delta^2\text{H}$ ).

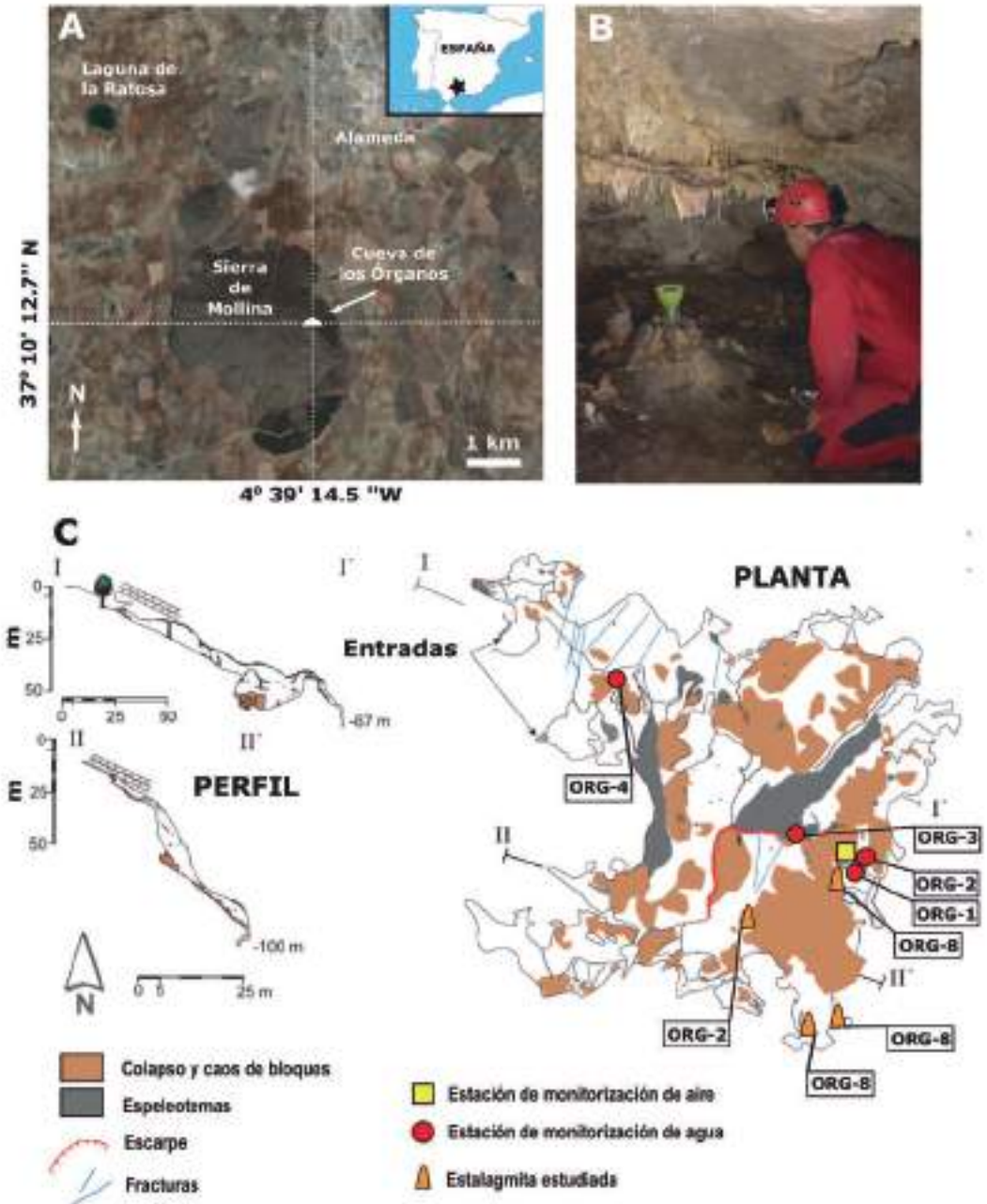


Figura 1. A. Ubicación de la Cueva de los Órganos; B. Colector de agua en la cueva (punto de muestreo ORG-2); C. Topografía de la Cueva de los Órganos, ubicación de las estaciones de monitorización de aire y muestreo de aguas y localización de los puntos de donde se tomaron los espeleotemas. Topografía realizada por el Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga (GES de la SEM).

## Entorno geológico y descripción de la cueva

La Cueva de los Órganos está ubicada en la Sierra de Mollina, en el sector occidental de la zona externa de la Cordillera Bética. La cavidad se desarrolla en dolomías y calizas del Jurásico (Martín-Algarra y Vera, 2004). Se pueden distinguir dos unidades de carbonatos: una basal constituida por dolomías de Jurásico inferior que dan lugar a zonas elevadas (sierras de Mollina, la Camorra, los Caballos y Estepa) y una superior del Jurásico medio y superior que consiste en calizas estratificadas con nódulos de sílex. La secuencia carbonática tiene una potencia máxima de 400 metros y fue depositada sobre unasecuencia triásica del Keuper, que consiste en una alternancia de arcillas rojas, yeso, anhidrita y halita conocida como "Trías de Antequera". La secuencia presenta signos evidentes de halocinesis y diapirismo salino (Calaforra y Pulido-Bosch, 1999). Calizas margosas del Mioceno medio fueron depositadas directamente sobre las evaporitas triásica y los carbonatos jurásicos. Estudios recientes sugieren que las etapas iniciales de desarrollo de la cueva estuvieron relacionadas con espeleogénesis hipogénica asociados a la producción de ácidos sulfurosos en profundidad en un acuífero confinado (González-Ramón *et al.*, 2021).

La Cueva de los Órganos presenta una entrada amplia situada en una dolina con forma elíptica de unas dimensiones aproximadas de 20x15 m. En general, la cavidad se desarrolla en dirección este, con suelos que presentan pendientes pronunciadas siguiendo el buzamiento de los estratos de carbonatos, alcanzando una profundidad máxima aproximada de 100 m desde la entrada (figura 1). La cueva alberga abundantes espeleotemas que incluyen coladas de varios metros de altura, estalagmitas y estalactitas, muchas de ellas con evidentes signos de corrosión lo cual sugiere una gran antigüedad, o que los procesos de corrosión-condensación han sido muy activos en la cueva. Por el contrario, las estalagmitas de aspecto reciente (ápices blancos y con goteo actual) son relativamente escasas.

## Materiales y métodos

### *Dataciones de espeleotemas mediante isótopos de U y Th*

Las cuatro estalagmitas (ORG-2, ORG-4, ORG-7 y ORG-8) estudiadas fueron tomadas en diciembre de 2020 de localizaciones ubicadas entre 60 y 100 m de profundidad (figura 1). El tamaño de los espeleotemas osciló entre 5 y 10 cm de altura y están constituidos por calcita, como revelan los análisis preliminares de difracción de rayos-X. Las estalagmitas fueron cortadas a lo largo de su eje principal de crecimiento y en general muestran laminación, aunque en algunas ocasiones también se aprecian oquedades que sugieren proceso de corrosión (figura 2). Se tomó una muestra de polvo de la base y el ápice de cada estalagmita con un talado Dremel provisto de una broca de 0.5 mm. En total 8 muestras de carbonato (~50 mg) fueron analizadas para isótopos de U y Th en el *High-precision mass spectrometry and environment change lab* (HISPEC) de la Universidad Nacional de Taiwán. El método de separación de isótopos de U y Th es el descrito en Edwards *et al.* (1987) y en Shen *et al.* (2012). Se utilizó un triple-spike ( $^{229}\text{Th}$ - $^{233}\text{U}$ - $^{236}\text{U}$ )

para evaluar los fraccionamientos isotópicos asociados al procedimiento analítico (Shen *et al.*, 2012). Las relaciones isotópicas se determinaron mediante un espectrómetro de masas con multicolectores acoplado a una fuente de plasma (MS-ICPMS), Thermo Fisher Neptune (Shen *et al.*, 2012). Los Detalles sobre los parámetros isotópicos utilizados para el cálculo de las edades se recogen en Gázquez *et al.* (2018). La incertidumbre de las relaciones isotópicas y las edades (tabla 1) vienen dadas como 2-desviaciones típicas de la media. Las edades se expresan en años antes de marzo de 2021, fecha en la que se analizaron las muestras.

ID	peso (mg)	<sup>238</sup> U (10 <sup>-9</sup> g/g <sup>o</sup> )	<sup>232</sup> Th (10 <sup>-12</sup> g/g)	<sup>234</sup> U medido <sup>o</sup>	[ <sup>230</sup> Th/ <sup>238</sup> U] actividad <sup>c</sup>	<sup>230</sup> Th/ <sup>232</sup> Th atómico (x10 <sup>-6</sup> )	Edad (años) sin corregir	Edad corregida (años) corregida	<sup>234</sup> U <sub>inicial</sub> corregido <sup>o</sup>
ORG-2- punta	55	301± 0.25	7693± 177	668± 1.4	0.15625± 0.00091	101± 2.4	10,659± 65	10,250± 211	687.5 ± 1.5
ORG-2- base	55	270± 0.23	269.8± 8.5	665± 1.6	0.00701± 0.00017	116± 4.6	460± 11	444± 14	666.3 ± 1.6
ORG-4- punta	54	762± 0.72	387300± 23035	330± 1.6	1.1203± 0.0042	37± 2.2	175,393± 1581	166,267± 5031	528.2 ± 7.8
ORG-4- base	54	220± 0.19	550.6± 8.7	849± 1.6	0.01734± 0.00030	114± 2.7	1,027± 18	991± 25	851.8 ± 1.6
ORG-7- punta	49	188± 0.17	281.3± 9.5	155± 1.5	0.00512± 0.00022	56± 3.0	485± 20	450± 27	155.3 ± 1.5
ORG-7- base	51	225± 0.18	185.5± 9.1	167.3± 1.4	0.00500± 0.00015	100.0± 5.8	468± 14	450± 17	167.5 ± 1.4
ORG-8- punta	52	238± 0.19	70.0± 8.8	284.4± 1.2	0.00175± 0.00013	98±14	149±11	143±11	284.1± 1.2
ORG-8- base	51	245±0.23	141.2± 8.5	334.5± 1.6	0.00821± 0.00016	235±15	673±13	661±15	335.1± 1.6

Tabla 1. Resultados de isótopos de U y Th y edades calculadas. La edad tiene de referencia la fecha de análisis (marzo de 2021). Ver Gázquez *et al.* (2018) para información adicional sobre el cálculo de las edades y los parámetros considerados.

## Monitorización ambiental

La temperatura, humedad relativa (HR) y concentración de CO<sub>2</sub> en el aire de la cavidad se monitorizaron entre el 26 de mayo de 2021 y el 1 de junio de 2022. La estación de monitorización ambiental en el interior de la cueva se instaló a 65 m de profundidad, en una pequeña sala de aproximadamente 15 de largo, 4 metros de ancho y 1.5 metros de altura, en la que se observaron varios puntos de goteo activos y algunas agrupaciones de espeleotemas de entre los cuales se tomó la estalagmita ORG-8 (figura 1).

Las medidas de temperatura y la humedad relativa (HR) del aire en el interior y exterior de la cueva se realizaron con micro-registradores TGP-4500 de Tinytag que tomaron datos cada hora, con una resolución <0,01°C y 0.1%, respectivamente. Para monitorizar la concentración de CO<sub>2</sub> se utilizó un *data logger* basado en la tecnología de infrarrojo no dispersivo (NDIR), con una precisión de ±5% y que registró datos cada hora.

Las características hidroquímicas del agua en la cueva se investigaron durante 6 visitas entre mayo de 2021 y junio de 2022, en cuatro goteos situados a distintas profundidades.



Dos puntos de goteo estuvieron situados a 65 m de profundidad (ORG-01 y ORG-2), en la misma sala donde se monitorizaron el resto de parámetros ambientales en continuo.

El goteo ORG-1 es el que generó la estalagmita ORG-8 que se ha datado en este estudio. También se estudió un punto de goteo a 45 m de profundidad (ORG-3) y otro a 30 m de profundidad (ORG-4) (figura 1). La temperatura y conductividad del agua se analizaron con una sonda Hanna (HI 9811-5), mientras que el pH se midió con un sensor Horiba LAQUAtwin PH-11 ( $\pm 0.1$ ). De cada punto de goteo se tomó una muestra de agua para su análisis isotópico. En el caso de los goteos ORG-01 y ORG-2 se tomó una muestra acumulada en un recipiente provisto con un embudo que se colocó de forma permanente debajo de los goteos investigados. En el caso de los goteos ORG-3 y ORG-4, las muestras de agua se tomaron de recipientes colocados durante cada visita a la cueva y que acumularon agua durante un tiempo aproximado de 2 horas.

Los isótopos estables ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) del agua de goteo se analizaron en el Laboratorio de isótopos estables de la Universidad de Almería mediante un analizador isotópico Picarro L2140i basado en la tecnología *Cavity ringdown spectroscopy* (CRDS). Los valores de las muestras fueron estandarizados con respecto al patrón internacional V-SMOW (*Vienna-Standard Mean Ocean Water*) y vienen dados en unidades por mil (‰). La precisión media para  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  fue de 0.05‰ y 0.25‰, respectivamente.

## Resultados y discusión

### *Dataciones de espeleotemas*

Las muestras de espeleotemas estudiadas presenta unas concentraciones de U que variaron entre 188 y 762 ppb, y en la mayoría de casos fueron  $< 300$  ppb. Por lo general, concentraciones bajas de U suelen dan lugar a edades con errores más elevados. Los errores en las edades obtenidas en las muestras de la Cueva de los Órganos oscilaron entre el 15% para las muestras más recientes y el 2% para muestras con edades más antiguas.

La relación  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ , que suele ser un indicador de la presencia de contaminación por arcillas en la muestra, oscilaron entre 37 y 235. La presencia de Th detrítico ( $^{232}\text{Th}$ ) en la muestra conlleva aplicar una corrección de la edad que consiste en asumir varias relaciones isotópica de U y Th en la corteza terrestre (Ludwig y Pace, 2002) (tabla 1). En todo caso, esta corrección es mayor cuanto menor es el cociente  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  y se hace menos significativa cuando el valor de esta relación es  $> 20$  (Shen *et al.*, 2012). En el caso de las estalagmitas estudiadas de la Cueva de los Órganos, la relación  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  fue superior a 20. La corrección por Th detrítico aplicada resultó en diferencias entre la edad corregida y sin corregir de entre el 4 y el 9%, por lo que se puede considerar que es poco significativa.

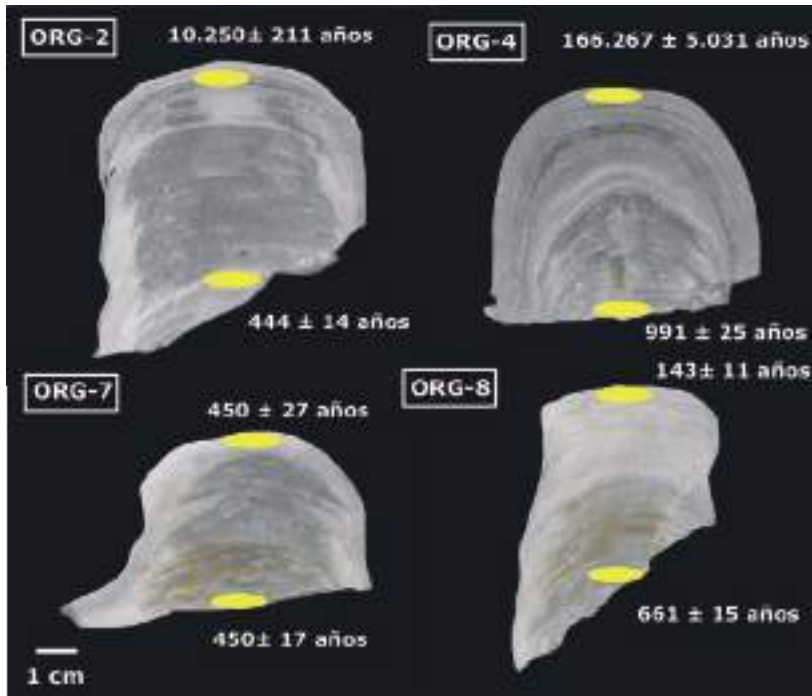


Figura 2. Sección longitudinal de las estalagmitas de la Cueva de los Órganos analizadas mediante el método de U-Th en este trabajo. Las muestras de polvo se tomaron de las zonas marcadas en amarillo. Se presentan las edades obtenidas.

A pesar de que la concentración de U en las muestras no es extremadamente baja y de que la contaminación por Th detrítico no parece ser significativa, las edades obtenidas en 3 de las 4 estalagmitas no se ajustan a la secuencia estratigráfica esperada (i.e. edades más antiguas en la base que en el ápice). Tan solo la estalagmita ORG-8 muestra edades más antiguas en su parte basal ( $661 \pm 15$  años) que en su parte apical ( $143 \pm 11$  años) (figura 2).

El resto de estalagmitas presentan edades muy dispares. En el caso de la estalagmita ORG-2, la edad de su base es  $444 \pm 14$  años, mientras que el resultado obtenido para su ápice es de  $10.250 \pm 211$  años. Una inversión de edades similar ocurre en la estalagmita ( $991 \pm 25$  años en la base y  $166.169 \pm 5031$  años en el ápice). Por último, la estalagmita ORG-7 muestra la misma edad en su base y en su ápice ( $450 \pm 17$  y  $450 \pm 17$  años, respectivamente). Es posible que la inversión de las edades se deba a una apertura del sistema U-Th debido a procesos de diagénesis por recristalización del carbonato, como se ha sugerido en la literatura para otros espeleotemas en los que se ha observado este tipo de inversiones (Richards y Dorale, 2003). En distintas partes de la cavidad se pueden apreciar superficies de espeleotemas corroídas. Esto sugiere que los procesos de condensación-corrosión han sido importantes, al menos durante algunas fases de la cavidad y podrían haber dado lugar a la recristalización de las láminas de calcita expuestas a la atmósfera de la cueva y a la apertura del sistema U-Th en las muestras analizadas. Un estudio petrográfico pormenorizado de estos espeleotemas podría confirmar esta hipótesis.

En resumen, de nuestro estudio preliminar de datación de espeleotemas en la Cueva de los Órganos se deduce que la única estalagmita analizada que presenta una cronología coherente y que podría ser estudiada en profundidad para obtener registros paleoclimáticos es la ORG-8. El resto de espeleotemas, en principio, se descartarían para análisis adicionales.

### Monitorización ambiental

Los espeleotemas estudiados se tomaron de zonas relativamente distantes de la entrada de la cavidad, en las que, a priori, el microclima se espera que haya sido más estable durante la precipitación del carbonato y en consecuencia haya estado menos afectado por variaciones estacionales. La estabilidad de la atmósfera subterránea y una HR elevada favorecen la precipitación de carbonato en equilibrio isotópico (Pérez-Mejía *et al.*, 2018).

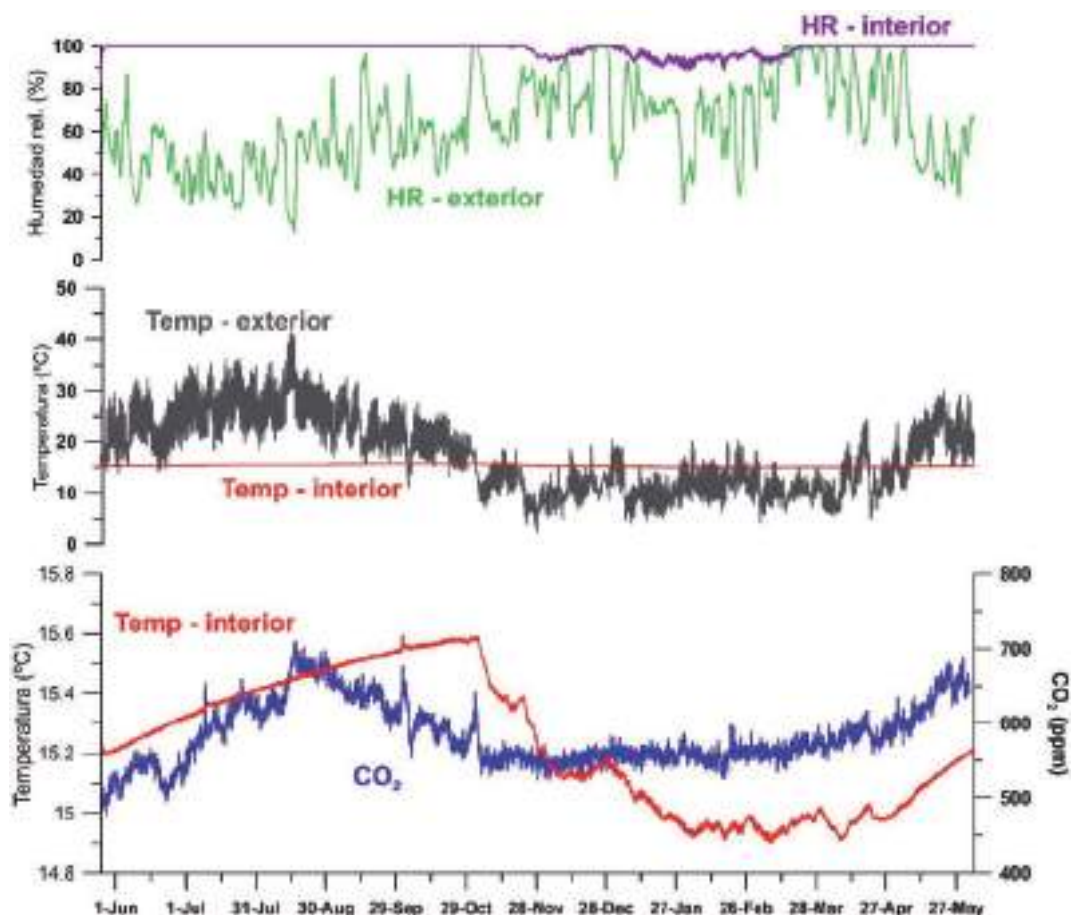


Figura 3. Monitorización ambiental del aire de la Cueva de los Órganos a 65 m de profundidad y de la atmósfera exterior entre mayo de 2021 y junio de 2022, incluyendo la temperatura y humedad relativa del aire y el contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de la cavidad.

La temperatura del aire en la sala investigada varió entre 14.90 y 15.59 °C, con valores mínimo entre febrero y abril y máximos noviembre, con una media anual de  $15.2 \pm 0.2$  °C. El máximo de temperatura en el exterior se alcanzó en julio (41.4 °C) y las mínimas ocurrieron entre diciembre y febrero (2.3 °C), con una media anual de  $17.3 \pm 7.3$  °C. La temperatura en el exterior comenzó a ser sistemáticamente inferior a la media de la cavidad en noviembre (figura 3). A partir de noviembre se comenzó a observar un descenso progresivo en la temperatura del aire de la cueva y una mayor variabilidad térmica, lo cual sugiere que la cavidad empieza a intercambiar aire activamente con el exterior a principios del otoño. Por el contrario, cuando la temperatura exterior comenzó a ser sistemáticamente superior a la de la cueva, a final de abril, la temperatura de la atmósfera subterránea empezó a ascender gradualmente, pero en este caso sin mostrar las oscilaciones a escala diaria y semanal observadas durante la fase de ventilación en otoño e invierno.

En cuanto a los valores de humedad relativa, el aire se mantuvo saturado (HR=100%) entre marzo y noviembre, mientras que la HR descendió hasta valores mínimo (82.9%) en febrero y se mantuvo, por lo general, por debajo del 100% entre noviembre y abril. En el exterior, la HR fue generalmente es más elevada entre otoño y primavera y disminuyó en verano. La concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de la cavidad alcanzó su máximo en agosto (740 ppm) y su mínimo (457 ppm) en noviembre. Posteriormente, entre noviembre y marzo se mantuvo relativamente constante (~550 ppm) y ascendió progresivamente a partir de abril, lo que corrobora la mayor intensidad la ventilación durante este periodo

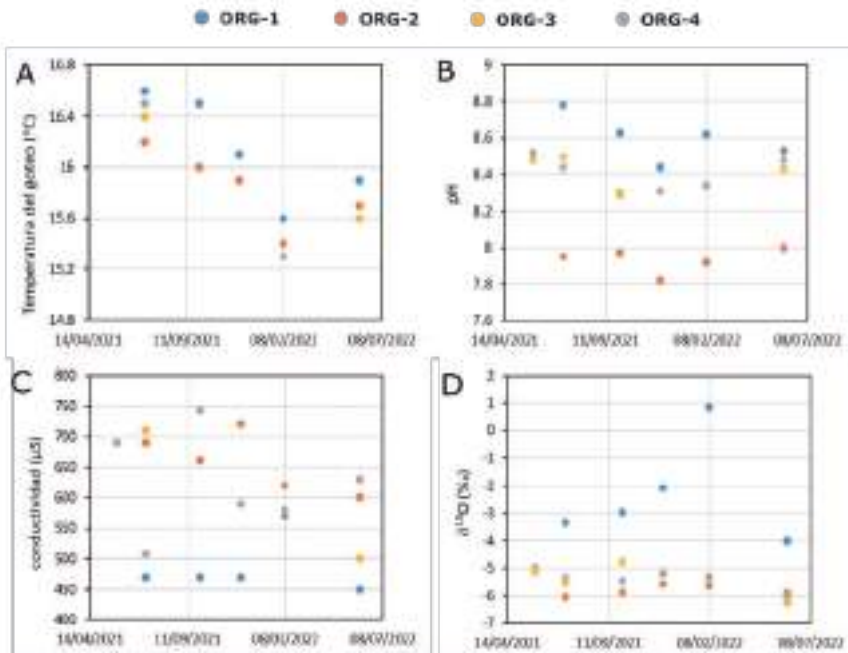


Figura 4. Monitorización de parámetros físico-químicos e isótopos estables ( $\delta^{18}\text{O}$ ) en el agua de goteo de la Cueva de los Órganos en el periodo comprendido entre mayo de 2021 y junio de 2022.

con entrada de aire más frío y seco desde el exterior. Estos valores son similares a los medidos en el exterior de la cavidad (~430 ppm) e indican un intercambio gaseoso activo entre la cavidad y el exterior, que se intensifica en otoño-invierno.

Tomando en consideración todos los parámetros estudiados, se puede concluir que la cavidad está bien ventilada y el grado de intercambio gaseoso con el exterior aumenta durante el periodo frío, cuando la temperatura en el exterior es más baja que en el interior y las masas de aire más frías y densas acceden a los niveles profundos de la cueva. Por el contrario, en el periodo cálido, el intercambio gaseoso se ve reducido, lo cual conlleva un aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la cavidad y un incremento gradual de la temperatura del aire.

La temperatura del agua de goteo varió menos de 0.4 °C entre los distintos puntos de descarga estudiados en la cueva y todos ellos mostraron las mismas tendencias a lo largo del ciclo anual, con valores más elevados en verano (hasta 16.2 °C) y mínimos en invierno (15.2°C), siguiendo un patrón parecido al de la temperatura del aire de la cueva. En todos los puntos de goteo el pH fue más bajo en el muestreo de diciembre de 2021 y más elevado en los muestreos de verano de 2021 y 2022. El goteo ORG-2 mostró valores de pH considerablemente inferiores (7.9±0.1) que el resto (8.5±0.1 de media). En cuanto a la conductividad eléctrica del agua, el goteo ORG-1 mostró valores más bajos (486±48 mS) que los demás goteos (647±90 mS de media). En el goteo ORG-1 la conductividad aumentó considerablemente (+21%) durante el invierno, mientras que el resto de goteos no mostraron un patrón estacional claro. Cabe destacar que el goteo ORG-1 tiene un caudal más bajo (<2 ml/día) durante todo el año que el resto de goteos y que el agua se recogió en un colector en el que estuvo expuesta a la atmósfera de la cavidad hasta que fue muestreada, a diferencia de los goteos ORG-3 y ORG-4 en los que el agua se tomó durante cada visita.

Los valores de δ<sup>18</sup>O y δD del goteo ORG-1 (-2.3±1.90‰, -13.3±12‰, respectivamente) difieren significativamente de los del resto de goteos (-5.53±0.43‰ y -36.4±2.6‰, respectivamente de media). La pendiente de la relación δ<sup>18</sup>O- δD de las aguas de goteo del punto ORG-1 es ligeramente inferior (6.3) a la de las lluvias en Andalucía central (7.0) (datos de la estación de Morón de la Frontera de la IAEA), lo cual indica que el agua pudo haberse evaporado en la cueva antes de que se tomara la muestra. El efecto de la evaporación fue especialmente significativo durante el periodo de ventilación en invierno, debido al ingreso continuo de aire frío y seco externo, provocando que se alcanzaran los valores máximos de δ<sup>18</sup>O y δD en el goteo ORG-1 (figura 4). Este hecho coincide con el incremento observado en la conductividad eléctrica del agua de este punto de descarga. El aumento de evaporación pudo estar relacionado con los valores de HR por debajo del 80% observados en invierno.

## Conclusiones

Nuestro estudio geocronológico preliminar de espeleotemas en la Cueva de los Órganos ha revelado serias dificultades para obtener edades fiables. De las cuatro estalagmitas

investigadas solo una de ellas presenta edades consistentes con su estratigrafía, mientras que el resto de espeleotemas parecen haberse visto afectados por procesos de recristalización y apertura del sistema U-Th. La estalagmita ORG-8 podría ser candidata para investigaciones paleoclimáticas futuras.

La monitorización de parámetros ambientales sugiere que la cavidad intercambia gases con el exterior de forma más activa durante el otoño e invierno, cuando la temperatura en superficie es inferior a la de la atmósfera subterránea. No obstante, los valores relativamente bajos de CO<sub>2</sub> observados durante todo el ciclo anual sugieren que la cueva está bien ventilada durante gran parte del año. La baja pCO<sub>2</sub> en la atmósfera de la cueva podría favorecer la desgasificación rápida de CO<sub>2</sub> procedente del agua de goteo, dando lugar a que el carbonato no precipite en equilibrio isotópico con el agua y la atmósfera. Por otro lado, la humedad relativa se mantiene sistemáticamente por debajo del 100% durante los meses de invierno, lo cual propicia que se produzcan procesos de evaporación de agua en el interior de la cueva (p. ej. goteo ORG-1) y también favorece que el carbonato no precipite en equilibrio isotópico. La rápida desgasificación de CO<sub>2</sub> y los procesos de evaporación podría dificultar las interpretaciones de futuros registros paleoclimáticos de isótopos estables obtenidos a partir de las estalagmitas estudiadas. No obstante, otros indicadores paleoclimáticos, como la concentración de elementos trazas en el carbonato de la estalagmita ORG-8, podría aportar información relevante sobre el clima del sur de la Península Ibérica durante los últimos 600 años.

## Agradecimientos

El presente trabajo ha sido financiado por el proyecto I+D+i PALEOQUANT (P18-RT-871) de la Junta de Andalucía, de la convocatoria de 2018. Fernando Gázquez agradece el contrato Ramón y Cajal (RYC2020-029811-I) del Ministerio de Ciencia y Competitividad de España durante el desarrollo de este estudio.

## Referencias

- Calaforra J.M., Pulido-Bosch, A. (1999). Gypsum karst features as evidence of diapiric processes in the Betic Cordillera, Southern Spain. *Geomorphology*, 29(3-4): 251–264. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00019-7).
- Edwards R.L., Chen J.H., Ku T.L., Wasserburg G.J. (1987). Precise timing of the last interglacial period from mass spectrometric determination of thorium-230 in corals. *Science* 236: 1547-1553. <https://doi.org/10.1126/science.236.4808.1547>.
- Fairchild I.J., Baker A. (2012). *Speleothem Science: From Process to Past Environments*. Wiley-BlackWell, 450 pp.
- García-Alix A., Jiménez-Moreno G., Gázquez F., Monedero-Contreras R., López-Avilés A., Jiménez-Espejo F., Rodríguez-Rodríguez M., Camuera J., Ramos-Román M.J., Scott, A. (2022). Climatic control on the Holocene hydrology of a playa-lake system in the western Mediterranean. *Catena*, 214: 106292. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106292>.
- Gázquez F., Calaforra J.M. (2016). Los espeleotemas: un archivo de información paleoambiental de los últimos millones de años. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 24(1): 42-50.
- Gázquez F., Columbu A., De Waele J., Breitenbach S.F., Huang C.-R., Shen C.C., Lu Y., Calaforra J.M., Vautravers M.J.M., Hodell D.A. (2018). Quantification of paleo-aquifer changes using clumped isotopes in subaqueous carbonate speleothems. *Chemical Geology*, 497: 246-257. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.046>.

- Gázquez F., Bauska T.K., Comas-Bru L., Calaforra J.M., Ghaleb B., Hodell, D.A. (2020). The potential of gypsum speleothems for paleoclimatology: Application to the Iberian Roman Humid Period. *Scientific Reports*, 10: 1470. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71679-3>.
- González-Ramón, A., Pedrera, A., Martos-Rosillo, S., de Cisneros, C. J., Ruiz-Constán, A., y Gázquez, F. (2021). Constraints on the evolution of sulfuric acid speleogenesis within carbonate rocks partially covered by evaporites (Sierra de Mollina, southern Spain). *Geomorphology*, 390: 107866. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107866>.
- Ludwig K.R., Paces J.B. (2002). Uranium-series dating of pedogenic silica and carbonate, Crater Flat, Nevada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66: 487-506. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00786-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00786-4).
- Martín-Algarra A., Vera J.A. (2004). La Cordillera Bética y las Baleares en el contexto del Mediterráneo Occidental. In: Vera, J.A. (ed.), *Geología de España*, SGE-IGME, Madrid, pp. 352–354.
- Pérez-Mejías C., Moreno A., Sancho C., Bartolomé M., Stoll H., Osácar M.C. (2018). Transference of Isotopic Signal from Rainfall to Dripwaters and Farmed Calcite in Mediterranean Semi-arid Karst. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 243: 66–98. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.09.014>.
- Richards D.A., Dorale J.A. (2003). Uranium-series chronology and environmental applications of speleothems. *Review in Mineralogy and Geochemistry*, 52: 407-460. <https://doi.org/10.2113/0520407>
- Shen C.-C., Wu C.C., Cheng H., Edwards R.L. et al. (2012). High-precision and high resolution carbonate <sup>230</sup>Th dating by MC-ICP-MS with SEM protocols. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 99: 71–86. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.09.018>.
- Walczak I. W., Baldini J. U.L., Baldini L. et al. (2015). Reconstructing high-resolution climate using CT scanning of unsectioned stalagmites: A case study identifying the mid-Holocene onset of the Mediterranean climate in southern Iberia. *Quaternary Science Reviews*, 127: 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.06.013>.





## Dos décadas de investigaciones científicas en la Geoda Gigante de Pulpí (Almería, SE España)

Fernando GÁZQUEZ SÁNCHEZ <sup>(1,2)</sup>, Ana MONTSERÍN LOSAS <sup>(1)</sup>, Lucía MARTEGANI <sup>(1,2)</sup>, Manuel GUERRERO MANZANO <sup>(1)</sup>, Ángel FERNÁNDEZ CORTÉS <sup>(1,2)</sup>, Javier GARCÍA GUINEA <sup>(3)</sup>, Fernando RULL PÉREZ <sup>(4)</sup>, José María CALAFORRA CHORDI <sup>(1,2)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo de Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Departamento de Biología y Geología. Universidad de Almería. f.gazquez@ual.es, monteserinana@hotmail.com, lu.martegani@gmail.com, j.manuguer@gmail.com, acortes@ual.es, jmcalforra@ual.es

<sup>(2)</sup> Centro Andaluz de Evaluación y Seguimiento y del Cambio Global (CAESCG). Universidad de Almería.

<sup>(3)</sup> Departamento de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales – CSIC, Madrid. guinea@mncn.csic.es

<sup>(4)</sup> Unidad Asociada UVA-CSIC al Centro de Astrobiología (ERICA). Universidad de Valladolid. rull@fmc.uva.es

---

### Resumen

La Geoda gigante de Pulpí es uno de los hallazgos mineralógicos internacionales más importantes de las últimas décadas. Sus cristales pinacoidales y prismas de yeso de excepcional pureza de hasta dos metros de longitud han despertado el interés tanto de la comunidad científica como del público general. En este trabajo se hace una revisión bibliográfica de los proyectos de investigación más importantes desarrollados en la Geoda gigante y en la Mina Rica desde su descubrimiento en 1999 y hasta la actualidad. Destacan los estudios sobre monitorización de parámetros ambientales en el interior de la Geoda, que se llevaron a cabo entre 2004 y 2005, y que permitieron adoptar las estrategias más adecuadas para su conservación y posterior habilitación como recurso turístico en 2019. Por otro lado, el proceso de formación de sus cristales gigantes ha motivado varios estudios científicos con el fin de conocer las características de los fluidos que la generaron. Los isótopos estables de oxígeno y azufre del yeso han permitido determinar el origen de los sulfatos para la formación de los cristales. La salinidad y temperatura de homogenización de las inclusiones fluidas micrométricas que alberga el yeso han revelado que se formó a partir de agua con una baja salinidad y a temperatura relativamente baja (entre 20 y 25 °C). Los estudios más recientes han utilizado isótopos radioactivos de uranio y torio para concluir que la Geoda comenzó a formarse al menos hace 165.000 años y que lo hizo a partir de agua de infiltración meteórica en el acuífero de la Sierra del Aguilón, tal y como revelan los isótopos estables del agua de hidratación del yeso. Algunas de las investigaciones actuales y futuras van dirigidas a emplear los datos isotópicos los cristales de yeso gigantes para reconstruir el clima del pasado en el sur de la península Ibérica.

**Palabras clave:** megacristales, geoda, selenita, yeso.

## **Two decades of scientific research in the Giant Geode of Pulpí (Almería, SE Spain)**

### **Abstract**

*The Giant gypsum geode of Pulpí is one of the most relevant mineralogical findings of the last decades. Its huge and extremely pure pinacoids crystals, and prisms up to 2 m long, have dragged the attention of the scientific community and the general public. Here we review the numerous scientific studies and project that has been conducted in the Giant Geode, from its discovery in 1999. Microclimate monitoring of environmental parameter inside the Geode were carried out between 2004 and 2005, in order to create a thoughtful strategy for the management and later touristic opening in 2019. In parallel, investigations about the formation mechanisms of the giant crystals have been addressed by several studies to know the characteristics of the fluids from which gypsum crystallized. The oxygen and sulfur stable isotopes of gypsum has allowed to identify the origin of the sulfates for the formation of the crystals. Also, the salinity and homogenization temperature of fluid inclusions in gypsum has revealed the crystals formed from a low-salinity aquifer at relatively low temperature (20-25 °C). The most recent investigations have used radioactive isotopes of uranium and thorium to assess the absolute age of the Geode, that have been dated at least in 165,000 years before present. Gypsum formed from meteoric water that infiltrated in the aquifer of Sierra del Aguilón, as revealed by the stable isotopes of gypsum hydration water. Some ongoing and future research projects are directed to evaluate the potential of the giant gypsum crystals for paleoclimate reconstructions in southern Iberia.*

**Keywords:** megacrystals, geode, gypsum, selenite.

## **Introducción**

La Geoda gigante de Pulpí (Pilar de Jaravía, Almería) es uno de los pocos ejemplos descritos de una cavidad cuyas paredes, techo y suelo están totalmente cubiertos por cristales pinacoidales de yeso selenítico ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), lo que la convierte en un elemento geológico único (Calaforra *et al.*, 2001; García-Guinea *et al.*, 2002) (figura 1). Desde su descubrimiento en diciembre de 1999 y debido a sus espectaculares características, la Geoda ha despertado el interés de científicos y visitantes. En agosto de 2019, la Mina Rica en la que se encuentra la Geoda fue abierta al público y en la actualidad es un importante recurso turístico del municipio de Pulpí. Cabe destacar que la Geoda gigante de Pulpí es la única de sus características visitable a escala mundial, a pesar de que existen otras cavidades naturales que también albergan cristales de yeso gigantes, como es el caso de la Cueva de los Cristales y la Cueva de las Espadas en las minas de Naica (Chihuahua, México) descubiertas en el año 2000, donde se encuentran los cristales de yeso de mayor tamaño descritos hasta la fecha (Gázquez *et al.*, 2016).



Figura 1. a) Vista panorámica del interior de la Geoda gigante de Pulpí (Almería). b) Imagen de los megacristales de yeso de la Geoda. c) Megacristales de yeso de la Mina Rica, donde además de yeso aparecen otros minerales como la celestina y la galena, ésta última explotada por su alto contenido en plata. d) Sala de explotación de mineral que conecta con el resto de las salas mediante las galerías y pozos de la mina. e) Nivel en el que se encuentra la Geoda antes de ser habilitada para el turismo (Fotografías en: Calaforra y Ferrer, 2017).

Durante las dos décadas posteriores a su descubrimiento y hasta su reciente habilitación turística, la Geoda ha sido objeto de diversos estudios, muchos de ellos destinados a evaluar el impacto de la entrada de visitantes en su estabilidad microclimática, y por consiguiente sobre sus frágiles cristales de yeso (Fernández-Cortés *et al.*, 2006a, b). Paralelamente, se han publicado algunos estudios que explican los procesos que condujeron a la formación de estos cristales, que en algunos casos alcanzan los dos metros de longitud (Calaforra *et al.*, 2001; García-Guinea *et al.*, 2002; Gázquez, 2012; Canals *et al.*, 2019; Gázquez *et al.*, 2022) (figura 1).

En este trabajo se hace una revisión bibliográfica sobre los estudios científicos más relevantes desarrollados en la Geoda de gigante de Pulpí y en la Mina Rica donde se encuentra (figura 2). Se resumen los principales hitos científicos en relación al origen de la Geoda. Además, se sintetizan los estudios sobre el microclima de la Geoda destinados

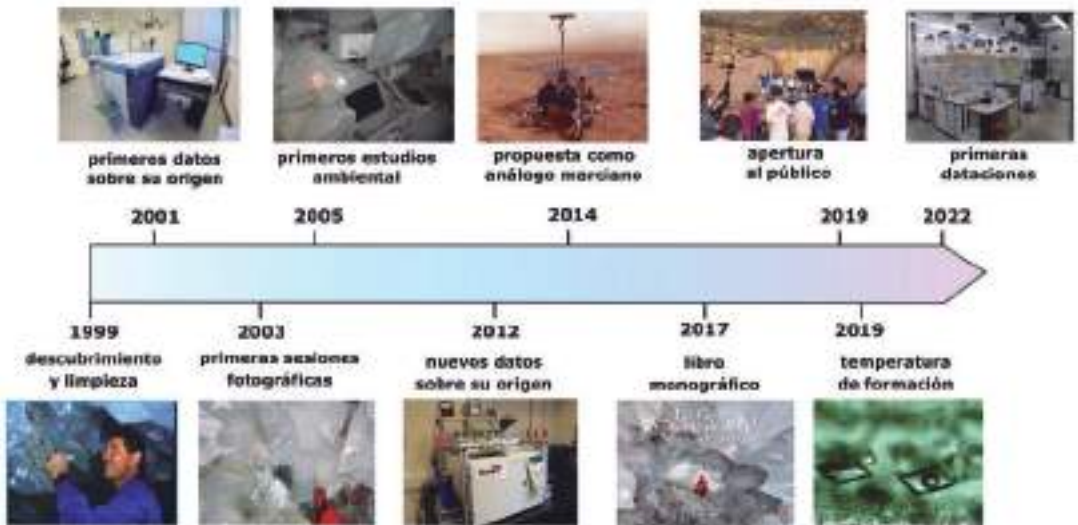


Figura 2. Línea temporal de los principales hitos relacionados con la Geoda gigante de Pulpí, desde su descubrimiento en 1999 hasta la actualidad (ver texto para detalles sobre algunos de los hitos).

a la conservación de los cristales. Estos trabajos previos han sido fundamentales para la posterior habilitación turística de la Geoda y de la mina, que se han convertido en los últimos años en un elemento fundamental de la oferta turística de la provincia de Almería y Andalucía.

## Entorno geológico y características de la geoda

La Geoda se ubica en la Mina Rica (concesión “Quien Tal Pensara”), cerca de la pedanía de Pilar de Jaravía, en el municipio de Pulpí (Almería). La mina fue abandonada en los años 60 y de ella se extraían principalmente hierro, plomo y plata, que se exportaban a Reino Unido y Alemania. Esta antigua explotación minera de Fe-Pb-Ag-Ba-Sb-Hg de Pilar de Jaravía se ubica en el complejo Alpujárride, situado en la Cordillera Bética (Morales-Ruano, 1994; Martínez Frías, 1998). En los 100 m más profundos de la secuencia estratigráfica, el yacimiento de Pilar de Jaravía cuenta con una alternancia de filitas y cuarcitas con intercalaciones de areniscas, calcoesquistos, yesos, brechas y milonitas, que configuran la parte inferior de las laderas de la Sierra del Aguilón. En los 50 m superiores, aparece una secuencia formada por calizas, dolomías y calcoesquistos del Triásico que configuran los crestos de la sierra. La Geoda gigante está ubicada a 97 m por encima de nivel del mar, encajada en las dolomías triásicas que forman parte de la Sierra del Aguilón (Calaforra *et al.*, 2001). Los eventos volcánicos que tuvieron lugar durante el Mioceno dieron lugar a las mineralizaciones de sulfuros y sulfatos que aparecen en el entorno de la mina (Martínez-Frías, 1998).

La Geoda ocupa  $10,7 \text{ m}^3$ , con 8 m longitud x 1,8 m anchura x 1,7m altura (Fernández-Cortés *et al.*, 2006a, b) y tiene una geometría aproximadamente elipsoidal, donde la parte más estrecha, en su boca de entrada, forma una L. La secuencia de mineralización del interior de la Geoda desde la roca caja al centro es de dolomía como roca encajante – siderita – oxi-hidróxidos de Fe y Mn – celestina y cristales de yeso (figura 3). Además de los cristales gigantes que conforman la Geoda, en la mina de Pilar de Jaravía aparecen abundantes mineralizaciones de galena (PbS), epsomita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), celestina ( $\text{SrSO}_4$ ), barita ( $\text{BaSO}_4$ ) y en menor medida de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), entre otros minerales.

## Descubrimiento y primeros estudios sobre su origen

La Sierra del Aguilón, donde se encuentran la Mina Rica y la Geoda, han sido objeto de explotación de minerales, especialmente plata, plomo y hierro, posiblemente desde la época romana. Sin embargo, fue a partir de la segunda mitad del siglo XIX y durante las primeras etapas de desarrollo de la actividad minera en la provincia de Almería, cuando el Pilar de Jaravía y en concreto la Mina Rica adquirieron relevancia económica. Inicialmente, la galena argentífera fue la mena de explotación principal hasta aproximadamente 1870, cuando se empezó a explotar también el hierro presente en la mina en forma de siderita y los oxihidróxidos ferrosos. A finales del siglo XIX, la explotación de hierro había desplazado casi por completo a la de la plata, cada vez menos abundante. La explotación

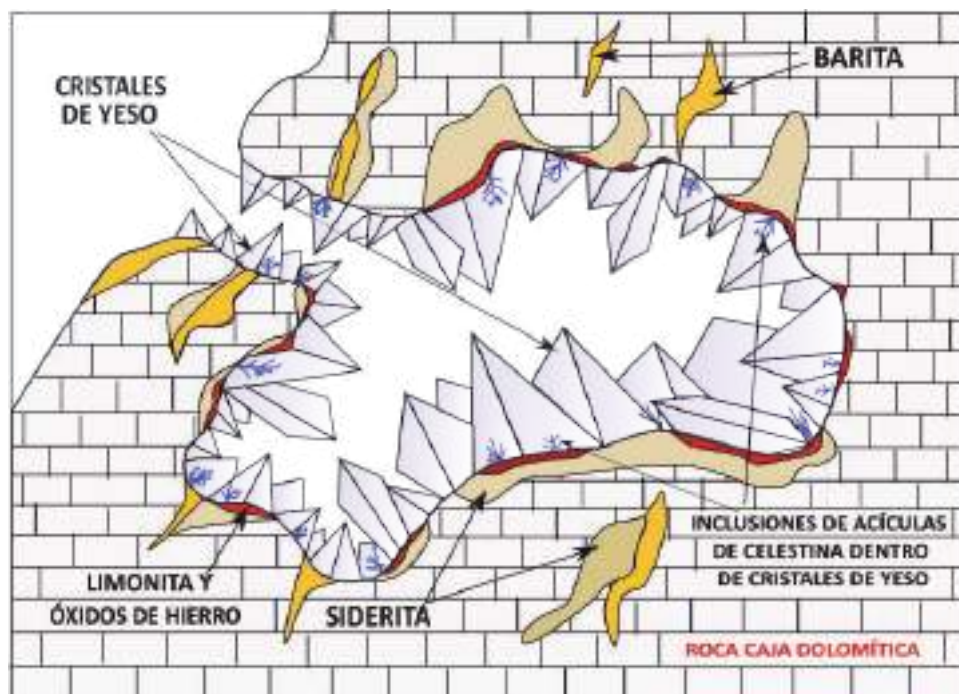


Figura 3. Secuencia de mineralización de la Geoda (modificado de Calaforra y Ferrer, 2017).

del plomo también fue perdiendo interés debido a la competencia de otros países. El declive de la minería en la Sierra del Aguilón continuó hasta la Guerra Civil española y progresivamente la explotación se fue abandonando hasta que en los años 60 del siglo XX ya se había paralizado por completo (Calaforra y Ferrer, 2017).

Además de su valor comercial debido a la extracción de metales, la Mina Rica era bien conocida entre los mineros por albergar cristales de yeso gigantes de gran transparencia, que en muchas ocasiones venían acompañados de bandas de celestina de hasta varios centímetros de espesor, a las que en el argot minero se conocían como "salbandas" (figura 1c). Las acículas de celestina aparecen en muchas ocasiones "fossilizadas" en el interior de la base de los cristales de yeso, lo cual indican que la celestina precipitó en una etapa de formación anterior a la del yeso. Esta concurrencia de los dos minerales intrincados es poco común, lo cual, junto con la importante riqueza mineralógica que posee la Mina Rica, convirtió a la Sierra del Aguilón en un lugar frecuentado por aficionados a la mineralogía y coleccionistas de minerales.

En 1999 un grupo de aficionados a la mineralogía pertenecientes a la Sociedad Mineralogista de Madrid, tras picar sobre una pared de la mina tapizada con una placa de yeso, descubrió la Geoda gigante. El hallazgo se puso inmediatamente en conocimiento de las autoridades, que blindaron el acceso a la mina con la instalación de una puerta en la bocamina principal para evitar el expolio y posibles daños irreparables en los cristales. Paralelamente, el Grupo de Investigación de Recursos Hídricos y Geología Ambiental de la Universidad de Almería, con una amplia experiencia en el estudio de cavidades de yeso en la provincia de Almería y otras partes del mundo, también fue informado del descubrimiento (Calaforra *et al.*, 2001). En los meses posteriores del año 2000 aparecieron las primeras notas informativas en prensa local y nacional sobre la Geoda gigante y al mismo tiempo comenzaron los trabajos de limpieza de los cristales, los cuales se encontraban cubiertos por el polvo generado por la propia apertura de su entrada y la expoliación de dos de sus cristales (figura 2).

Los estudios sobre la Geoda de Pulpí llevados a cabo en los primeros años del siglo XXI derivaron en un modelo genético preliminar ligado al ascenso de fluidos hidrotermales, directamente relacionados con el vulcanismo remanente regional de la zona. Según este modelo, los pulsos hidrotermales dieron lugar a la formación de depósitos de sulfatos de Ba y Sr, sulfuros, sulfosales, hidróxidos de Fe y Mn, que rellenaron discontinuidades de la roca encajante (dolomías). Las fases de formación de la Geoda de Pulpí se pueden sintetizar en cuatro según García-Guinea *et al.*, (2002), Gázquez *et al.* (2012) y Calaforra y Ferrer (2017) (figura 3):

**Primera:** karstificación de las dolomías triásicas en condiciones ácidas, debido a la presencia de ácido sulfúrico/sulfhídrico en el agua a alta temperatura.

**Segunda:** precipitación de siderita por sustitución de Ca y Mg por Fe en la roca de caja dolomítica y precipitación de óxidos-hidróxidos de hierro (limonita y goethita) en las paredes de las cavidades a temperaturas más bajas que en la etapa anterior.

**Tercera:** cristalización de celestina sobre los óxidos por oxidación de los sulfuros de la roca de caja.

**Cuarta:** enfriamiento gradual del sistema y precipitación lenta del yeso sobre la celestina formada en fases anteriores.

Este modelo genético preliminar sobre el origen de la Geoda se ha ido confirmado mediante estudios geoquímicos posteriores que han ido arrojando luz sobre los procesos de formación. En los meses posteriores a su descubrimiento, se tomaron algunas muestras de yeso de los materiales retirados de la entrada para estudios geoquímicos. Estas muestras fueron sometidas a análisis de isótopos estables de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ), azufre ( $\delta^{34}\text{S}$ ) e hidrógeno ( $\delta^2\text{H}$ ) y se estudió la salinidad de pequeñas burbujas de agua que quedaron atrapadas durante la formación del yeso, conocidas como inclusiones fluidas, mediante técnicas de microtermometría (García-Guinea *et al.*, 2001).

Los datos de inclusiones fluidas sugieren que el yeso precipitó de forma secuencial a partir de dos tipos de fluidos, pero en ambos casos con claro predominio de agua dulce y sin influencia de agua marina. En ambas fases la salinidad del agua estuvo por debajo de la esperada para agua de mar, como refleja la densidad de las inclusiones fluidas ( $0,8 - 0,9 \text{ gr/cm}^3$ ), inferior a la que correspondería a la del océano ( $1,02 \text{ gr/cm}^3$ ) (García-Guinea *et al.*, 2001). Esto sugiere que el agua que dio lugar a la Geoda, en su origen, fue de carácter meteórico y que tras su infiltración en el acuífero se fue cargando en sales. Sin embargo, debido a la proximidad a la línea de costa (actualmente 3 km) es muy probable que bajo el manto freático en el que se generó la geoda existiera una masa de agua con mayor salinidad y de origen marino a modo de cuña de intrusión, que en todo caso no afectó a la formación del yeso.

Con el fin de vislumbrar el origen de los sulfatos que dieron lugar a los yesos de la Geoda, García-Guinea *et al.* (2001) estudiaron sus isótopos estables. Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{34}\text{S}$  del sulfato se asemejan a la señal isotópica de los sulfatos de agua de mar, aunque con ciertos matices. Los resultados apuntan a que los sulfatos tuvieron en parte un origen marino. Sin embargo, el considerable empobrecimiento en isótopos pesados de azufre con respecto al valor esperado para el yeso marino apunta a que la oxidación de  $\text{H}_2\text{S}$  procedente del sistema hidrotermal y los sulfuros encajados en las dolomías, pudieron jugar un papel fundamental durante la precipitación del yeso de la Geoda.

Estudios posteriores sobre isótopos de estroncio en el yeso y la celestina de la mina y la Geoda mostraron que los valores de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  encontrada tanto en el yeso (0,710432) como en la celestina (0,710625) (Gázquez, 2012) es más elevada que lo que cabría esperar para yesos precipitados a partir de agua marina, que en ningún caso superan el valor de 0,7093 (Capo *et al.*, 1998). De este modo se confirmó que los aportes de agua meteórica durante la génesis de la Geoda fueron mucho más importantes que los que pudieran provenir de las infiltraciones de agua marina. En un estudio reciente sobre el origen de la Geoda se ha determinado su edad absoluta mediante el método de datación por isótopos radioactivos de uranio y torio (U-Th) (Gázquez *et al.*, 2022). El

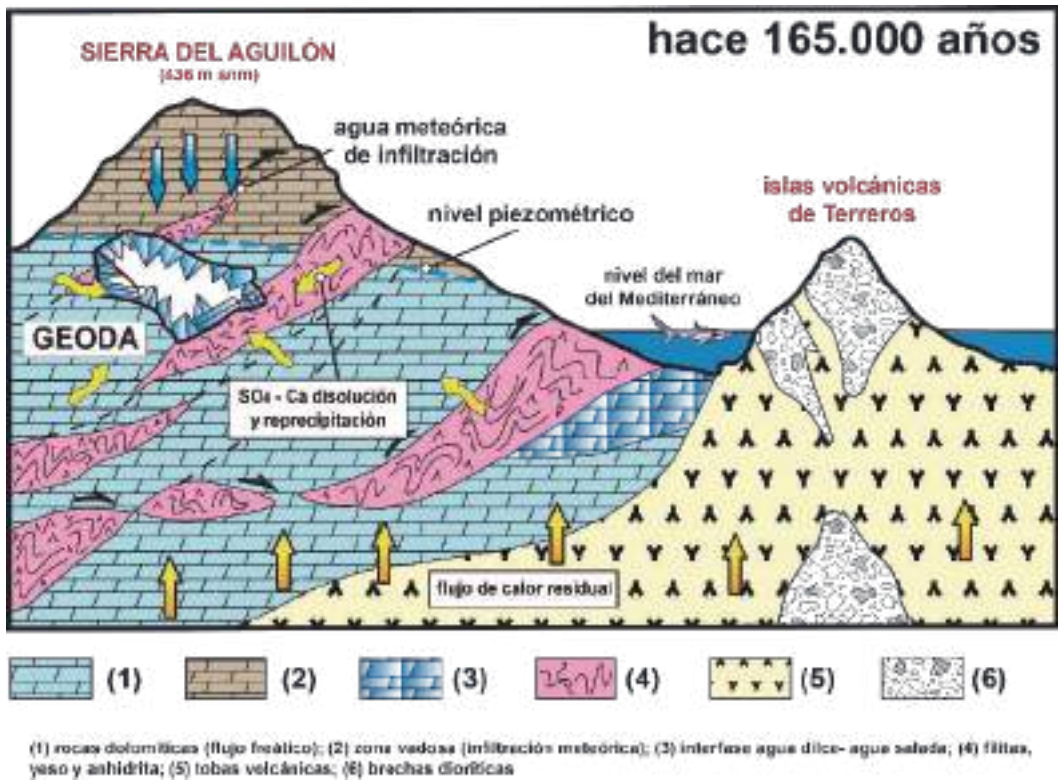


Figura 4. Esquema genético de la Geoda gigante de Pulpi en el contexto geológico de la Sierra del Aguilón. Los cristales de yeso se formaron bajo el agua del acuífero en condiciones extremadamente estables (modificado de Gázquez et al., 2022).

uranio se incorpora al yeso a partir del agua del acuífero y posteriormente comienza a desintegrarse para producir otros elementos más ligeros, como el torio. Analizando la concentración en el yeso de los isótopos de estos dos elementos se puede conocer la edad de formación del mineral. En el caso de los cristales de la Geoda, la concentración de uranio que presentan es extremadamente baja, por debajo de 10 partes por billón (ppb). Esto ha supuesto un reto a la hora de determinar cuándo se formó, ya que cuanto menor es la concentración de uranio en el material, menos precisa será la edad obtenida. A pesar de esta dificultad y gracias a un método analítico optimizado y desarrollado en la Universidad de Colonia (Alemania), se ha podido determinar que la Geoda comenzó a formarse al menos hace 165.000 años. El inicio de la cristalización del yeso en la Geoda coincide con un periodo relativamente frío y seco conocido como Etapa Isotópica Marina 6 (MIS 6 según sus siglas en inglés) durante el cual el nivel del Mar Mediterráneo estaba 60 m por debajo del actual (figura 4). En este estudio reciente, además de su edad, se ha determinado el origen del agua que dio lugar a los cristales de la Geoda mediante el análisis de isótopos estables de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) e hidrógeno ( $\delta^2\text{H}$ ) de las moléculas de agua que se encuentran asociadas al yeso. Los resultados vuelven a confirmar que la Geoda se formó a partir de agua de lluvia que se infiltraba en el acuífero y se carga en sales (sulfato y calcio) al entrar en contacto con los yesos y anhídritas triásicas de la



Sierra del Aguilón. El yeso comenzó a formarse en huecos y fracturas kárstificadas que estaban ocupadas por el agua subterránea, muy lentamente y en condiciones de alta estabilidad. La temperatura de formación fue probablemente mucho más baja (20-25°C) que, en las etapas de formación anteriores de precipitación de celestina, barita y siderita, como sugieren estudios recientes de inclusiones fluidas en el yeso (Canales *et al.*, 2019). En una fase mucho más reciente, el nivel del agua subterránea descendió y la Geoda y sus cristales quedaron definitivamente emergidos.

## Estrategias de conservación de la geoda

### Estudios microclimáticos preliminares

Al igual que en el caso de los espeleotemas carbonáticos, los espeleotemas de yeso pueden sufrir importantes daños irreversibles derivados de las actividades antrópicas. En el caso de los cristales de yeso, los efectos derivados de los procesos de condensación-disolución pueden tener mayores consecuencias que en los de carbonato, como resultado de la elevada solubilidad del yeso, en torno a 10 veces superior a la de la calcita.

En el caso de la Geoda gigante de Pulpí, los estudios preliminares de los parámetros microambientales de su atmósfera llevados a cabo entre los años 2004 y 2005 revelaron que la condensación de agua sobre los cristales es una de las principales amenazas para su conservación, lo cual ha supuesto un factor limitante para su puesta en valor como recurso turístico. La temperatura de la superficie de los cristales en condiciones naturales es aproximadamente de 19,4 °C, mientras que la del aire en el interior en las galerías mineras es de 19,2 °C. La humedad relativa en condiciones naturales es aproximadamente del 65% (figura 5; Fernández-Cortés *et al.*, 2006a, b).

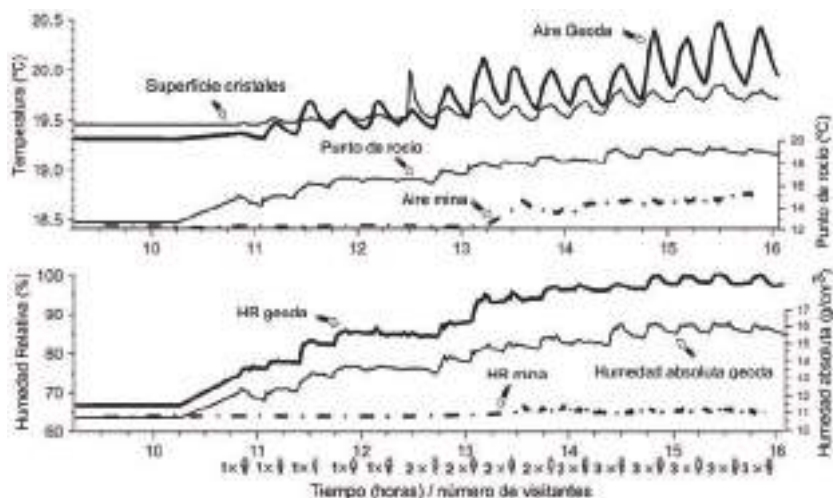


Figura 5. Monitorización de variables microclimáticas (humedad y temperatura del aire y temperatura de la superficie del yeso) en la Geoda gigante de Pulpí durante las experiencias de visitas controladas llevadas a cabo en 2004 y 2005 (modificado de Fernández-Cortés *et al.*, 2006a).

Las experiencias de entrada de visitantes llevadas a cabo en estos estudios previos pusieron de manifiesto que las visitas continuadas de grupos de dos o tres personas durante más de 10 minutos desencadenan fenómenos de condensación, con el consecuente deterioro de los cristales de yeso. Tras la entrada de 30 personas durante un periodo continuado de 16 horas, la temperatura del aire aumentó más de 1 °C, mientras que la de la superficie de los cristales aumentó en más de 0,3 °C. Paralelamente, la humedad relativa del aire aumentó hasta el 100% durante las 14 horas de entrada de visitantes (figura 5). El tiempo de recuperación de los parámetros microambientales a sus valores originales fue de más de 1 día tras la última visita. Estos estudios concluyeron que la puesta en valor de la Geoda de Pulpí como cavidad turística "tradicional", con entrada y permanencia de los visitantes en su interior, es inviable debido a los problemas de condensación de agua sobre los cristales de yeso (Fernández-Cortés *et al.*, 2006b).

### *Musealización de la mina y control ambiental*

En agosto de 2019 y después de varios años de trabajos de rehabilitación, la Mina Rica y la Geoda gigante fueron abiertas al público. Para ello se reforzaron galerías y se instalaron nuevas estructuras, que incluyen escaleras metálicas para conectar las galerías mineras superiores con el nivel donde se encuentra la Geoda. Además, se procedió a la musealización de la mina mediante la instalación de paneles informativos y exposición de elementos del patrimonio minero *in situ*, lo cual hace que el recorrido sea didáctico y atractivo para el visitante.

De las varias opciones que se plantearon para la visualización de la Geoda, se optó por la que *a priori* se consideró más compatible con la conservación de sus características originales y menos intrusiva. Para ello se instaló una plataforma metálica a la altura del acceso a la cavidad y una escalera adaptada de 3 peldaños que permite al visitante introducir parte del cuerpo en su interior. La Geoda está provista de un sistema de iluminación con temporizador que es controlado por los guías de las visitas y que se enciende para cada visitante durante un máximo de 45 segundos. Además, en su interior y en la zona aledaña se instalaron sensores de monitorización ambiental (humedad relativa, punto de rocío, temperatura, concentración de gas radón y CO<sub>2</sub>) que miden los parámetros cada 10 minutos (Calaforra *et al.*, 2022). La mayoría de sensores están conectados a una red wifi que permite que los datos se puedan visualizar *online* en un ordenador instalado en la galería minera a pocos metros de la Geoda. Además, se puede acceder mediante internet a los datos desde ordenadores externos a través de una aplicación de acceso remoto.

Las mediciones de parámetros ambientales que se han venido llevando a cabo desde la apertura de la Geoda sugieren que el régimen de visitas actual tiene un impacto muy limitado sobre las características microclimáticas de la cavidad, con aumentos de temperatura diarios que no suelen superar 1°C y una humedad relativa que no suele alcanzar el 80%. Por lo tanto, en condiciones normales, no sería esperable que se produzca condensación sobre los cristales de yeso. No obstante, el enjambre de monitorización *online* previamente descrito está diseñado como sistema de alarma que permite evaluar

en tiempo real las condiciones climáticas en el interior de la Geoda y, por lo tanto, podrá ayudar en el futuro a rediseñar el plan de visitas si fuera necesario, con el fin de preservar la integridad de los cristales.

## **Algunas investigaciones en desarrollo y estudios futuros**

Algunos trabajos científicos en desarrollo relacionados con la Geoda tienen como objetivo profundizar en las líneas de investigación citadas anteriormente. La obtención de edades más precisas pasa por una mejora en los procedimientos de purificación del yeso y separación de los isótopos de uranio y torio, lo cual permitirá analizar muestras con concentraciones de uranio extremadamente bajas. Un mejor conocimiento de las edades del yeso de la mina permitirá hacer una reconstrucción de la historia paleohidrológica del acuífero de la Sierra del Aguilón usando los isótopos estables del agua de hidratación del yeso (Gázquez *et al.*, 2022).

Además de yeso, la Mina Rica alberga otros minerales hidratados como son la epsomita y la hexahidrita (sulfatos hidratados de magnesio) y la jarosita ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), un sulfato hidratado de hierro que aparece en algunos sistemas hidrotermales. Cabe destacar que la presencia de jarosita en Marte se considera una evidencia de que la superficie de Marte estuvo ocupada por agua líquida en el pasado. Estudios preliminares han aplicado técnicas espectroscópicas, ya utilizadas para estudiar la superficie Marte (espectroscopia Raman y de Infrarrojo y LIBS), con el fin de determinar la estructura de los minerales hidratados de la Mina Rica (Gázquez *et al.*, 2014). Los autores de este trabajo propusieron la Mina Rica como un lugar de interés para investigar los procesos de formación de minerales hidrotermales, en particular con relación a las investigaciones sobre la geología de Marte. Se prevé que estudios futuros profundicen en las características espectroscópicas y geoquímicas de estos minerales y sus similitudes con las de los minerales encontrados en Marte.

Finalmente, de forma paralela a la monitorización ambiental de los parámetros ambientales convencionales que ya se lleva a cabo en la Geoda, en los próximos años se prestará especial atención a amenazas potenciales relacionadas con su uso turístico, como pudiera ser el aumento de la concentración de aerosoles en la atmósfera de la Geoda que podría repercutir en la acumulación de partículas sobre la superficie de los cristales.

## **Agradecimientos**

Este trabajo ha sido financiado a través del proyecto PALEOQUANT (PY18-871) de la Conserjería de Economía, Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía y el Proyecto de transferencia de conocimiento UAL-Transfiere (LUMMIN) de la Universidad de Almería. El doctor Fernando Gázquez agradece el Contrato Ramón y Cajal (RYC2020-029811-I) del Ministerio de Ciencia e Innovación de España. Los autores agradecen la labor de los

muchos compañeros que han colaborado en los trabajos de investigación de la Mina Rica. Agradecemos la colaboración de D. Manuel Guerrero, integrante del grupo de mineralogistas que descubrió la Geoda y a Víctor Ferrer las fotografías cedidas para ilustrar este trabajo. El Espeleoclub Almería (ECA) ha prestado una ayuda fundamental durante los más de veinte años de estudios en la Geoda. El Ayuntamiento de Pulpí y los trabajadores de la mina turística, en especial a Milagros Carretero y Jesús Morillas, que han facilitado enormemente los trabajos de investigación realizados en los últimos años.

## Referencias

- Calaforra, J.M., Moreno, R., García-Guinea, J., Guerrero, M., Romero, A. (2001). La geoda gigante de Pulpí (The giant Geode of Pulpí): Patrimonio geológico y minero. *Medio Ambiente*. 37: 42–43.
- Calaforra, J.M., Ferrer, V. (2017). La Geoda Gigante de Pulpí. Pilar de Jaravía (Almería). *Diputación de Almería* (ed.). 78 pp. ISBN:9788494172588.
- Calaforra, J.M., Carretero, M., Martegani, L., Gázquez, F., Fernández-Cortés, A. (2022). Evaluación dosimétrica por exposición a gas radón en la Mina Rica – Geoda de Pulpí (Almería). En: J.M. Calaforra y J.J. Durán (eds.), *Minas y Cuevas: Patrimonio Geológico y Turístico*. VIII Congreso Español sobre Cuevas y Minas Turísticas. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. Pulpí (Almería).
- García-Guinea, J., Morales, S., Delgado, A., Recio, C., Calaforra, J.M. (2002). Formation of gigantic gypsum crystals. *Journal of the Geological Society of London*, 159: 347–350. <https://doi.org/10.1144/0016-764902-001>.
- Calaforra, J.M., Gázquez, F., Guerrero, M., García-Guinea, J., Fernández-Cortés, A. (2019). La geoda gigante de Pulpí. Un hito en la conservación y puesta en valor del patrimonio geológico y minero. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 27(2): 221– 226.
- Canals, A., Van Driessche, A.E.S., Palero, F., García-Ruiz, J.M. (2019). The origin of large gypsum crystals in the Geode of Pulpí (Almería, Spain). *Geology*, 47(12): 1161-1165. <https://doi.org/10.1130/G46734.1>.
- Capo, R.C., Stewart, B.W., Chadwick, O.A. (1998). Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: Theory and methods. *Geoderma*, 82: 197–225. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00102-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00102-X).
- Fernández-Cortés, A., Calaforra, J. M., Sánchez-Martos, F., Gisbert, J. (2006a). Microclimate processes characterization of the giant geode of Pulpí (Almería, Spain): technical criteria for conservation. *International Journal of Climatology*, 26(5): 691-706. <https://doi.org/10.1002/joc.1269>.
- Fernández-Cortés, Á., Calaforra, J. M., García-Guinea, J. (2006b). The Pulpí gigantic geode (Almería, Spain): geology, metal pollution, microclimatology, and conservation. *Environmental Geology*, 50(5): 707-716. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0243-z>.
- Gázquez, F. (2012). Registros paleoambientales a partir de espeleotemas yesíferos y carbonáticos. Tesis doctoral. *Universidad de Almería*. Spain, 381 pp.
- Gázquez, F., Rull F, Calaforra J.M, Venegas G., Manrique J.M. Sanz A., Medina J., Catalá-Espí A., Sansano A., Navarro R., Forti P, De Waele J., Martínez-Frías J. (2014). Caracterización mineralógica y geoquímica de minerales hidratados de ambientes subterráneos: implicaciones para la exploración planetaria. *Estudios Geológicos*, 70(2): e009. <https://doi.org/10.3989/egool.41688.314>.
- Gázquez, F., Montaserin, A., Obert, C., Münker, C., Fernández-Cortés, Á., Calaforra, J.M. (2022). The Absolute Age and Origin of the Giant Gypsum Geode of Pulpí (Almería, SE Spain). *Geosciences*, 12: 144. <https://doi.org/10.3390/geosciences12040144>.
- Martínez-Frías, J. (1998). An ancient Ba–Sb–Ag–Fe–Hg bearing hydrothermal system in SE Spain. *Episodes*, 21: 248–251. <https://dx.doi.org/10.18814/epiugs/1998/v21i4/006>.
- Morales-Ruano, S. (1994). Mineralogía, geoquímica y metalogénia de los yacimientos hidrotermales del SE de España (Águilas-Sierra Almagrera) (Mineralogy, geo-chemistry and metalgenesis of hydrothermal outcrops in SE Spain, Águilas-Sierra Almagrera). Tesis doctoral. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Universidad de Granada*, Granada.

## **Cuevas inducidas por deslizamientos: tipologías identificadas en el SE de la Cordillera Bética (S de España)**

Antonio GONZÁLEZ RAMÓN <sup>(1)</sup>, Rosa María MATEOS RUÍZ <sup>(1)</sup>, Concepción JIMÉNEZ DE CISNEROS VENCELÁ <sup>(2)</sup>, Marian ALONSO MARTÍNEZ <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Geológico y Minero de España - CSIC. Urb. Alcázar del Genil, 4. Edf. Zulema bajo. Granada. antonio.gonzalez@igme.es, rm.mateos@igme.es

<sup>(2)</sup> Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-UGR, Avd. de las Palmeras 4, 18100 Armilla, Granada. concepcion.cisneros@csic.es

<sup>(3)</sup> Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst - SEDECK, C/ Alenza 1, 28003 Madrid. alonso.mariam@gmail.com

---

### **Resumen**

En la parte sureste de la Cordillera Bética (S de España) se conocen numerosas cavidades relacionadas con deslizamientos antiguos de gran escala. La mayoría de estas cuevas, generadas en grietas e inducidas por la gravedad, se encuentran en el Dominio Alpujárride, donde potentes formaciones de rocas competentes, calizas y dolomías triásicas, se superponen a materiales más blandos correspondientes a filitas. Los tipos de cuevas identificados y analizados responden a diferentes morfologías, que están controladas por el tipo de movimiento de la masa, la etapa de progresión del deslizamiento y su posición dentro del cuerpo del deslizamiento. Se han determinado tres tipologías diferentes de estas cuevas, teniendo en cuenta sus diferentes fases de evolución y sus características morfológicas y específicas, alcanzando algunas de ellas desarrollos superiores a 1 km de longitud y profundidades de hasta 164 m. Los espeleotemas que aparecen, generalmente coladas parietales con edades que superan los 500 ka, son archivos continentales muy importantes para los estudios paleoclimáticos de la región y para la caracterización de muchos otros factores que controlan la dinámica de las laderas.

**Palabras clave:** Carbonatos alpujárrides, comarca de los Vélez, Cordillera Bética, cuevas gravitacionales, paleodeslizamientos.

### ***Landslide-induced caves: typologies identified in the SE of the Betic Cordillera (S Spain)***

#### **Abstract**

*Numerous gravitationally induced caves have been identified and analyzed in the Southeastern part of the Betic Range (SE Spain) related to Palaeolandslides in the region. Most of these crevice caves are located in the Alpujarride Domain, where thick slabs of competent rock, triassic limestone and dolostone, overlying softer materials corresponding to phyllites. The identified crevice caves have different morphologies which are controlled by the type of mass- movement, the stage of landslide progression and their position within the landslide body. Three different typologies of these caves have*

*been determined on the region taking into account their different phases of evolution and their morphological and specific characteristics, some of the caves having passages up to 1 km in length and depths up to 164 m. The speleothems that appear, generally parietal flowstones with ages that exceed 500 ka, are very important continental archives for palaeoclimatic studies in the region and many other factors that control the slope dynamics.*

**Keywords:** *Betic range, carbonate rocks, crevice-caves, palaeolandslide.*

## Introducción

Los movimientos de masas de rocas rígidas activados por la gravedad pueden generar cavidades de importancia, asociadas a las grietas formadas como consecuencia de esos movimientos. Esto puede ocurrir cuando una formación rocosa rígida se superpone a una formación blanda que puede presentar plasticidad, especialmente durante etapas climáticas húmedas, y cuando existen fuertes pendientes donde la erosión puede actuar sobre la formación blanda infrayacente. Dentro del Complejo Alpujárride en la Cordillera Bética, se dan las condiciones perfectas para que estos fenómenos puedan ocurrir. Las formaciones que constituyen este dominio dan lugar a gruesos paquetes de carbonatos (generalmente dolomíticos) con un sustrato formado por filitas, ambos de edad triásica o permo-triásica. El Alpujárride aflora recubriendo los bordes del núcleo central de la Zona Interna de la Cordillera Bética, formado por el Complejo Nevado-Filábride, donde se encuentran los relieves más elevados de la Península Ibérica. Esto implica la existencia de fuertes pendientes que frecuentemente afectan a laderas formadas por filitas de gran plasticidad, a las que se superponen las dolomías alpujárrides. Se dan pues las condiciones ideales para que puedan haberse generado estos movimientos gravitacionales.

En el N de la provincia de Almería, en la zona comprendida entre la Comarca de los Vélez y la comarca del Almanzora, se han estudiado tres zonas donde aparecen grupos de cavidades asociadas a grandes paleodeslizamientos muy antiguos y generadas en carbonatos alpujárrides. Aunque las tres zonas responden a un modelo genético similar, presentan tipologías diferentes. Otra particularidad a resaltar es que nos encontramos en una zona semiárida, con escasa vegetación, lo que favorece la observación de estas morfologías y su conservación durante largos periodos de tiempo. Las precipitaciones medias anuales actuales son del orden de 300-350 mm.

Las cuevas generadas por deslizamientos han sido tratadas en numerosos trabajos realizados en los Cárpatos (Vitek, 1983; Selft, 1990; Margielewski *et al.*, 2010; Bella y Gaál, 2013 y otros), incluyéndolas dentro del concepto de pseudokarst y definiéndolas como *crevice caves*.

Según los citados autores, las *crevice caves* se forman por movimientos de gravedad que involucran bloques rígidos en la parte superior con materiales plásticos subyacentes y lechos blandos en las laderas. Son cuevas desarrolladas por el ensanchamiento de fracturas (dilatación) a lo largo de las superficies de discontinuidad dentro de macizos rocosos

(diaclasas, fallas) debido a la descarga de esfuerzos cortantes. Se pueden distinguir varios tipos de movimientos en masa, principalmente extensión lateral y deslizamientos. Las *crevice caves* podrían formarse durante la etapa inicial de los movimientos en masa o contribuir al desarrollo de sucesivas generaciones de ellos, hasta la destrucción del macizo rocoso debido al movimiento gravitatorio de sus fragmentos (Margielewski y Urban, 2003). Lyakhnitsky y Khlebalin (2006) dan otras definiciones, como cavidades gravitatorias y de deslizamiento, e incluso como karst de deslizamiento: formación de cavidades en el campo de una fisura que separa el bloque de deslizamiento del lecho rocoso como resultado de los movimientos gravitatorios (Vdovets, 2006).

Existe una carencia en la literatura respecto a las cuevas formadas por deslizamientos en España, a pesar de la notable extensión de las formaciones kársticas en el país. Las primeras referencias se remontan a Alfaro *et al.* (2006) y Delgado *et al.* (2011) que relacionan el origen de las simas de Partagat (Sierra de Aitana, Levante de España) con procesos de expansión lateral en un macizo calizo de edad terciaria. Otros trabajos en la parte sureste de la Cordillera Bética (González-Ramón, 2009, 2014; González-Ramón y Mateos, 2013; González-Ramón *et al.*, 2013) hacen referencia al origen gravitacional de numerosas cuevas desarrolladas en los carbonatos alpujárrides. Estos estudios previos son el punto de partida del presente trabajo, que tiene en cuenta la descripción previa de las cuevas. En esos trabajos han sido denominadas como cuevas gravitacionales, cuya definición incluye aspectos genéticos y esta denominación es la que se mantiene en este trabajo.

## Contexto geológico

El relieve de la Cordillera Bética, situada en la parte más occidental de la cadena alpina, se produce por la interacción de pliegues y fallas que acomodan la convergencia N-S a NO-SE entre las placas euroasiática y africana (DeMets *et al.*, 1990). En la cordillera se pueden distinguir varios dominios, en base a rasgos litológicos y tectonometamórficos: la Zona Interna, formada principalmente por tres grandes complejos que incluyen rocas metamórficas, algunas de ellas de edad Paleozoica (complejos Nevado-Filábride, Alpujárride y Maláguide); las Unidades Flysch, que son rocas sedimentarias detríticas del Terciario, representadas principalmente en la Bética occidental y la Zona Externa, constituida esencialmente por rocas sedimentarias mesozoicas y cenozoicas.

El corredor del Almanzora es una depresión alargada de E-O (35 km de largo y 6 km de ancho medio) situada en la parte oriental de la cordillera Bética. El límite norte de la cuenca es la Sierra de las Estancias (s.l.) que la separa del Corredor de Chirivel (figura 1). La Sierra de las Estancias se divide en varias sierras menores, de E a O: Sierra de las Estancias (s.e.), Sierra del Saliente, Sierra del Oria y otras. La sierra se estructura en un gran pliegue vergente al sur, que tiene una orientación que cambia de ENE-OSO, en el sector oriental, a E-O en su extremo occidental. Afloran fallas de orientación NE-SE en toda la cuenca y en la Sierra de las Estancias. Estas fallas comenzaron a desarrollarse durante el Tortonense, continuaron creciendo en el post-Tortonense y continúan desarrollándose en la parte más occidental del área de estudio (Soler *et al.*, 2003; Pedrera *et al.*, 2006).

Desde el punto de vista litológico, la Sierra de Estancias está formada por rocas alpujárrides, carbonatos triásicos con un espesor de hasta 200 m, que se superponen a materiales más blandos correspondientes a filitas. La orientación general de los carbonatos es N60°E con buzamientos variables que van desde los 40°-50° hacia el NO. La ladera sur de la sierra, donde se sitúa el corredor del Almanzora, es muy escarpada y la red de drenaje está erosionando las partes bajas y socavando las filitas. Como consecuencia, los macizos rocosos carbonatados pueden desestabilizarse dando lugar a numerosos movimientos en masa. En este contexto, se han identificado muchas cuevas gravitacionales en la Sierra del Saliente, así como en el Cerro Roque y Cerro Alquería (figura 1), todas ellas dentro de la Sierra de las Estancias. Están relacionadas con antiguos deslizamientos que afectaron a los carbonatos alpujárrides y controlados, no sólo por antiguas diaclasas, sino también por grietas extensionales vinculadas a los deslizamientos. La cueva más grande de la región es la cueva Saliente, con un desarrollo topografiado de 1,2 km, y la más profunda es la Sima del Saliente, con un desnivel de 164 m y con sus paredes cubiertas por gruesas coladas y otros tipos de espeleotemas. Se han identificado un total de 15 cuevas gravitacionales en el área, las más importantes de los cuales se describen en el presente trabajo.

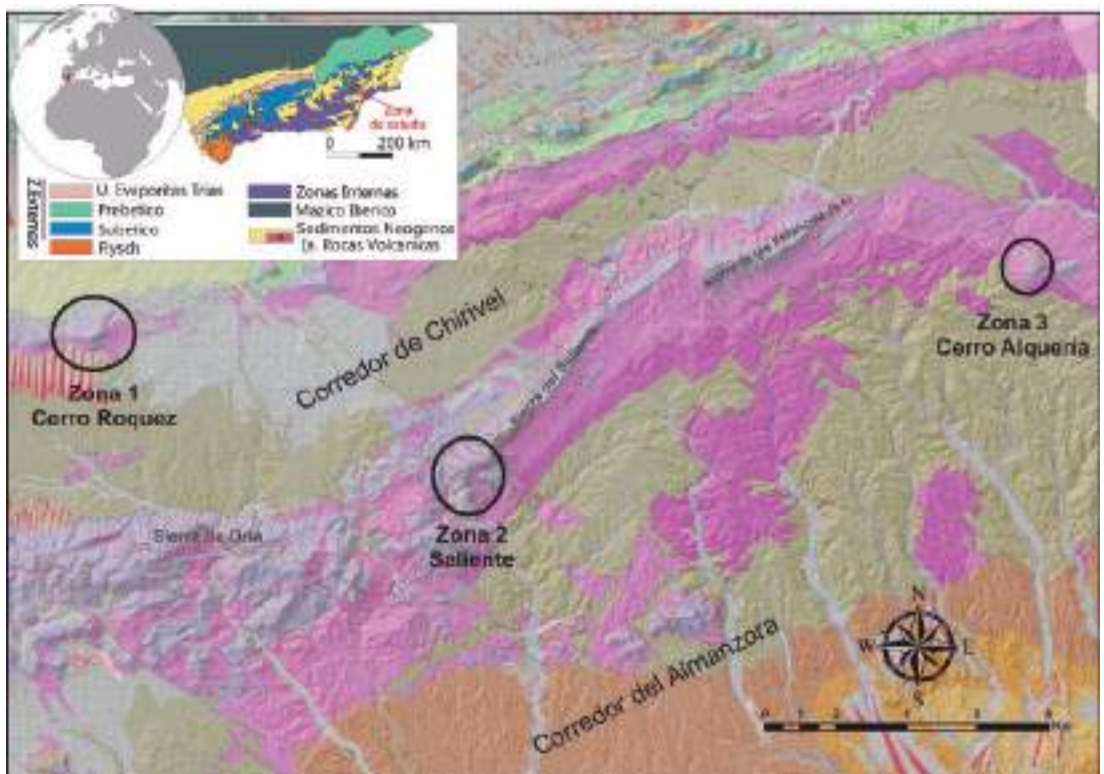


Figura 1. Localización geológica de la zona de estudio en el contexto general de la Cordillera Bética y situación de las principales zonas con cavidades gravitacionales. Los tonos morados corresponden a filitas alpujárrides y los grises azulados a calizas y dolomías que se les superponen. Los tonos grises y anaranjados a sedimentos cuaternarios y terciarios (base geológica tomada de GEODE, [www.igme.es](http://www.igme.es)).





Figura 2. Planta de las principales cavidades topografiadas en las zonas de estudio.

## Metodología

Los primeros trabajos en las cuevas de la zona fueron realizados por varias asociaciones regionales de espeleología (AEV, GEP-VR y GEB,) desde 1982 hasta 2011. Se topografiaron 3 cavidades en el Cerro Alquería, 3 en el Cerro Roquez y otras 3 en la Sierra del Saliente, donde, además se han explorado 6 más. Estos trabajos son el punto de partida del presente trabajo (figura 2).

Para el estudio de la génesis de las cavidades se han realizado reconocimientos geomorfológicos de detalle, tanto en el exterior como en el interior de ellas, con el levantamiento de los correspondientes mapas. Los deslizamientos principales han sido identificados y se han cartografiado las diaclasas, fracturas y zonas brechificadas asociadas, con la ayuda de las ortofotos y modelos digitales del terreno de distintas resoluciones del Instituto Geográfico Español (IGN).

Una vez identificados los procesos genéticos que han dado lugar a la existencia de estas cavidades, se ha procedido a su clasificación en función de una serie de criterios basados en el grado de evolución del proceso, de la morfología de la cavidad y de la disposición estructural previa al deslizamiento de los carbonatos donde se localiza la cavidad.

## Cavidades gravitacionales de la Sierra de las Estancias

### Zona 1. Cerro del Roquez

En la parte oriental del cerro de Roquez se localizan tres cavidades (figura 3A) denominadas Sima de los Huesos, Sima del Roquez y Cueva del Cuartilico del Agua. En ninguna otra

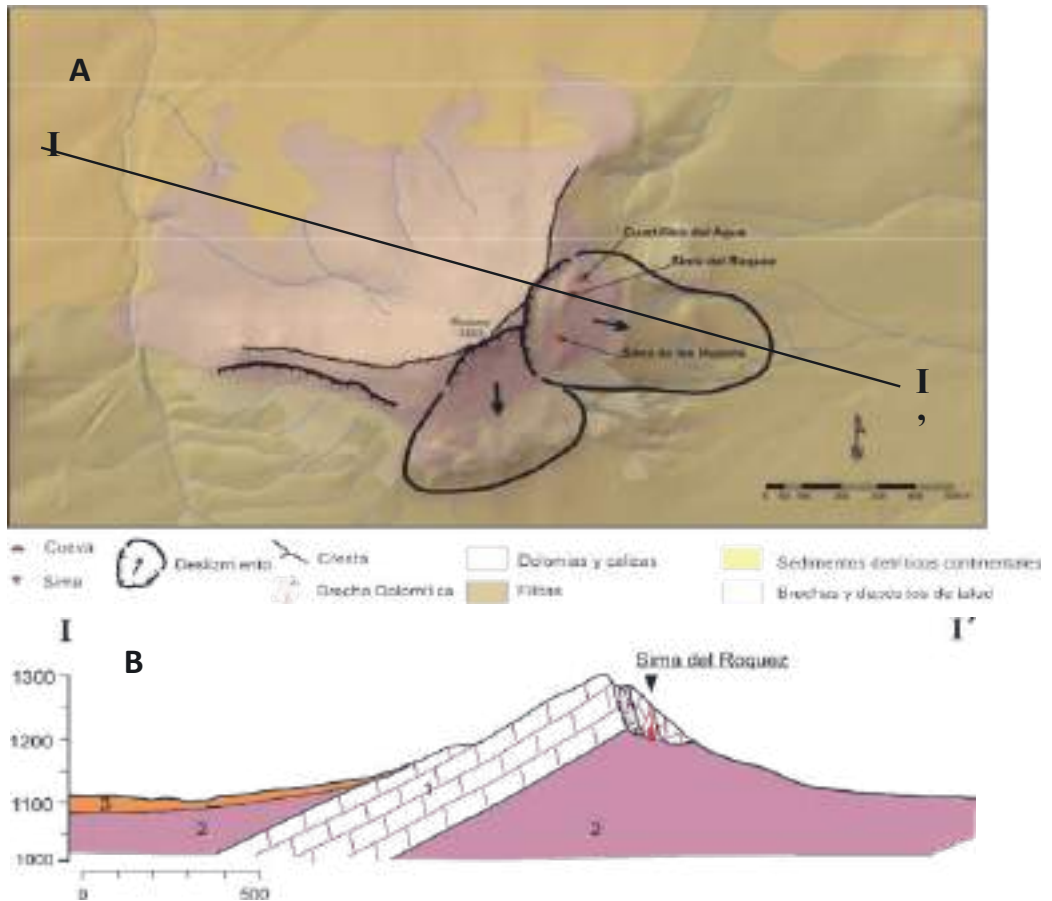


Figura 3. A) Esquema geomorfológico del Cerro del Roque y localización de cavidades. B) Corte geológico según la línea negra de la figura A). 1. Dolomías y calizas triásicas; 2. Filitas triásicas; 3. Arenas, conglomerados y lutitas pliocenas.

parte de este afloramiento ni en los afloramientos contiguos se conocen cavidades. Esta ladera está afectada por un gran deslizamiento con una extensión de 0,075 km<sup>2</sup> y un volumen de 3,7x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Las cuevas están relacionadas con grietas extensionales ubicadas en la cabecera del escarpe del deslizamiento y con dirección general N-S, perpendicular al desplazamiento del deslizamiento (hacia el E) (figuras 2 y 3).

La cueva Cuartillico del Agua se ha desarrollado a lo largo de una fractura extensional N10°E. Hay una sala principal de 8 m de ancho y 45 m de largo de forma ojival donde el suelo está cubierto por una brecha de colapso por desprendimientos del techo y de las paredes (figura 4A).

La sima del Roque está situada a 70 m de la cueva del Cuartilillo del Agua y se desarrolla a lo largo de una fractura vertical -N118°E- paralela al desplazamiento del deslizamiento (figuras 2 y 3). El pozo principal tiene una profundidad de 58 m (Porcel, 1994; González-

Ramón, 2014) donde se aprecian zonas de bloques de rocas encajados en las paredes a lo largo de la fractura. En esta cueva se encuentra una de las salas más bellas de Almería, la sala Marta Haro, por la variedad y riqueza de espeleotemas (figura 4B). La sala se encuentra en una zona ensanchada asociada a una fractura perpendicular al deslizamiento y en ella se alcanza la profundidad de 74 m desde la entrada. La base de esta sala está formada por una fina brecha dolomítica sin cementar, donde las paredes y suelos se desmoronan. La roca aparece triturada al encontrarse cercana a la base del deslizamiento (figura 2B).

La sima de los Huesos se encuentra a 120 m al N de la del Roquez. Al igual que el resto de cavidades se desarrolla a lo largo de una fractura N-S perpendicular a la dirección del deslizamiento (figuras 2 y 3). La sima presenta numerosos depósitos de brechas de colapso a diferentes niveles y en su base (figura 4C).



*Figura 4. A) Sala principal de la cueva del Cuartillico del Agua (Foto: Bernardo Cerezuela). B) Sima del Roquez, Sala Marta Haro (Foto: Bernardo Cerezuela). C) Zona profunda de la Sima de los Huesos (Foto: Pedro Pérez).*

## **Zona 2. El Saliente**

En las cumbres de esta sierra aparecen numerosas fracturas paralelas a la alineación montañosa, algunas de ellas de más de 1 km de longitud (figura 5). Se trata de grietas extensionales relacionadas con antiguos deslizamientos. En estas fracturas se localizan algunas cavidades y simas con un importante desarrollo vertical. Sus paredes están cubiertas por gruesas coladas y se aprecian algunos depósitos de brechas de colapso en varios niveles. La disposición de

estos elementos en las simas revela varias etapas de la evolución de los deslizamientos, a medida que los espeleotemas y brechas se reajustan y se rompen en diferentes niveles. Los tipos de movimientos de las masas de rocas son, principalmente, mecanismos de expansión lateral, donde los carbonatos se desplazan sobre las filitas (figura 5), de una manera lenta durante las etapas previas a la rotura y caída de los bloques. El avance de la apertura de fracturas similares habría acabado por desencadenar los grandes deslizamientos de las masas de carbonatos que se ven ladera abajo, donde también hay cavidades que son consecuencia de la desestructuración de las masas deslizadas y de la apertura de numerosas fracturas.

En la cresta de la Sierra del Saliente se han descubierto 5 simas. La Sima del Saliente es la más profunda, con 164 m. Se desarrolla a través de una fractura con dirección N45°E, y una

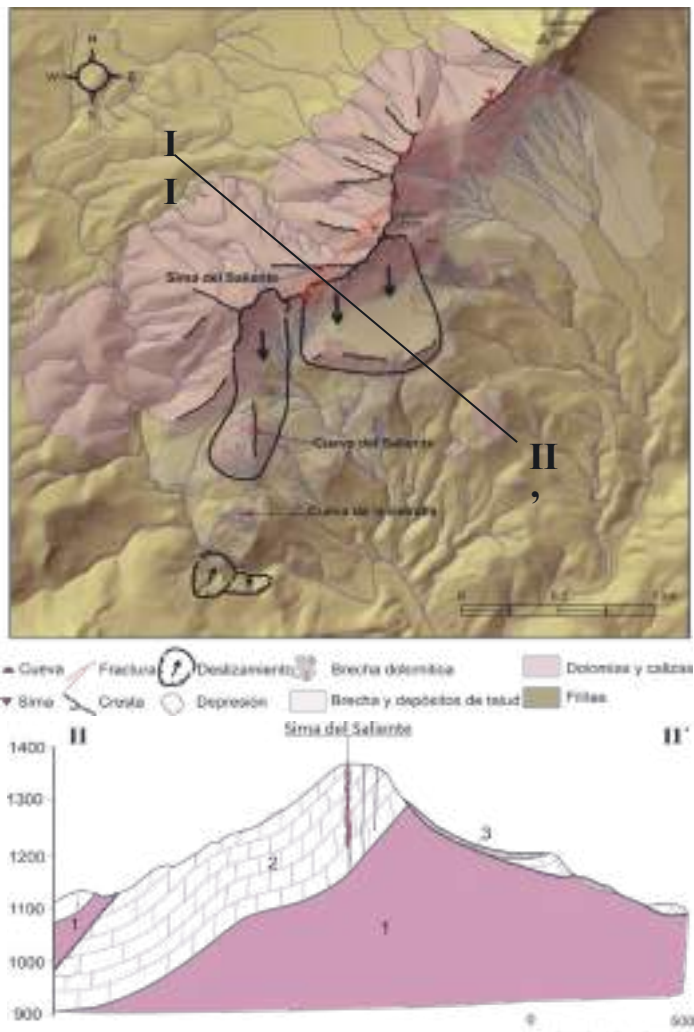


Figura 5. A) Esquema geomorfológico de la Sierra del Saliente y Cerro de la Ermita y localización de cavidades. B) Corte geológico según la línea negra de la figura A). 1. Filitas triásicas; 2. Dolomías y calizas triásicas; 3. Brechas y derrubios de ladera.

anchura entre 0,5-3 m (figura 2), con las paredes cubiertas por coladas de hasta 1 m de espesor. El recorrido total topografiado en diferentes pozos y suelos encajados es de 1,09 km.

En la ladera suroriental de la Sierra del Saliente y en la margen izquierda de la Rambla del Saliente, se han estudiado tres cuevas que están relacionadas con grandes y antiguos deslizamientos de masas de carbonatos. La Cueva del Saliente se abre en la cima del pequeño Cerro de la Ermita, que se corresponde con una masa deslizada del frente de carbonatos que conforma la Sierra del Saliente (figuras 5 y 6). La entrada es la consecuencia del colapso de uno de los grandes huecos abiertos entre los bloques fracturados que conforman esta compleja cavidad. El levantamiento topográfico arrojó un desarrollo de 1,2 km, con una morfología que tiende a adaptarse a la dirección en que la masa de carbonatos se deslizó. La observación de la ortofoto permite cartografiar la brechificación, de cuya zonificación puede deducirse la dirección de movimiento (figura 6). Pese a la antigüedad del deslizamiento, en la cresta de la ladera de la sierra puede observarse el escarpe de donde la masa fue desgajada y, ladera abajo, la acumulación de grandes bloques sueltos muestra un grado mayor de evolución, ya cerca del cauce de la rambla. En esta acumulación de bloques se abre la Cueva de la Estrella, con una tipología de *talus cave* (Halliday, 2004; Smith, 2007).

Más hacia el NE, puede observarse otra gran masa de rocas deslizadas con una morfología alargada, donde también es posible deducir el escarpe de donde se desgajó, justo al sur de la cresta donde se encuentran las fracturas relacionadas con la Sima del Saliente (figura 5).



Figura 6. A) Ortofoto (Google Earth, 2011) del Cerro de la Ermita donde se localiza la Cueva del Saliente.  
B) Mapa de fracturas y zonas brechificadas del Cerro de la Ermita y proyección (en color rojo) de la topografía de la cueva del Saliente.

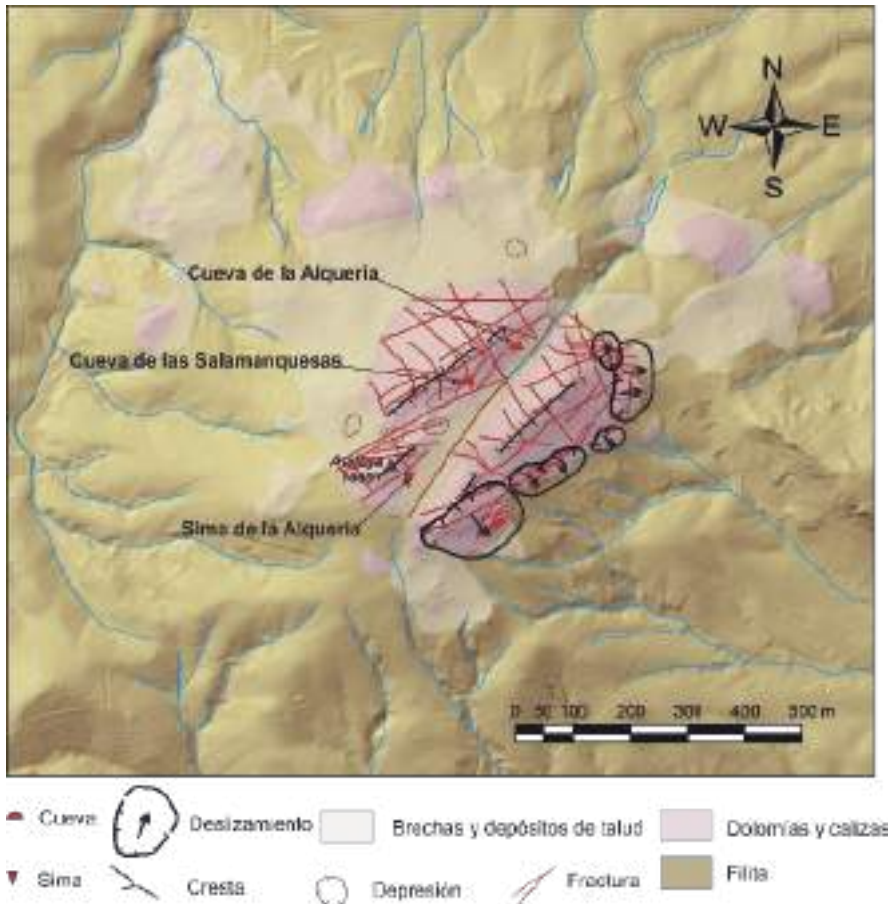


Figura 7. Esquema geomorfológico del Cerro de la Alquería y localización de cavidades.

### Zona 3. El Cerro de la Alquería

El pequeño Cerro de la Alquería, con tan solo 0,22 km<sup>2</sup> constituye un afloramiento de carbonatos alpujárrides que se encuentra colgado, en posición subhorizontal y ligeramente inclinado hacia el NO, sobre un sustrato formado por filitas. En todos sus bordes se observan pequeñas masas de carbonatos, deslizadas y despegadas, del afloramiento principal, especialmente numerosas hacia el N y NO. En el borde SE, las masas deslizadas no han llegado a despegarse del núcleo principal. El afloramiento está surcado por un enrejado de grandes fracturas de direcciones SE-NO y SO-NE, que tienden a ser perpendiculares entre sí. El cerro aparece partido por una gran fractura, rellena por una brecha cementada por arcillas rojas de descalcificación. En la parte noroccidental que divide esta fractura se han localizado cuatro cavidades, de las que la Cueva de la Alquería es la de mayores dimensiones con diferencia (figura 2).

La Cueva de la Alquería está formada por una red compleja de galerías y alcanza un desarrollo de más de 700 m, con una profundidad desde su entrada de 50 m (González-Ramón y Martínez-Gea, 1999; González-Ramón, 2014). Las galerías siguen una red de fracturas de direcciones N40°E y N160°E preferentes, muchas veces recubiertas por antiguas coladas, frecuentemente fracturadas en incluso rotadas, donde los caos de bloques son generalizados.

## Tipologías de cavidades gravitacionales observadas

Las cuevas gravitacionales identificadas en la zona SE de la Cordillera Bética tienen diferentes morfologías que están controladas por el tipo de movimiento en masa, la etapa de progresión del deslizamiento y su posición dentro del cuerpo del deslizamiento. Se han definido tres tipologías diferentes teniendo en cuenta sus diferentes fases de evolución y sus características morfológicas y específicas (figura 8, tabla 1):

*Tipo 1. Simas con desarrollo vertical relacionadas con grietas de extensión en escarpes de despegue de masas de rocas deslizadas.*

Estas cavidades representan las partes accesibles de las grietas ensanchadas que son las fases iniciales de desarrollo de los deslizamientos de rocas. A este grupo pertenecen las diferentes simas localizadas en las crestas de la Sierra del Saliente con desarrollos verticales de hasta 164 m.

Se describen casos similares en los sedimentos flysch de los Cárpatos occidentales (Margielewsky y Urban, 2003; Lenart *et al.*, 2013), con la diferencia de que las cuevas descritas por estos autores son mucho más modernas y están en areniscas. También

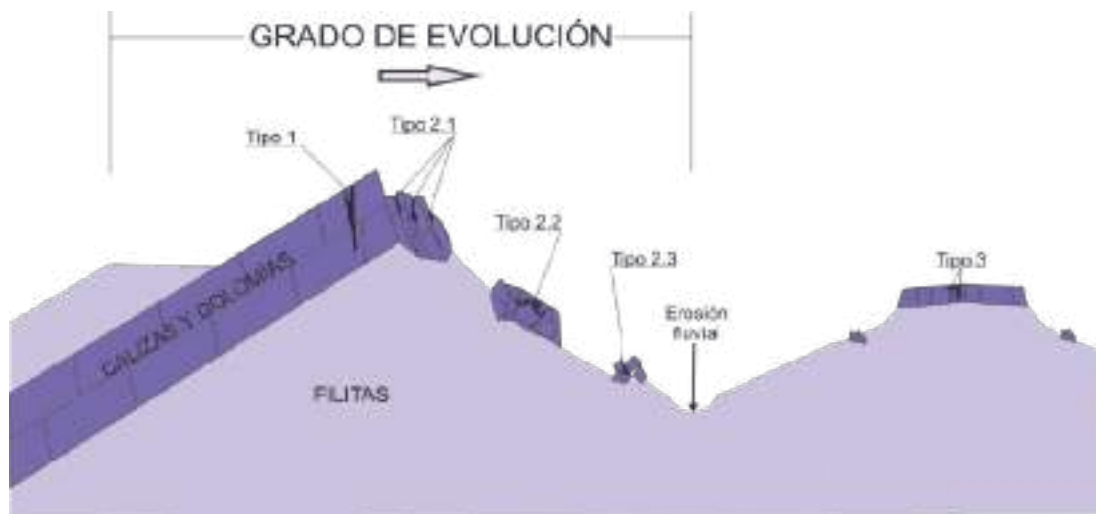


Figura 8. Clasificación de cavidades gravitacionales reconocidas en el SE de la Cordillera Bética, teniendo en cuenta la posición de la cueva dentro del cuerpo del deslizamiento, la progresión del deslizamiento y el tipo de deslizamiento.

Tipología	Subtipo	Tipo de cavidad	Ejemplos
TIPO 1. Simas con desarrollo vertical relacionadas con grietas de extensión en el escarpe de masas de rocas deslizadas		Simas	Sima del Saliente
TIPO 2. Cavidades en macizos rocosos deslizados	TIPO 2.1. Masa deslizada unida al afloramiento estable	Simas y cuevas con grandes salas	Cueva del Cuartillo del Agua Sima del Roquez Sima de los Huesos
	TIPO 2.2. Masa deslizada desprendida del afloramiento estable	Simas y cuevas con grandes salas y galerías laberínticas entre caos de bloques	Cueva del Saliente
	TIPO 2.3. Cuevas tipo talus caves	Galerías laberínticas entre caos de bloques	Cueva de la Estrella
TIPO 3. Cuevas en afloramientos subhorizontales		Simas y cuevas con grandes salas y galerías laberínticas entre caos de bloques	Cueva de la Alquería Sima de la Alquería Cueva de las Salamanquesas

Tabla 1. Tipologías de cuevas gravitacionales descritas en el N de Almería.

las simas del Partagat (Alfaro *et al.*, 2006; Delgado *et al.*; 2011), igualmente mucho más modernas, pueden incluirse en esta tipología.

### *Tipo 2. Cavidades en macizos rocosos deslizados.*

Según la posición de la cavidad dentro del cuerpo del deslizamiento, se pueden dividir en:

- *Tipo 2.1.* Masa deslizada unida al afloramiento estable. A este grupo pertenecen las cuevas ubicadas en el Cerro Roquez. Las cuevas tienen simas de acceso con desarrollos verticales y salas y galerías horizontales con depósitos de brechas de colapso relacionados con diferentes etapas en la evolución del deslizamiento. Otros casos similares, también mucho más recientes, se describen en el flysch de los Cárpatos occidentales (Lenart *et al.*, 2013).
- *Tipo 2.2.* Masa deslizada desprendida del afloramiento estable, y con gran evolución de la masa desplazada. Estas cuevas presentan una estructura caótica y morfologías laberínticas, con una sucesión de salas y galerías. La cueva del Saliente en el cerro Ermita es un buen ejemplo de esta tipología.
- *Tipo 2.3.* Cuevas tipo talus caves desarrolladas en bloques de carbonatos completamente desestructuradas en un grado mayor del desarrollo de la evolución de las masas deslizadas.

### *Tipo 3. Cuevas en afloramientos subhorizontales.*

En la zona estudiada los mejores ejemplos son las cavidades del Cerro de la Alquería, relacionadas con la apertura de grietas en un proceso de ensanchamiento lateral.



## Discusión y conclusiones

La gran extensión de formaciones rocosas carbonatadas y evaporíticas en España (alrededor del 30% de su superficie), propensas a la karstificación, determina una amplia gama de morfologías propias del exokarst y del endokarst. Las morfologías endokársticas (cuevas, pozos, dolinas, etc.) son muy abundantes en España -se conocen más de 30.000 cavidades en el país- y para ello existe una amplia bibliografía referente a este tema, centrada en la modelización kárstica como resultado de la disolución por acción de agua subterránea.

También son conocidas numerosas cuevas en la Zona Interna de la Cordillera Bética (SE de España). Mayoritariamente, se relacionan con la formación carbonatada triásica del complejo Alpujarride. Sin embargo, la disposición geológica de estos materiales en la región, sobreyaciendo a materiales más blandos correspondientes a filitas, y la interpretación del paisaje, permiten confirmar que un gran número de estas cuevas tienen un origen inducido por deslizamientos. Por el momento, falta información sobre la edad de estos procesos de deslizamientos. Algunos autores (Mather *et al.*, 2003) dataron grandes deslizamientos en la cuenca de Sorbas (Almería, SE de España) en el Pleistoceno, que se desencadenaron en respuesta a un rápido aumento en las tasas de incisión del valle asociados con cambios en el nivel de base.

Determinar la edad de la formación de grandes deslizamientos antiguos de masas rocosas es un desafío, pero sigue siendo una pregunta insatisfactoriamente respondida en geociencias (Pánek *et al.*, 2009). La mayoría de los estudios realizados sobre la evolución de los deslizamientos abarcan el periodo Glacial Tardío y Holoceno, que es la fracción más joven de deformaciones de laderas (Panizza *et al.*, 1997). La presencia de cavidades en estos sistemas de deslizamientos es una buena oportunidad para encontrar y extender un conjunto de posibles estrategias de datación y características morfoestratigráficas que podrían usarse en la datación de deformaciones de laderas y la evolución del paisaje de una región.

Se han realizado estudios isotópicos preliminares en muestras obtenidas en las coladas que recubren las paredes de la Sima del Saliente y de la Sima del Roquez (Jiménez de Cisneros *et al.*, 2015; 2016) aunque los intentos de datación (por ahora no publicados) realizados mediante la aplicación de las series de desintegración de U-Th, en ambos casos indican que estos espeleotemas crecieron prácticamente en su totalidad en periodos de más de 500 ka de antigüedad, aunque cercanos a dicha edad.

A la espera de disponer de dataciones más precisas, las curvas climáticas obtenidas a partir de los isótopos estables ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ ) aún no han podido ser ajustadas a un periodo concreto. Sin embargo, estos datos son suficientes para demostrar la gran antigüedad de estos deslizamientos, que podrían haberse producido, en las tres zonas analizadas, en un contexto climático y tectónico similar, que favoreció periodos de intensa erosión.

## Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a la Asociación Espeleológica Velezana por su contribución al conocimiento de las cuevas del norte de la provincial de Almería. Este trabajo es una contribución del proyecto PID2021-125619OB-C22.

## Referencias

- Alfaro, P., Delgado, J., Estévez, A., García-Tortosa, F.J., Tomás, R., Marco-Molina, J.A. (2006). Origen de las simas de Partagat (Sierra de Aitana, Alicante). *Geogaceta*, 40, 271-273.
- Bella, P., Gaál, L. (2013). Genetic types of non-solution caves. *Proceeding of 16th International Congress of Speleology*, Vol (3), 237-242.
- Delgado, J., Vicente, F., García-Tortosa, F., Alfaro, P., Estévez, A., López-Sánchez, J.M., Tomás, R. and Mallorquí, J.J. (2011). A deep seated compound rotational rock slide and rock Spreads in SE Spain: Structural control and DInSAR monitoring. *Geomorphology*, 129 (3-4), 252-262.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., Stein, S. (1990). Current plate motions. *Geophysical Journal International*, 101, 425 – 478.
- González-Ramón, A. (2009). Génesis de cavidades por procesos gravitacionales. El caso del Cerro del Roquez. *II Congreso Andaluz de Espeleología*. Priego de Córdoba, 2008, 285-294.
- González-Ramón A. (2014). Las cuevas de los Vélez y su entorno. Un karst diferente. Centro de Estudios Velezanos, 144 pp. [https://www.researchgate.net/publication/272795918\\_Las\\_cuevas\\_de\\_los\\_Velez\\_y\\_su\\_entorno\\_Un\\_karst\\_diferente](https://www.researchgate.net/publication/272795918_Las_cuevas_de_los_Velez_y_su_entorno_Un_karst_diferente)
- González-Ramón, A., Carra Vélez, R., Segura Herrero, A., Sánchez Díaz, T.J., Gea López, R., Pérez Martínez, P., Belmonte Jiménez, G. y Carra López, J.C. 2013. Las cuevas del Saliente, norte de Almería. Un ejemplo de cavidades generadas por procesos gravitacionales. *Boletín de la Sociedad de Espeleología y Ciencias del Karst*, 9, 52-61.
- González-Ramón A., Martínez-Gea J.A. (1999). El karst de la Alquería (Vélez Rubio, Almería). En: B. Andreo, F. Carrasco, J.J. Durán (Eds.), *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*. Patronato de la Cueva de Nerja, Nerja (Málaga), 77-93.
- González-Ramón A., Mateos R.M. (2013). Paleodeslizamientos como agente espeleogenético. Casos en las Sierras de las Estancias y El Saliente (N de Almería). En: Alonso E., Corminas J., Hürlimann (Eds.) *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Palma de Mallorca, 183-194.
- Halliday, W.R. (2004). Talus Caves, In: J. Gunn (Ed). *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, Fitzroy Dearborn, NY, 721-724.
- Jiménez de Cisneros, C., Sequero, C., González-Ramón, A., Caballero, E. (2015). Análisis petrográfico de espeleotemas del sureste de la Península Ibérica. Caracterización de las inclusiones fluidas. En: Galve, J.P., Azañón, J.M., Pérez Peña, J.V., Ruano, P., (Eds.) *XIV Reunión del Cuaternario (AEQUA)*. Granada, España.
- Jiménez de Cisneros, C., González-Ramón, A., Andreo, B., Segura, A., Sánchez-Díaz T. (2016). La Sima del Saliente: reconstrucción paleoclimática mediante registro isotópico en coladas espeleotémicas (Sierra del Saliente, Almería, Sur de España). En: Andreo, B., Durán, J.J., (Eds.) *VI Congreso Español sobre Cuevas Turísticas. El karst y el Hombre, las Cuevas como patrimonio mundial*. Nerja, España, 371-381.
- Lenart, J., Pánek, T., Dusek, R. (2013). Genesis, types and evolution of crevice-types caves in the flysch belt of the Western Carpathians (Czech Republic). *Geomorphology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.025>
- Lyakhnisty, Y.S., Khlebalin, I.Y. (2006). Pseudokarst and non-karst caves – A discussion and examples from Russia. *Abstract of 9th International Symposium of Pseudokarst*, 60-61.
- Marguielewski, W., Urban, J. (2003). Crevice-type caves as initial forms of rock landslide development in the Flysch Carpathians. *Geomorphology*, 54, 325-338.
- Margielewski W., Urban J., Szura C. (2010). Crevice type caves of Polish Flysch Carpathians and their connection with development of Surface mass movements. *Proceeding of 11th International Symposium of Pseudokarst*, 78-79.
- Panizza, M., Pasuto, A., Silvano, S., Soldati, M. (1997). Landsliding during the Holocene in the Cortina d' Ampezzo region, Italian Dolomites. *Palaeoclimate Research*, 19, 17–31.

- Pedrerera A., Galindo-Zaldívar, J., Sanz de Galdeano, C., López-Garrido, A.C. (2006). Superposición de fallas y paleoesfuerzos en el Corredor del Almanzora desde el Tortoniense a la actualidad (Cordilleras Béticas). *Geogaceta*, 39, 59-62.
- Self, C. (1990). A gravity sliding cave in Western England. In: J Wegner (Ed) IV symposium of Psudokars, *Proceedings of Statements. Knihovna ČSS*, 23, Praha, 139-145.
- Smith, G. K. (2007). Tectonic and Talus Caves at Pilchers Mountain, New South Wales. *Helictite*, 40(1), 11-20.
- Soler, R., Masana, E., Santanach, P. (2003). Evidencias geomorfológicas y estructurales del levantamiento tectónico reciente debido al movimiento inverso de la terminación sudoccidental de la falla de Alhama de Murcia (Cordillera Bética Oriental). *Rev. Soc. Geol. España*, 16 (3-4), 123-134.
- Vitek, J. (1983). Classification of Pseudokarst forms in Czechoslovakia. *Int. J. Speleol.*, 13, 1-18. Vdovets, M. (2006). Pseudokarst and geoconservation in Russia. *Abstract of 9th International Symposium of Pseudokarst*, 88-90.



# **Tour virtual de cavidades. Experiencia en la Gruta de las Maravillas, Aracena. Incorporación de nuevas tecnologías de imagen para documentación del patrimonio subterráneo**

Francisco José HOYOS MÉNDEZ <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Sociedad Excursionista de Huelva, Pza. Era de Gonzalito 9, Higuera de la Sierra (Huelva)  
pacoshe@gmail.com

---

## **Resumen**

Documentar gráficamente el mundo subterráneo, es una de las formas de acercar este patrimonio a cualquier persona interesada en el mismo, tanto al público en general como al especializado: científicos o espeleólogos. Las nuevas tecnologías permiten la realización de fotografías panorámicas, con alto grado de detalle y la conversión de estas en esféricas cuando las mismas cubren 360 grados de visión en horizontal y en vertical. La sucesión ordenada de un número de estas panorámicas esféricas, puede usarse para la confección de un tour virtual. El visionado de las imágenes es reproducible en los distintos dispositivos, tanto fijos como móviles de uso corriente en la actualidad: teléfonos móviles, ordenadores, *smartTV*, etc. En este trabajo se describe, la labor de campo, el material y software utilizados, así como el proceso para llegar a obtener una consecución de imágenes esféricas y sus posibles usos.

**Palabras clave:** 3D-360°, cuevas, fotografía, tour virtual.

## ***Virtual tour of caves. The experience in the Gruta de las Maravillas, Aracena. Incorporating new imaging technologies for documentation of underground heritage***

### ***Abstract***

*Graphically documenting the underground world is one of the ways to bring this heritage closer to anyone interested in it, both the general public and the specialized public: scientists or speleologists. The new technologies allow the taking of panoramic photographs, with a high degree of detail, and the conversion of these into spherical ones when they cover 360 degrees of vision horizontally and vertically. The orderly succession of a number of these spherical panoramas can be used to create a virtual tour. The viewing of the images is reproducible on the different fixed and mobile devices in common use today: mobile phones, computers, smartTV, etc. This work describes both the field work and the material and software used, as well as the process to obtain a spherical image and its possible uses.*

**Keywords:** 3D-360°, cave, photography, virtual tour.

## Introducción

La realización de fotografía panorámica de 360° de alta calidad, permite la obtención de un documento gráfico de alta resolución, utilizable en dispositivos de realidad virtual, procurando una visión estática realista, tanto de espacios abiertos como de interiores. En la actualidad también es posible obtener imágenes de vídeo de 360°, que pueden utilizarse en combinación con la fotografía esférica.

En un primer momento la idea de la realización de "tour virtual", se utilizó por la industria inmobiliaria para la visita virtual de inmuebles en venta desde una página web (Gail, 2022) o para Google Maps (Bernáez, 2022). Este planteamiento inicial, consistía en poder visionar desde un ordenador o un teléfono móvil, las distintas habitaciones o dependencias de una vivienda o un local comercial en venta. La vista se realiza desde el centro de cada habitación o dependencia, situando una cámara específica de fotografía 360° sobre un trípode, más o menos centrada, la cual es capaz de realizar en una sola toma una fotografía esférica. La aparición de cámaras económicas de resolución *full HD* o superior, ha permitido crear un producto interactivo, en el que el visitante puede tener desplazando con un dedo en su teléfono móvil, la vista de una dependencia girando a derecha, izquierda, arriba y abajo, de modo que obtiene una visión muy aproximada de cómo es el inmueble ya que igualmente puede ir desplazándose de habitación en habitación. Este material se obtiene con luz diurna o artificial del propio inmueble, por



Figura 1. Modelo de rótula panorámica (izquierda). Cámara réflex montada sobre rótula (derecha).

lo que no se necesita apoyo de luz de flash o paneles de luz continua específicos de fotografía.

La aplicación de esta idea al mundo subterráneo, en el que no disponemos de luz o si se dispone en el caso de cuevas turísticas iluminadas, la luz de que se dispone no es adecuada para la realización de fotografía con calidad suficiente, lo que plantea dificultades específicas en la obtención de las imágenes. Este trabajo recoge las técnicas desarrolladas durante la realización del primer "Tour Virtual de la Gruta de las Maravillas". Un tour virtual dividido en 5 recorridos, con casi un centenar de panorámicas realizadas, que ha permitido documentar detalladamente la Gruta de las Maravillas, desde un punto de vista fotográfico .

## Equipo de trabajo de campo

Existen varias posibilidades a la hora de obtener las imágenes, con las que componer un tour virtual: cámara 360° específica, teléfono móvil, cámara fotográfica compacta, cámara réflex, etc. En función del dispositivo de que usemos obtendremos una calidad u otra. Esta comunicación se centra específicamente en el uso de cámara réflex o Evil de alta resolución. Las cámaras de 24 o más megapíxeles llegan a arrojar fotografías equirectangulares de más de 100 megapíxeles, equivalente a resoluciones efectivas de 12K o superior. Se trata de imágenes de calidad superior a los dispositivos de reproducción actuales, situados en un máximo de 8K. Algo que permitiría en un futuro, la actualización a resoluciones de reproducción superior, sin tener que volver a realizar de nuevo todas las fotografías.



Figura 2. Modelo de rótula panorámica (izquierda). Cámara réflex montada sobre rótula panorámica (derecha)



*Figura 3. Punto nodal del conjunto cámara objetivo con respecto al eje de giro de la rótula*

El material necesario para la fotografía esférica que se propone en este caso es: cámara réflex o Evil de alta resolución (24 o más megapíxeles) y con conexión wifi, Objetivo de 12 ó 14 milímetro de focal, un trípode estable, una rótula panorámica donde situar la cámara, un tlf móvil con el que controlar la cámara vía wifi, iluminación (flashes o continua mediante paneles led) y equipo humano, 3 a 4 personas. Para poder controlar los parámetros vía wifi, es necesario que la cámara disponga de esa tecnología.

En el caso de usar un objetivo de 12 mm y una cámara de formato completo (sensor de 24 x 36 mm), el número necesario de fotografías será de 14, con un solapamiento entre ellas de aproximadamente un 25 %. De las 14 fotografías dos corresponden al suelo. Las 6 primeras fotografías se realizan con la cámara situada en la rótula, habiendo calculado previamente el punto nodal del conjunto cámara objetivo, con una inclinación de la cámara de 45º sobre el horizonte. Las 6 siguientes tomas, se realizarán con la cámara en una inclinación de 45º bajo el horizonte. Por último, se realizarán dos fotos con la cámara a 90º bajo el



*Figura 3. Posición de la cámara para obtener el nadir y poder eliminar el trípode en 2 fotos.*





*Figura 4. Modo para obtención del nadir sin trípode, alternativo al sistema de la rótula.*

horizonte (mirando abajo) hacia el suelo, con desplazamiento de la cámara en la rótula, para obtener el nadir sin la presencia de trípode. Si la rótula no dispone de sistema para la realización de las dos fotos del suelo la primera se hará con el trípode y la segunda sin el trípode, sujetando la cámara con una pértiga en horizontal, en la posición más aproximada posible a como estaba montada en el trípode, cuando se realizó la foto primera del suelo.

Es importante calcular bien el punto nodal de cada objetivo a utilizar, para minimizar el error de paralaje en las tomas. Esto facilitará el montaje con menos errores y mejor calidad de las fotografías en el programa de panorámicas.



*Figura 5. Ejemplo de imagen equirectangular (Colada de los Brillantes Gruta de las Maravillas)*



Figura 6. Espacio de trabajo en Pano2VR.

Tal como cabe pensar en este tipo de fotografía, en el que el ángulo de visión es 360°, el trípode es un elemento que está y por lo tanto saldrá en la fotografía. Es un elemento que no interesa que salga en la imagen final. Para ello es necesario obtener dos fotografías del suelo con cierto desplazamiento de la cámara sobre el eje de la rótula y ésta mirando al nadir en ambos casos. Con estas dos imágenes se podrá montar una en Photoshop en la que no esté el trípode.

Se debe de tener especial cuidado al obtener las imágenes, si no se realizan con luz continua, para que la dirección de las sombras coincida de una a otra, así como la intensidad de la misma, de modo que no exista una diferencia insuperable para el software que luego unirá las fotografías. Si se realizan las imágenes con luz continua tendremos dos ventajas importantes. En primer lugar, la panorámica se conseguirá con mucha mayor rapidez y por otro lado no habrá diferencias de sombras y luminosidad que dificulten su posterior montaje. La utilización de luz continua presenta algunos problemas, tales como la dificultad de ocultar los puntos de luz, y la iluminación de grandes volúmenes. Será difícil o muy difícil que algunos paneles de iluminación no salgan en la imagen. En la actualidad para grandes volúmenes sigue siendo más apropiado el uso de luz de flahs, un sistema mucho más portable y que usado en largas exposiciones permite multiplicar la intensidad de luz con varios disparos. Será por lo tanto más favorable el uso de luz continua en espacios moderados y que no precisen de una aproximación larga, ya que los sistemas de iluminación continua, implican un mayor volumen y peso. El sistema elegido dependerá en cada caso de la cavidad y sala a fotografiar. Hay que decir que en las fotos 360°, no es preciso que conjunto trípode y cámara estén a nivel.

## Software utilizado

El trabajo de gabinete constará de tres fases. La primera comprenderá los retoques básicos de cada toma: contraste, máscara de enfoque, clonado de manchas del sensor, viñeteado, etc,



*Figura 7. Oculus Quest 2 (ejemplo de gafas de realidad virtual)*

así como también el montaje de la foto correspondiente al suelo, en la que ya no aparezca el trípode. Para esta primera fase se utiliza Photoshop, o cualquier otro programa de edición.

En una segunda fase se montará la panorámica, que contará de 13 fotografías y que como resultado nos dará una imagen equirectangular, es decir, una fotografía en formato 4 x 2. Se puede ver que los bordes inferior y superior se encuentran deformados, esto es porque el programa de confección de panorámicas, detecta que se trata de una fotografía esférica y la entrega así finalizada, para su posterior visualización en modo 360°. Aunque hay varios programas para la realización de panorámicas, el más utilizado en la actualidad es el "PtGui".

Por último, para confeccionar un tour virtual a partir de varias imágenes esféricas, se utiliza un programa específico, que no solo nos permite pasar de una a otra panorámica, también nos permite incrustar vídeos dentro de las propias panorámicas, es decir una imagen en movimiento dentro de una imagen fija, con locuciones o sonido ambiente. Es posible añadir imágenes de detalle, planos y textos que faciliten la comprensión de lo que se está viendo, también se pueden combinar escenas de vídeo grabado con cámaras de vídeo dedicadas 360°. Existen varias opciones de software en este sentido, uno de los programas más utilizados es Pano2VR.

Para la confección del "Tour Virtual de la Gruta de las Maravillas se optó por PtGui como programa para realizar panorámicas y por Pano2VR como programa para el tour virtual. Este último ofrece una gran cantidad de opciones sobre interactividad, incluyendo la posibilidad de "megapanos", modo en el que se pueden visualizar con cualquier dispositivo móvil u ordenador panorámicas de muy alta resolución, por encima de los 12K, permitiendo con ello un nivel de acercamiento con calidad muy alto.

Cualquiera de las opciones propuestas de procesamiento de imágenes, creación de panoramas y confección de tour virtual, implica un conocimiento medio alto de las aplicaciones para poder crear un tour virtual. Cada marca de estos productos en especial PtGui y Pano2VR, cuenta con un buen número de tutoriales en Youtube, al margen de los que muchos aficionados y profesionales suben a esta aplicación de vídeos (Carbajal, 2022a y b).

Para la visualización concreta en gafas de realidad virtual, es necesario el desarrollo de una APP específica que permita visualizar en modo 360° los tours virtuales que se confeccionan con Pano2VR u otra aplicación similar. Esto permitiría un tour interactivo

pudiendo ir hacia adelante y hacia atrás en el recorrido o cambiar de recorrido a voluntad, así como acercarse y alejarse, pudiendo estar más o menos tiempo visualizando el tour también a voluntad. Existe la posibilidad de montar el tour virtual a modo de presentación de diapositivas, con un software adicional como "Adobe Premiere" o cualquier otro similar que admita el codec H265 de grabación de vídeo. Las gafas de realidad virtual convierten cualquier presentación de vídeo de fotos equirectangulares, en vídeo 360° sin app específica. De forma sencilla es posible subir presentaciones de fotos equirectangulares a las gafas VR y disfrutar de una experiencia inmersiva, aunque esta experiencia no es interactiva, al tratarse de una presentación fija de vídeo.

Para el visionado del "Tour Virtual de la Gruta de las Maravillas", se ha optado por la utilización de gafas de realidad virtual "Oculus Quest 2" dada su buena relación en cuanto a calidad/precio. La implementación del tour virtual a las gafas, se ha realizado mediante 5 vídeos efectuados con "Adobe Premiere", a modo de presentación de imágenes consecutivas para cada uno de los recorridos virtuales previstos, a la espera de poder desarrollar una APP que permita incorporación del tour en HTML5 desarrollado con Pano2VR.

## Conclusiones

Con las nuevas tecnologías se puede llevar un paso más allá, la experiencia visual que la fotografía y el vídeo, vienen permitiendo tradicionalmente en formato plano. Tanto en teléfonos móviles como en ordenadores, podemos conseguir una visualización mucho más amplia y rica de lo que hasta hace poco podíamos ver, gracias a la fotografía esférica. Si llevamos la fotografía esférica a las gafas VR, la experiencia se vuelve inmersiva y bastante realista. Por lo que la confección del tour virtual de cavidades, puede ofrecernos una experiencia cercana a la visita real, e incluso en algunos aspectos más detallada que la propia realidad, dado que en muchas ocasiones, apreciamos más detalle en las fotos que en el lugar. Aunque como es lógico esto se limita únicamente a la experiencia visual. Para las cuevas turísticas, como en el caso de la Gruta de las Maravillas, supone un recurso importante que permite el acceso a la cavidad en modo virtual, para aquellas personas de movilidad reducida e incluso, para aquellas personas que por razones de aforo no hayan podido visitar la Gruta. También permitirá poder ver aquellas zonas no habilitadas, que en el recorrido habitual no pueden visitarse, pudiendo ser un complemento a la visita real.

## Referencias

- Carbajal, M. (consultado 19 de octubre de 2022a). *Pano2VR: tutorial en español / Hacer vídeo desde fotos 360*. [https://www.youtube.com/watch?v=mJ\\_pHRkeRLk](https://www.youtube.com/watch?v=mJ_pHRkeRLk).
- Carbajal, M. (consultado 19 de octubre de 2022b). *PTGui Tutorial en Español (Parte 2/4): Fotografía 360*. <https://www.youtube.com/watch?v=7kQlbuzeA7k>.
- Gail, G. (consultado 19 de octubre de 2022). *Contenidos 360 para el mundo inmobiliario. Visita 360*. <https://www.youtube.com/watch?v=sM5aRWqluXQ>.
- Bernáez, D. (consultado 19 de octubre de 2022). *Cómo hacer foto 360 con réflex para Google Maps*. <https://www.youtube.com/watch?v=bKjLbQdQPrw>.

# Avances recientes en los hallazgos arqueológicos y paleontológicos de la Cueva de S'Aigua, Menorca

Carmen LARA ASTIZ <sup>(1)</sup>, Pedro Agustín ROBLEDO ARDILA <sup>(2)</sup>, Pere ARNAU <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Fundación Foment de Turisme de Menorca. C/ d'Artrux, 22. 07714 Maó, Menorca. carmen.lara@menorca.es

<sup>(2)</sup> IGME, CSIC. C/ Felicitá Fuster, 7. 07007 Palma de Mallorca. pa.robledo@igme.es

<sup>(3)</sup> Ajuntament de Ciutadella. Plaça des Born s/n, 07760 Ciutadella de Menorca. Illes Balears. pedroarnau2003@yahoo.es

---

## Resumen

En el verano de 2020 comenzaron los trabajos de adecuación para un recorrido para los visitantes a la Cueva de s'Aigua en Cala Blanca, Menorca. En la dicha cueva se habían documentado restos cerámicos y antropológicos procedentes de inhumaciones en el interior de la cueva, por lo que se ha establecido que entre sus usos fue una necrópolis. Se realizó un control arqueológico de las obras de la cueva con el fin de catalogar, preservar y estudiar los restos arqueológicos y paleontológicos. La mayoría de los materiales hallados están datados en el Bronce Final. No hubo excavación propiamente dicha, por lo que la intervención consistió en retirar los materiales arqueológicos en el recorrido que se estableció para las visitas y en preservar el espacio en la adecuación de la infraestructura necesaria. Se hizo de manera sistemática mediante el método científico, situando en planta los hallazgos de los materiales arqueológicos, con el fin de tener una documentación que sirva para dar respuesta a la funcionalidad de los espacios del interior de la cueva. También, se revisaron restos humanos encontrados en el interior del lago, lo que abre una incógnita sobre posibles enterramientos, dando por hecho por tanto que el agua del lago estaba a un nivel muy bajo o seco. O, también la posibilidad de que hayan sido depositados con agua en el lago por los pobladores del momento. En este sentido, estos hallazgos muestran la importancia hidrológica de las aguas subterráneas para los asentamientos talayóticos e incluso pretalayóticos.

**Palabras clave:** Bronce Final, Cala Blanca, cerámica, necrópolis.

## **Recent advances on the archaeological and paleontological findings in the Cueva de S'Aigua, Menorca**

### **Abstract**

*In the summer of 2020, work began on the adaptation of a tour for visitors to the Cueva de s'Aigua in Cala Blanca, Menorca. Ceramic and anthropological remains from burials inside the cave have been documented, so it has been established that one of its uses was a necropolis. An archaeological control of the cave works was carried out in order to catalog, preserve and study the archaeological and paleontological remains. Most of*

*the materials found are dated to the Late Bronze Age. There was no actual excavation, so the intervention consisted of removing the archaeological materials from the route established for visits and preserving the space by adapting the necessary infrastructure. It was done systematically using the scientific method, placing the findings of the archaeological materials on the ground plan, in order to have documentation that serves to respond to the functionality of the spaces inside the cave. In addition, human remains found inside the lake were reviewed, which opens up a question about possible burials, thus assuming that the water in the lake was at a very low or dry level. On the other hand, also the possibility that they have been deposited with water in the lake by the inhabitants of the moment. In this sense, these demonstrations show the hydrological importance of groundwater for talayotic and even pre-talayotic settlements.*

**Keywords:** ceramics, Cala Blanca, Late Bronze Age, necropolis.

## **Introducción y marco de trabajo**

La intervención a realizar ha tenido por objeto la Cova de S'Aigua en Cala Blanca (Ciutadella), situada en una zona pública entre el Carrers del Llac, la Avinguda de la Platja y el Passatge Pinós o d'Arbocers

Se han realizado una serie de actuaciones para poder abrir a la visita la Cova de s'Aigua a las visitas. Estas actuaciones se han hecho tanto en el interior como en el exterior de la cueva. Las que se han llevado a cabo en el interior han tenido como norma básica la preservación de la cueva, los elementos naturales geológicos y faunísticos, así como los restos arqueológicos, en un espacio en el que hay dos zonas, terrestre y acuática.

En lo que se refiere a las tareas realizadas en el exterior, se han tenido en cuenta sobre todo la preservación del paraje y causar el menor impacto posible para que el visitante pueda contemplar el espacio natural que rodea la cavidad y su acceso. En términos generales, se ha seguido la hoja de ruta establecida por los científicos del IGME-CSIC en cuanto a la sensibilidad de la cavidad.

La cueva de S'Aigua es una cavidad natural con una parte aérea y otra acuática, con presencia de agua salobre en un extenso lago endokárstico. Desde épocas pasadas se documentó la presencia de restos humanos en el interior del lago, con restos antropológicos que todavía hoy están en el mismo lugar, bajo el agua. En esta zona, los restos parecen estar ligados a una necrópolis, documentada de forma visual, en diversas zonas del lago. También, durante las diferentes intervenciones de estudio de la cueva se ha encontrado cerámica (pretalayótica, talayótica, clásica y musulmana). Por tanto, desde el punto de vista arqueológico (y geológico), la cueva de S'Aigua es un monumento, cultural y natural excepcional.

En 1756 hay noticias escritas sobre las cuevas de Cala Blanca y sus formaciones geológicas (Armstrong, 1756). El Archiduque Luis Salvador de Austria en uno de sus escritos en Die Balearen (1897), también hace referencia a las formaciones existentes en una cavidad.

Las primeras prospecciones llevadas a cabo fueron realizadas en 1948 por J.M. Thomas y J. Montoriol. Estos autores definen la cueva de s'Aigua como una cavidad de 3.000 m<sup>2</sup> de superficie y dicen "cuyo mayor interés radica en el lago Miguel Ángel Moll, que mide 1200 m<sup>2</sup>, ocupa el segundo lugar entre los lagos subterráneos de nuestro país", el más grande de España y parece que del mundo, se consideró en la época de estas prospecciones el lago de las Cuevas del Drac en Mallorca. También se hicieron prospecciones en 1955 por espeleólogos catalanes, y en 2004-2005 y 2006 por un equipo de Menorca (Arnau *et al.*, 2008).

La primera topografía conocida de la Cueva de S'Aigua data de 1948 realizada por Thomas-Casajuana y Montoriol-Pous. En 1952, Maluquer hizo una nueva topografía y más tarde en 2002, Trias, Florit, Alcover y Márquez elaboraron otra planimetría en detalle (Arnau, 2008). TRAGSA bajo la supervisión del IGME elaboró una topografía en 3D en 2016, tanto de la Cova de s'Aigua como de la Cova de na Megaré.

En la memoria presentada en el Consejo Insular de Menorca para su habilitación se hace un estudio muy cuidadoso de las cuevas de Cala Blanca, tanto documental como bibliográfico. Se ha desarrollado un trabajo desde el punto de vista geológico, planimétrico, descriptivo, fotográfico, hidrológico y de contaminación (gases, residuos), analíticas de resistencia de la roca, fauna subterránea, prospección arqueológica, estudio de las inscripciones y propuestas de futuras actuaciones (Robledo y Durán, 2018).

## **Antecedentes arqueológicos**

En cuanto a la catalogación arqueológica de las cuevas, en 1966 Mascaró Pasarius incluye la cueva de s'Aigua entre los Monumentos prehistóricos y protohistóricos de la isla de Menorca. Joan de Nicolás, en 1987, la cataloga dentro del Inventario de protección del patrimonio histórico arqueológico de Ciutadella para su Ayuntamiento. M. Orfila y M.J.Hernández, en 1989, la incluyen en las Cartas Arqueológicas de las Islas Baleares. Octavi Pons y Joan de Nicolàs también la hacen constar en las Cartas Subacuáticas de Menorca, dentro de actividades de la asociación Amigos del Museo de Menorca.

En 1981-1984 se publica un estudio de materiales arqueológicos de la Cueva de S'Aigua; "era conocida como Sa Cueva de Na Figuera, Sa Cova de S'Aig de Perelleta o Sa Cova des Llac" (Sastre Moll, 1981-1984 a trabajo se describen diferentes cerámicas talayóticas y púnicas hasta época musulmana, entre otras. También nos habla del aprovechamiento del agua del lago interior de la cueva: "La cueva de S'Aigo de Parelleta es un reducto natural donde circula una corriente de agua salobre, cuyo elemento fue aprovechado por los habitantes de la zona desde 1500 hasta la época islámica".

También recogen la existencia de las cuevas, a lo largo de los años, diferentes diarios menorquines, como el Bien Público en 1929, el Diari de Menorca en 1955 y más tarde, en 1985 y 2003. Tanto en la publicación de 1985 como en la de 2003 se habla del deterioro de la cueva debido al vandalismo. Como señalábamos en el apartado anterior, se hacen



Figura 1. Acceso antiguo a la cueva de s'Aigua.

prospecciones en 2004, 2005 y 2006 por especialistas del Ajuntament de Ciutadella y del Consell Insular de Menorca.

En estas últimas prospecciones se indica que, de las 7 cuevas exploradas en Cala Blanca, sólo en tres de ellas se documentaron restos arqueológicos: la cueva de S'Aigua, la cueva des Marbre y la cueva de la Rafalera (Arнау *et al.*, 2008). En la memoria de las prospecciones se indican los hallazgos de la Cueva de s'Aigua de materiales cerámicos pretalayóticos, talayóticos, púnicos, romanos, medievales y también restos humanos. La documentación de estos hallazgos se produce tanto en la zona emergida como en la sumergida. En la memoria se indica la situación espacial de los restos, documentados mediante planimetría. Espeleólogos italianos también inspeccionaron el lago de la cueva para ver el posible origen del agua y su continuación (Pfeifferv y Calo, 2003).

Hay documentación sobre unas inscripciones en la cueva des Marbre y la cueva S' Aigua (Arнау, *et al*, 2008). Según los autores, la cueva des Marbre tiene un mayor número de inscripciones legibles. Estas inscripciones datan desde el siglo XV, las más antiguas de la cueva del Màrmol, mientras que en la Cueva de s'Aigua los más antiguos datan del siglo XVI. Son inscripciones de nombres menorquines y extranjeros, sobre todo anglosajones.

En 2012 se realizó un seguimiento arqueológico de los trabajos geotécnicos en la zona de las cuevas de Cala Blanca (calle del Lago, Pasaje de los Árboles, Pasaje del Norte),



previo al proyecto para la adecuación de las cuevas para la visita, donde estaba incluida la cueva de Megaré, que se encuentra muy cercana a la Cueva de s'Aigua. Se realizaron trabajos de extracción de testigos de sondeo desde del recorrido de la cueva. Este proyecto de comunicación entre las dos cuevas (Cova de s'Aigua y Cova de na Megaré) se descartó dado la complejidad de unir dos cuevas sin que sufrieran daños en su hábitat y su estructura geológica.

En 2017 se instalaron por el Instituto Geológico y Minero de España, (en la actualidad IGME-CSIC) equipos para medir los parámetros de calidad del aire y las oscilaciones del nivel freático del acuífero, alimentados a través de un sistema eléctrico específico para este tipo de equipos.

Se realizaron unas prospecciones geofísicas en superficie, de las cuales, en 2018, los científicos del IGME-CSIC descubrieron una nueva cueva cercana a la de s'Aigua. Desde el servicio de patrimonio se realizó el control arqueológico de los trabajos del acceso vertical a esta cueva desconocida hasta el momento, que se encuentra en los jardines donde abre la boca de entrada en la cueva de s'Aigua. Hay un lago en su interior, aunque no parece que haya restos materiales ni humanos y no existía ningún acceso hasta que se realizaron los trabajos de perforación.

## **Control arqueológico durante las obras de habilitación de la cueva de s'Aigua**

El día 14 de julio de 2020 empezaron las obras de habilitación de la cueva de s'Aigua con el replanteo. La cueva de S'Aigua está situada en una zona pública de la urbanización de cala Blanca, en una plazoleta arbolada. La metodología arqueológica que aplicamos fue la de dividir los espacios en sectores, según se situaban los hallazgos de material, en una planimetría, indicando la situación espacial de los restos documentados, a partir de la zona de la entrada, donde ubicamos el sector 1.

La primera actuación que se hizo fue ampliar el acceso a la cueva. La entrada antigua era muy pequeña como se puede ver en la figura 1.

Esta se amplió durante los trabajos de habilitación para que la maquinaria tuviera acceso al interior de la cueva y también para que el acceso a visitantes fuera más ancho y cómodo, así como para poder hacer una recogida de las aguas incontroladas que en caso de lluvia entran hacia la cueva formándose barro en la entrada. Asimismo, se empezó a adecuar el exterior (figuras 2 y 3), con el fin de preparar el espacio para las visitas y la colocación de la caseta de recibimiento de visitantes.

El movimiento de tierras en el exterior fue de forma superficial. En algunos puntos se eliminó una gran cantidad de piedra caliza. Se hizo la cementación (figura 3) y, una vez preparada la zona para ubicar la caseta, comenzó a instalarse todo lo necesario para su colocación.

Se realizaron las obras de entrada a la cueva, ampliando tanto el acceso como la entrada. Fue necesario rebajar mucha cantidad de pared, pero no se observó material arqueológico. En la figura 2 se observa el planteamiento de acceso a la cueva. También se realizó el planeamiento del recorrido del interior de la cueva, por donde van las visitas. En esta zona fue donde se realizó el control arqueológico. Recordemos que no se ha



*Figura 2. Inicio de las obras de habilitación de la cueva en el exterior.*



*Figura 3. Encofrado de la zona exterior de acceso a la cueva.*

planteado ninguna excavación clásica, sólo el control del itinerario de la cueva y de las obras para realizar dicho itinerario.

El recorrido del itinerario de la cueva se transformó en un circuito circular, ya que se ha ampliado el recorrido antiguo que sólo accedía hasta el lago. La ampliación del margen derecho permite visitar un espacio nuevo en la cavidad. En un principio, y según consta en el proyecto de adecuación de la cueva de s'Aigua para las visitas, se debía de instalar un ascensor para salvar la altura del exterior hasta la cueva por personas con movilidad reducida. Finalmente, se eliminó la idea del ascensor y se optó por un acceso con una oruga que transporta a la gente con problemas de movilidad, en una silla de ruedas.

Tras el inicio de las obras del interior de la cueva se encontró casi de forma inmediata gran cantidad material arqueológico. Al finalizar de retirar las escaleras antiguas de la entrada, a dos metros de éstas, en el margen izquierdo se hallaron los primeros artefactos y restos humanos (figura 4).

Como puede apreciarse en la figura 4, se observó un relleno de tierra, piedras y material arqueológico. A este punto se asigna como Sector 1 (los sectores donde se ha encontrado material arqueológico se encuentran indicados en la planimetría de la Figura 5). El resultado es la obtención de cerámicas tanto con formas como informes: 65 fragmentos pretalayóticos, 78 talayóticos, 2 fragmentos indeterminados y huesos de fauna (vaca), así como 6 fragmentos de época islámica. Parecen restos retirados antiguamente, para hacer el relleno en el momento que se realizaron las obras de acceso con las escaleras de hormigón por parte del Ayuntamiento de Ciutadella hace varias décadas ya que, precisamente, se observaron al retirar el hormigón de las mismas.



*Figura 4. Detalle de los primeros restos humanos hallados en la Cova de s'Aigua.*

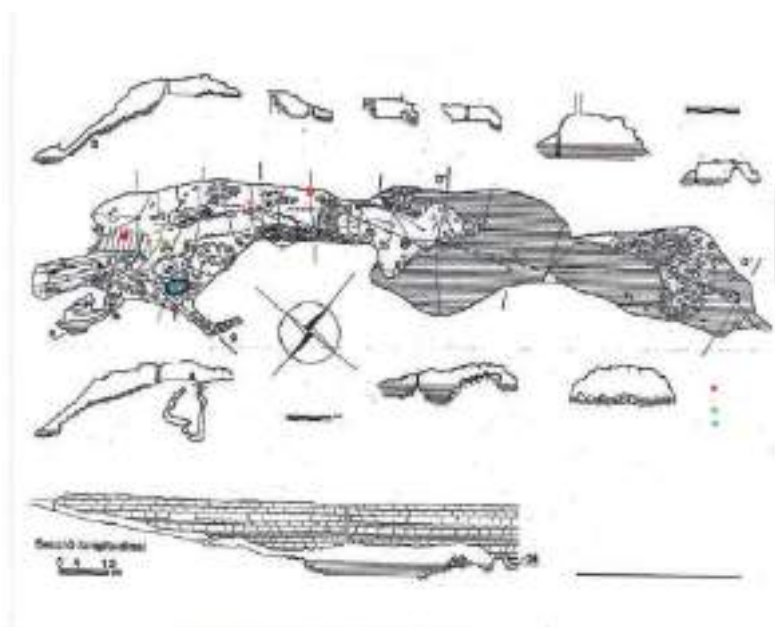


Figura 5. Punto rojo: Sector 1; Punto rosa: Sector 2; Punto verde: Sector 3; Punto azul cielo: Sector 4; Punto azul marino, Sector 5.

En el transcurso de la adecuación del camino se delimita el Sector 2 (figura 5); en el lado izquierdo, salen restos arqueológicos con sólo mover unas piedras para hacer el camino, un par de cerámicas pretalayóticas en superficie y 25 indeterminadas. Algo más adelante del sector 2 a la izquierda del camino, se ha recogido una pequeña esquirra fabricada en bronce y hierro y en buen estado. La parte del tipo de asa donde se sujeta el collar se encuentra fragmentada. Este hallazgo ha tenido lugar fuera del recorrido, pero hemos preferido recogerla por el peligro de que algún visitante pudiera retirarla.

Posteriormente, a poca distancia de la entrada de la cueva en el margen derecho, debajo de una columna estalagmítica, se ha encontrado una gran cantidad de material, entre ellos, fragmentos muy grandes de recipientes. A este punto se le denomina Sector 3. Ha sido un gran hallazgo la importante cantidad de material que se ha recuperado, posiblemente como una limpieza de la gente que vivió en la cueva. Sin una excavación clásica es complejo determinar el origen exacto. Fuera del recorrido se pueden encontrar materiales ingentes de cerámica y otros, que todavía están ocultos. En total, en este sector se han obtenido 576 fragmentos, entre formas e informes, pertenecientes al pretalayótico, con una similitud muy grande con recipientes encontrados en Cala Blanca (Plantamor, 1997). También se documentaron 848 fragmentos talayóticos entre formas e informes, 33 fragmentos informes islámicos, 5 fragmentos informes púnicos y un posible fragmento informe ibérico.

Como puede verse en la figura 6, entre los resultados de los hallazgos del sector 3 destacan: un punzón de hueso, un brazaletes de bronce, dos pequeños vasos y dos más



*Figura 6. Detalle de los restos arqueológicos recuperados; cerámicas, vasijas y restos humanos.*

que conservan sólo el perfil, un percusor de gran tamaño y un objeto dentado, que no podemos relacionar con ninguna funcionalidad. Al ser dentado puede ser un resto de arpones o azagayas

Otro sector, el 4, cuyo material es el resultado de la adecuación del suelo para bajar hacia la zona que se ha ampliado en el recorrido, ha aportado 2 fragmentos informes pretalayóticos, 9 talayóticos y 8 islámicos. Aparte de este material de los cuatro sectores, se encontró más material esparcido por el itinerario, por el camino de acceso interior. Se han recuperado 117 fragmentos informes y formas pretalayóticas, 168 talayóticos, más 13 islámicos. También en la entrada a la cueva, en el margen izquierdo, en el exterior, cuando ya prácticamente se habían terminado los trabajos, en una última limpieza se recuperaron 20 fragmentos talayóticos, 10 talayóticos y 6 islámicos, que se adscribieron como sector RAMPA.

## **Conclusiones**

El control arqueológico se ha llevado a cabo en el recorrido de las obras, es decir, en el itinerario de la cueva, el que se ha adecuado para los visitantes con un total de 140 m lineales. A medida que iban trabajando los obreros y se iba documentando el material,



*Figura 7. Imagen de uno de los restos arqueológicos in situ de los que se han podido recuperar en la cueva de S'Aigua.*

lo adscribimos al sector donde se documentaba, con la situación espacial del material. En total recogimos 812 fragmentos pretalayóticos, 1.113 talayóticos, 60 islámicos, 5 púnicos y 1 ibérico. Todo este material, sumando formas e informes, así como 51 indeterminados, Suman 2042 fragmentos. Mucha parte del material puede restituirse en piezas enteras. Se hallaron dos pequeños vasos enteros. También se encontró un brazalete de bronce, algún resto de fauna, antropología y una única pieza de malacología; también un percutor, industria ósea y una pieza dentada indeterminada.

Podemos concluir, por tanto, que existe una necrópolis al otro lado del lago, donde todavía podía haber restos antropológicos con una mínima conexión. Actualmente, podemos ver muchos restos antropológicos procedentes de la necrópolis a las aguas del lago, por desplazamiento de los huesos desde su lugar de entierro al entrar el agua hacia la zona donde están los restos o por algún expoliador que los transportó. No obstante, no existe todavía una hipótesis robusta de por qué están en el lago. Por otro lado, el otro espacio, que está cerca de la entrada de la cueva, a raíz de los restos documentados en este control arqueológico, creemos que probablemente sería un espacio de hábitat. En esta parte de la entrada se cree que podían vivir las personas que utilizaron todo el material documentado, ya que está ubicado donde había más luz. Es muy posible

que hubiera una relación con la Naveta de Cala Blanca, muy cercana a la cueva de s'Aigua, ya que los materiales cerámicos documentados en la cueva son iguales a los documentados en la naveta. Nos referimos a los materiales cerámicos recuperados en el sector 3 de la cueva, de adscripción pretalayótica, que recuerdan, sobre todo, a los grandes contenedores cerámicos, documentados por Gustau Joan y Lluís Plantalamor (1997), en las excavaciones de la naveta de Cala Blanca.

La cueva de s'Aigua, además de toda su riqueza geológica, geomorfológica y biológica es un lugar único en España desde el punto de vista arqueológico. Tanto la gran cantidad de restos que se han recolectado hasta el momento como la diversidad de los periodos a los que pertenecen, no tiene precedentes en la isla. En este sentido, destacan los periodos pretalayótico, talayótico, púnico, pero también ibero, clásico e islámico. Inclusive existen restos encontrados en el lago de la cueva, que pertenecen a periodos más recientes como el de tutela británica de la isla de Menorca.

Por todo ello, los futuros trabajos que se realicen en la cueva de s'Aigua seguramente arrojarán resultados que enriquecerán todavía más su gran valor arqueológico.

## Referencias

- Armstrong, J., (1947). *The story of the island of Minorca*. The second edition, printed, L. Davis and C. Reymers, London.
- Arnau, P., Laínez, N., Zubillaga, M., (2008). Les inscripcions de les coves de Cala Blanca: Cova de s'Aigo i Cova des Màrmol (Cala Blanca, Ciutadella de Menorca). *Endins*, 32: 139-150. Mallorca.
- Arnau, P., Laínez, N., Zubillaga, M., Gómez, D. (2008): Les coves de Cala Blanca (Ciutadella de Menorca), en *Endins* 32, 105-138. Mallorca.
- Arnau, P., Laínez, N., Zubillaga, M et alii. Memoria del estudio de las cuevas naturales de Cala Blanca. Consell Insular de Menorca, Servei de Patrimoni Històric. Entregada al Consell Insular de Menorca (*inédito*).
- Juan Benejam, G., Plantalamor Massanet, L. (1997). Memòria de les excavacions a la naveta de cala Blanca 1986-1993, *Treballs del Museu de Menorca*, 21, Conselleria d'Educació i Cultura, Comunitat Autònoma de Balears, 199 p.
- Mascaró Pasarius, J. (1966). *Monumentos Prehistóricos y Protohistóricos de la isla de Menorca*. Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid.
- Mascaró Pasarius, J., Marroquín, M (1982). Carta arqueológica del término municipal de Ciutadella. En: *Geografía e Historia de Menorca*, Tomo III.
- Obrador, A. (1973). Estudio stratigráfico y sedimentológico de los materiales miocénicos de la isla de Menorca. *Revista de Menorca*, 127-191.
- Pfeiffer, G., Calo, F. (2003). Un lago sotto le case. *Revista Sub*, 209.
- Sastre Moll, J. (1981-1984). Estudio de los materiales arqueológicos hallados en sa Cova de S'Aigo de Parelleta (Ciudadela de Menorca), *Mayurqa*, 20: 5-18
- Thomas Casajuana, J.M., Monturiol Pous J. (1951). Los fenómenos kársticos de Parelleta (Ciudadela, Menorca), *Revista de Ciencias de la Universidad de Oviedo*, (2), 69-93 (1951)





## **El Túnel de la Atlántida (Lanzarote): un patrimonio geológico sumergido de interés mundial**

Javier LARIO GÓMEZ <sup>(1)</sup>, Tamara MARTÍN POZAS <sup>(2)</sup>, Sergio SÁNCHEZ MORAL <sup>(2)</sup>, Juan Carlos CAÑAVÉRAS JIMÉNEZ <sup>(3)</sup>, Ángel FERNÁNDEZ CORTÉS <sup>(4)</sup>, Roberto CANO MUÑOZ <sup>(5)</sup>, Cecilio LÓPEZ TERCERO <sup>(6)</sup>, Álvaro ROLDÁN MONTES <sup>(7)</sup>, María Esther MARTÍN GONZÁLEZ <sup>(8)</sup>, Carlos PÉREZ MEJÍAS <sup>(9)</sup>, Hai CHENG <sup>(9)</sup>

<sup>(1)</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Madrid, España. javier.lario@ccia.uned.es

<sup>(2)</sup> Departamento de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales – CSIC, Madrid, España. tmpozas@mncn.csic.es, ssmilk@mncn.csic.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, España. jc.canaveras@ua.es

<sup>(4)</sup> Departamento de Biología y Geología, Universidad de Almería, España. acortes@ual.es

<sup>(5)</sup> Grupo de Actividades Espeleológicas de Madrid (GAEM), Spain. roberto9cano@gmail.com

<sup>(6)</sup> Machay, Madrid, España. ceci@machay.es

<sup>(7)</sup> Liquid Planet, Lanzarote, España. liquidplanet.eu@gmail.com

<sup>(8)</sup> Museo de Ciencias Naturales de Tenerife, Tenerife, España. mmartin@museosdetenerife.org

<sup>(9)</sup> Institute of Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China.

perezmegias@xjtu.edu.cn, cheng021@xjtu.edu.cn

---

### **Resumen**

El Túnel de la Atlántida, localizado en Lanzarote (Islas Canarias, España), con cerca de 2.000 m de desarrollo y 64 m de profundidad, constituye el túnel lávico sumergido más grande del mundo. Corresponde a la parte sumergida del complejo del tubo lávico del volcán de La Corona, con cerca de 10 km de desarrollo. Durante el desarrollo del Proyecto Sublántida, se han catalogado diversas formas asociadas a la formación del tubo volcánico y se ha realizado un estudio de sus sedimentos y espeleotemas, incluyendo DRX, ESEM y microscopía petrológica. Por las limitaciones del texto se presentan solamente las características geomorfológicas asociadas a la formación del tubo lávico, que por sí solas justifican la importancia como Lugar de Interés Geológico del mismo.

**Palabras clave:** geomorfología volcánica, tubo lávico sumergido, lugar de interés geológico, patrimonio geológico.

### ***The Túnel de la Átlantida (Lanzarote): a submerged geological heritage of worldwide interest***

#### **Abstract**

*The Túnel de la Atlántida, located in Lanzarote Island (Canary Islands, Spain), with a length*

*of about 2000 m and a depth of 64 m, is the largest submerged lava tunnel in the world. It corresponds to the submerged part of the lava tube complex of the La Corona volcano, with a length of about 10 km. During the development of the Sublantida Project, various forms associated with the formation of the volcanic tube have been catalogued and a study of its sediments and speleothems has been carried out, including XRD, ESEM and petrological microscopy. Due to the limitations of the text, only the geomorphological characteristics associated with the formation of the lava tube are presented, which alone justify its importance as a Geological Site of Interest.*

**Keywords:** *geological heritage, geological site of interest, submerged lava tube, volcanic geomorphology.*

## Introducción

El Túnel de la Atlántida (Lanzarote) corresponde a la parte sumergida del tubo volcánico de La Corona y está considerado el mayor tubo volcánico sumergido del mundo, con cerca de 2.000 m de desarrollo y 64 m de profundidad.

Como figuras de protección, el Túnel de la Atlántida forma parte del Monumento Natural de La Corona (Ley 12/1994, de 19 de diciembre), la Reserva Mundial de la Biosfera de Lanzarote (UNESCO, 7 de octubre de 1993) y el Geoparque Mundial UNESCO de Lanzarote y Archipiélago Chinijo (UNESCO, 17 de noviembre de 2015). Igualmente, al formar parte de los Jameos del Agua, tiene las siguientes figuras de protección: Lugar de Interés Comunitario (LIC) y Zona de Especial de Conservación (ZEC) ES7010054 Tipo E – Los Jameos (04\_LZ), Red Natura 2000 - ES7010047, Sitio de Interés Científico de Los Jameos (L-11) y Lugar de Interés Geológico-LZ06.

El tubo volcánico de La Corona- Atlántida, considerado como uno de los más espectaculares del inventario de Lanzarote y Archipiélago Chinijo, tanto por su significado geológico como por la biodiversidad única que alberga el mismo.

Un Geositio, o Lugar de Interés Geológico (LIG), es un “área que forma parte del patrimonio geológico de una región natural por mostrar, de manera continua en el espacio, una o varias características consideradas de importancia en la historia geológica de la misma” (García Cortés y Carcavilla, 2013). En el año 2007 se decretó en España la Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, la cual contemplaba la elaboración de un inventario nacional de lugares de interés geológico (IELIG).

Para ello se partía ya de toda la información recopilada anteriormente, pero su inclusión en la Ley supuso un importante hito y oportunidad de cambio en las bases metodológicas del inventario nacional (García Cortés *et al.*, 2014; García Cortés y Cabrera, 2021; Carcavilla *et al.*, 2022, 30 años de geoconservación).



Figura 1. Corte longitudinal simplificado del Túnel de la Atlántida (de Lario, 2021).

## Características geológicas del Túnel de la Atlántida

La sección principal del Túnel de la Atlántida se inicia en un pequeño lago lateral del Jameo Chico de los Jameos del Agua. Las exploraciones de los diferentes equipos espeleológicos y científicos han permitido ir reconstruyendo las características de la cavidad (Grupo Espeleológico Standard, 1981; García-Valdecasas, 1985; Ilser, 1987; Mendo y Ortega, 1988; Martínez *et al.*, 2016; Portilla y Medina, 2017; Lario, 2021), si bien hasta el Proyecto Sublántida de la UNED no se había realizado ninguna investigación geológica en el interior del Túnel de la Atlántida y, por tanto, las pocas descripciones geológicas del mismo provienen de material gráfico y descripciones de equipos espeleológicos y biólogos.

El Túnel de la Atlántida presenta dos secciones que discurren en paralelo a distintas profundidades: una sección principal (Túnel de la Atlántida) de 1.600 m de recorrido y una sección superior de menor recorrido y diámetro (Galería Superior o del Lago Escondido) de unos 390 m de desarrollo. Esta última presenta un tramo de galería aérea que asciende hacia un caos de bloques formado por el colapso de un pequeño jameo situado unos metros al este de la entrada a los Jameos del Agua, aunque no hay conexión penetrable con la superficie. La conexión ente ambas secciones se produce por tres ventanas verticales.

El tubo volcánico de La Corona se generó durante una erupción del volcán de La Corona, uno de los edificios del alineamiento volcánico La Quemada-La Corona-Los Helechos. Estos dos últimos se generaron durante episodios eruptivos hace 91.000 años, mientras que la edad de los episodios eruptivos del volcán de La Corona se ha fijado en 21.000 años (Carracedo *et al.*, 2003), coincidiendo con el LGM (Last Glacial Maximum, Último Máximo Glacial), cuando en nivel del mar estaba unos 100-120 m por debajo del actual. De este modo, todo el tubo volcánico se generó en condiciones aéreas y posteriormente, durante la trasgresión del presente interglaciar, parte de este fue inundado por el agua marina, siendo el tramo que se conoce como Túnel de la Atlántida. Tomasi *et al.* (2022) concluyen que los procesos genéticos que llevaron a la formación del sistema de tubos de lava de La Corona fueron impulsados principalmente por un proceso de inflación inicial y la posterior captura de diferentes flujos a lo largo de un conducto de drenaje principal.

El reconocimiento de diferentes morfologías y sedimentos en el Túnel permiten identificar diferentes indicadores geológicos que favorecen estudiar, por una parte, los procesos genéticos asociados a la formación de este sector del tubo lávico y, por otra, los cambios

paleoambientales y paleoclimáticos ocurridos desde el LGM hasta la actualidad, asociado a la subida del nivel del mar e inundación del tubo.

## **Elementos geomorfológicos asociados a la formación del tubo lávico**

Se presenta una breve descripción de elementos geomorfológicos singulares asociado a sucesivos flujos de lava en el interior del tubo lávico.

**Líneas de flujo:** Marcan los distintos niveles de lava que han circulado por el tubo (figura 2a).

**Grietas de contracción o retracción (*contraction cracks*):** A medida que se enfría el revestimiento acumulado dentro de un tubo, se produce una contracción y se forman grietas en las paredes y el suelo (figura 2b).

**Bloques poligonales (*polygonal blocks*):** Cuando el techo y las paredes del tubo se enfrían lentamente, se producen unas grietas de contracción en el revestimiento de las galerías que genera un patrón de bloques poligonales en techo y paredes (figura 2c).

**Bloques por rotura (*breackdown*):** Corresponden a fragmentos del techo y las paredes que se desprenden y caen al suelo. La mayoría de las rupturas se producen en la fase de enfriamiento, generándose grietas de contracción en el revestimiento del tubo que favorecen el desprendimiento de los bloques. En el Túnel de la Atlántida se localizan amplias zonas con el suelo tapizado de estos bloques, que pueden ser de tamaño decimétrico hasta varios metros de longitud y anchura. Estas acumulaciones han provocado la reducción del conducto en varios puntos, siendo los más remarcables La Sima, asociado a un desnivel de 10 m, y La Restricción, un caos de bloques que deja una pequeña apertura en la galería principal antes de la tercera conexión (figura 2d).

**Colada parietal de lava (*aprons, slipbanks*):** Literalmente denominados "delantales de lava" por Bunell (2013), lo denominamos en esta publicación coladas parietales de lava por su similitud con las coladas parietales de cavidades kársticas. Corresponde a una superficie que desciende en la galería desde las paredes de lava, pudiendo presentar en su parte distal estalactitas de fusión. Tienden a ocurrir en el borde interior de un pasaje de tubo de lava serpenteante donde la velocidad del flujo es más baja y se reduce la erosión térmica, lo que a su vez permite que se acumule más lava (figura 2e).

**Canal de erosión o banco de corte (*cutbank*):** Literalmente traducido como banco de corte, se trata de una sección cóncava de una pared de tubo formada en el borde exterior de un pasaje serpenteante. Al igual que una corriente en movimiento, un flujo de lava erosiona secciones en el borde lateral exterior de un pasaje serpenteante, donde la

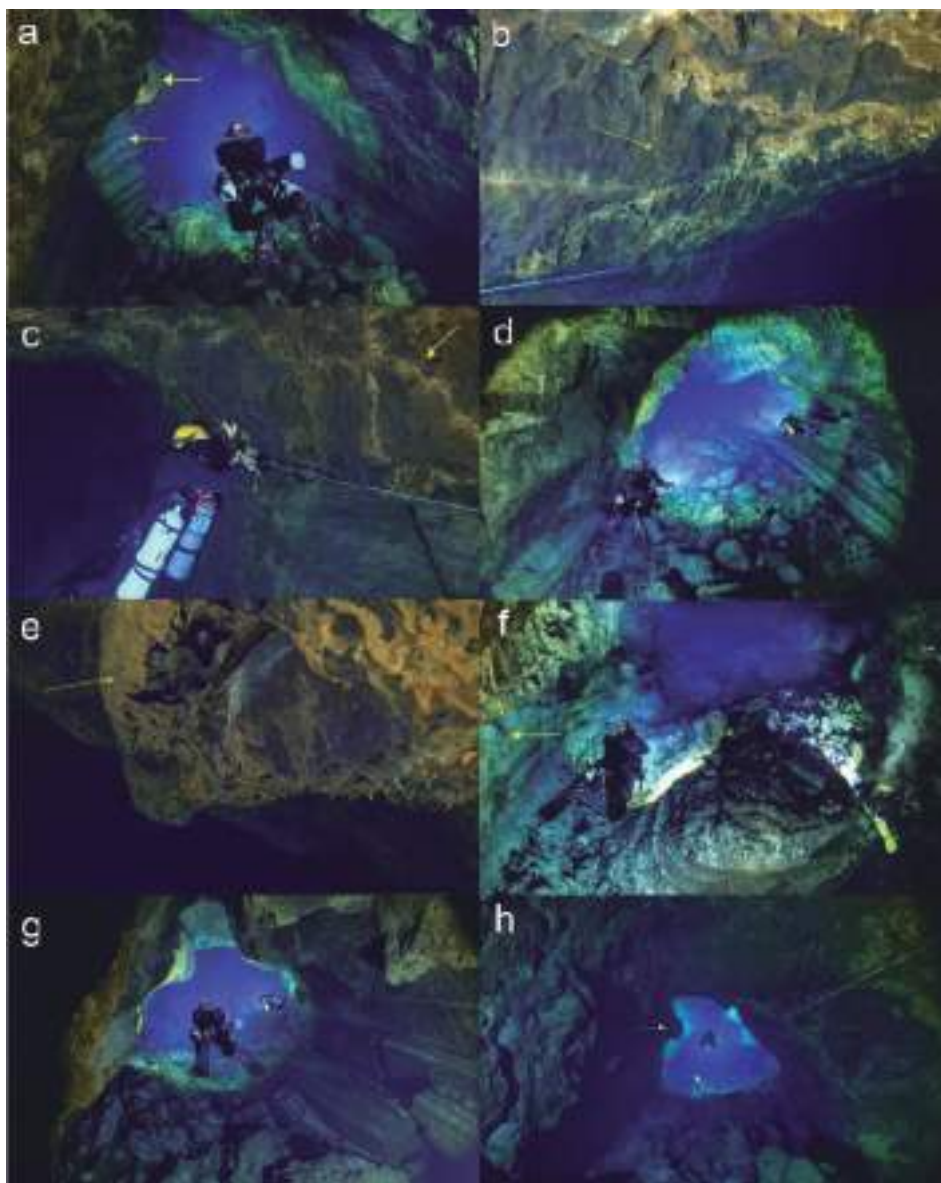


Figura 2. a) Líneas de flujo en las paredes de la galería de entrada principal. En el suelo se observan bloques desprendidos y en la pared izquierda una cornisa; b) Grietas de contracción en el techo de la galería principal, a ca. 440; c) Techo y paredes con bloques poligonales en el que las grietas están rellenas de mineralizaciones secundarias; d) Suelo tapizado de bloques por rotura. Galería principal a aprox. 200 m, buceadores mirando hacia el final de la galería; e) Colada parietal de lava con formación de una pequeña "cortina" de lava por enfriamiento de lava fundida. La base presenta estalactitas de lava; f) Canal de erosión en la galería superior; g) Terraza localizada a la izquierda de la galería principal a ca. 220 m. La ruptura, asociada a una grieta de contracción, permite observar su sección cuadrangular. La sección de la galería indica un encajamiento por erosión térmica; h) Cornisa en la pared izquierda de la galería de entrada. Nótese las líneas de flujo cerca del suelo de la galería.

fuerza erosiva es mayor porque la velocidad y la turbulencia son más altas aquí. Hay pruebas contundentes de que el medio principal de erosión es la erosión térmica (fusión) y no la erosión mecánica. Creemos que, por su origen, se puede denominar canal de erosión (figura 2f).

Terrazas, bancos, andenes, bordillos (*flow ledge, shelves, crubs*): Las terrazas a menudo se encuentran a lo largo de las paredes de pasajes sinuosos de tubos de lava, y generalmente tienen una sección transversal algo cuadrangular, uniendo paredes y suelo. Se pueden denominar también bancos, andenes o bordillos, marcan los distintos niveles de estabilización del flujo lávico y se originan como consecuencia del enfriamiento lateral del flujo magmático (figura 2g).

Cornisas: Cuando las terrazas aparecen adheridas solo a las paredes, se denominan cornisas o repisas (figura 2h). Para la formación de cornisas es necesario o bien un enfriamiento muy rápido de la lava o un descenso brusco y acentuado del nivel de lava que circula por la galería, mientras que para la generación de terrazas basta un descenso mínimo o un enfriamiento lento (Doniz *et al.*, 2007).

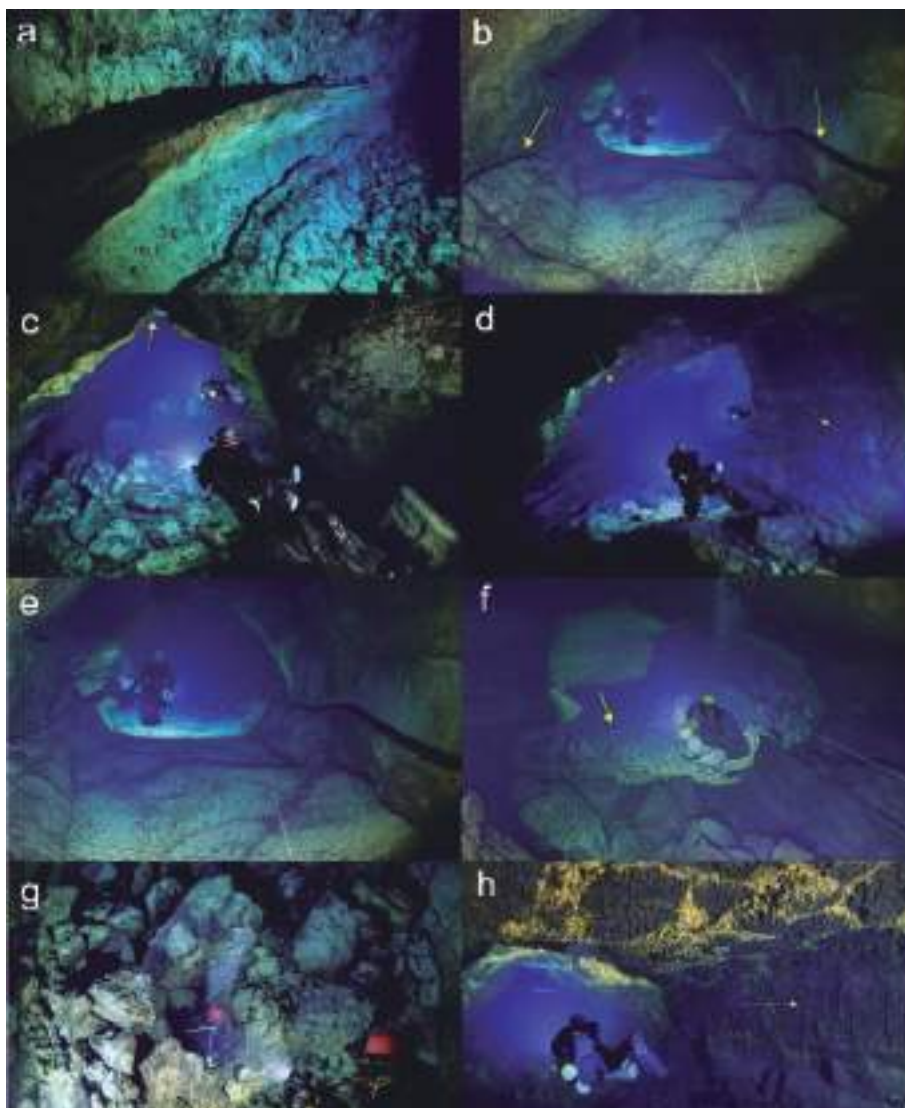
Canalones (*gutter*): Corresponde a una depresión alargada que corre a lo largo de la galería entre el muro y un dique (figura 3a).

Diques (*levee*): A medida que una corriente de lava se mueve a través de un tubo existente, los lados tienden a enfriarse primero y crean un remanente vertical independiente a lo largo del borde. Su altura aumenta por salpicaduras y espuma, o fragmentos de lava solidificada, y la parte superior es a menudo irregular. El borde interior suele ser liso, pero puede mostrar ranuras o líneas de flujo. A menudo, los diques se asocian con canalones, que se forman entre el dique y la pared del tubo (figura 3b).

Cúpulas (*cupola*): Una elevación en forma bóveda de media esfera en el techo de un tubo de lava se denomina cúpula. Estas a veces se encuentran en pasajes de niveles inferiores debajo de las ventanas que se han sellado, o pueden ser causados por la rotura de un punto en el techo (figura 3c).

Revestimientos: A medida que los flujos sucesivos pasan a través de un tubo establecido, pueden acumular material en las paredes en capas delgadas llamadas revestimientos. A veces, pueden verse hasta una docena de capas distintas donde se ha caído un gran trozo de pared. Las capas individuales también pueden desprenderse para convertirse en delgadas placas de degradación, tipificadas por una superficie que es lisa y quizás muestra un esmalte, mientras que la primera superficie interior tiende a ser más rugosa y espumosa (figura 3d).

Pavimentos (*settled crust*): Cuando la lava se acumula, como en un lago de lava, la parte superior se enfría primero y forma una costra. El material fundido de abajo puede luego



*Figura 3. a) Canales y levees generados en las paredes del Túnel de la Atlántida; b) Levees y canales limitando un "canal en un tubo" en la galería STD del sector superior, con una terraza adosada al dique. En el suelo se puede observar morfología en pavimento con lavas cordadas. A mayor altura se observan revestimientos en las paredes correspondientes a una fase anterior de flujo; c) Cúpula en el techo de la galería de entrada; d) Revestimientos en las paredes y techo de la galería principal; e) Suelo en pavimento, formado por bloques de lavas cordadas fragmentados. Su origen se puede deber a una acumulación de lava tipo lago de lava, de menores dimensiones (que aquí denominaremos charca de lava o lava pond). La dirección de las lavas cordadas muestra un "rebasamiento" hacia la ventana 3 que conecta con la galería principal; f) Suelo tipo coliflor en la galería principal ca. 450 m; g) Ventana 1 entre la galería del Lago Escondido y la galería principal; h) Láminas en la pared derecha de la fotografía, aprox. a 400 m. Nótese el techo formado por bloques poligonales y las mineralizaciones secundarias favorecidas por las grietas de contracción. El lento enfriamiento favorece también la formación de estalactitas en diente de tiburón.*

moverse, o simplemente encogerse durante el enfriamiento, y la corteza sin soporte puede colapsar por su propio peso. En este trabajo lo hemos denominado *pavimento* (figura 3e).

Suelo tipo coliflor (*cauliflower aa lava*): Es muy común que los tubos de lava tengan una superficie áspera, irregular y espumosa que es una transición entre un *pahoehoe* liso y rugoso (también común en los suelos de los tubos) y un *aa* puro (que es inusual en los suelos de los tubos). Puede incluir trozos de descomposición y trozos rotos de estalactitas. La forma de coliflor es un suelo sólido, mientras que los suelos con fragmentos sueltos de lava rugosa (en contraposición a la descomposición) se denominan suelos de *clinker* (figura 3f).

Tubo en un tubo (*tube-in-tube*) y canal en un tubo: A medida que una corriente de lava se mueve a lo largo del piso de un tubo existente, puede formar una costra aislante, tal como ocurre en la superficie para formar tubos de lava. De hecho, los tubos pequeños como estos también son comunes en los flujos de lava de *pahoehoe* superficiales. Si el nuevo techo no se cierra completamente, aparece una morfología de canal en un tubo.

Ventana (*window*): Corresponde a una abertura entre distintos niveles o galerías de un tubo volcánico (figura 3g). En algunos casos, bajo un flujo de lava sostenido, el proceso de formación de la cúpula podría romper el techo creando una ventana hacia un eventual tubo superior (Tomasi *et al.*, 2022).

Cuchillas o láminas (*blades*): Las láminas de lava son proyecciones de la pared que tienden a ser paralelas y espaciadas regularmente. Se clasifican de fino a grueso, y los bordes pueden ser lisos o rugosos (figura 3h).

Cañón (*canyon*): Formado por el progresivo encajamiento del tubo debido principalmente a erosión térmica, probablemente cuando ya solo existía el tubo principal (figura 4a).

El siguiente grupo de morfologías incluye las estalactitas de lava que, al contrario de las de medios karsticos, no son formas de precipitación, sino que se producen por escape de gas o por acreción a partir de diferentes flujos de lava (Bunell, 2013).

Helictitas o estalactitas excéntricas de lava (*tubular lava helictites*): Las helictitas son una forma excéntrica o "vermiforme" de estalactita que se retuerce y gira en lugar de crecer hacia arriba y hacia abajo. Por lo general, comienzan como estalactitas de lava tubulares, pero la cristalización de la lava emergente a medida que se enfría empuja la lava en diferentes direcciones (figura 4b)

Estalactitas tubulares de lava (*tubular lava stalactictites*): Las estalactitas de lava tubulares son comunes en muchos tubos de lava y tienen una forma tubular concéntrica, son (inicialmente) huecas y varían en diámetro de 0.4 a 1 cm. Están formados por "segregaciones extruidas al expandir el gas en los pasajes de las cuevas" (Allred y Allred,



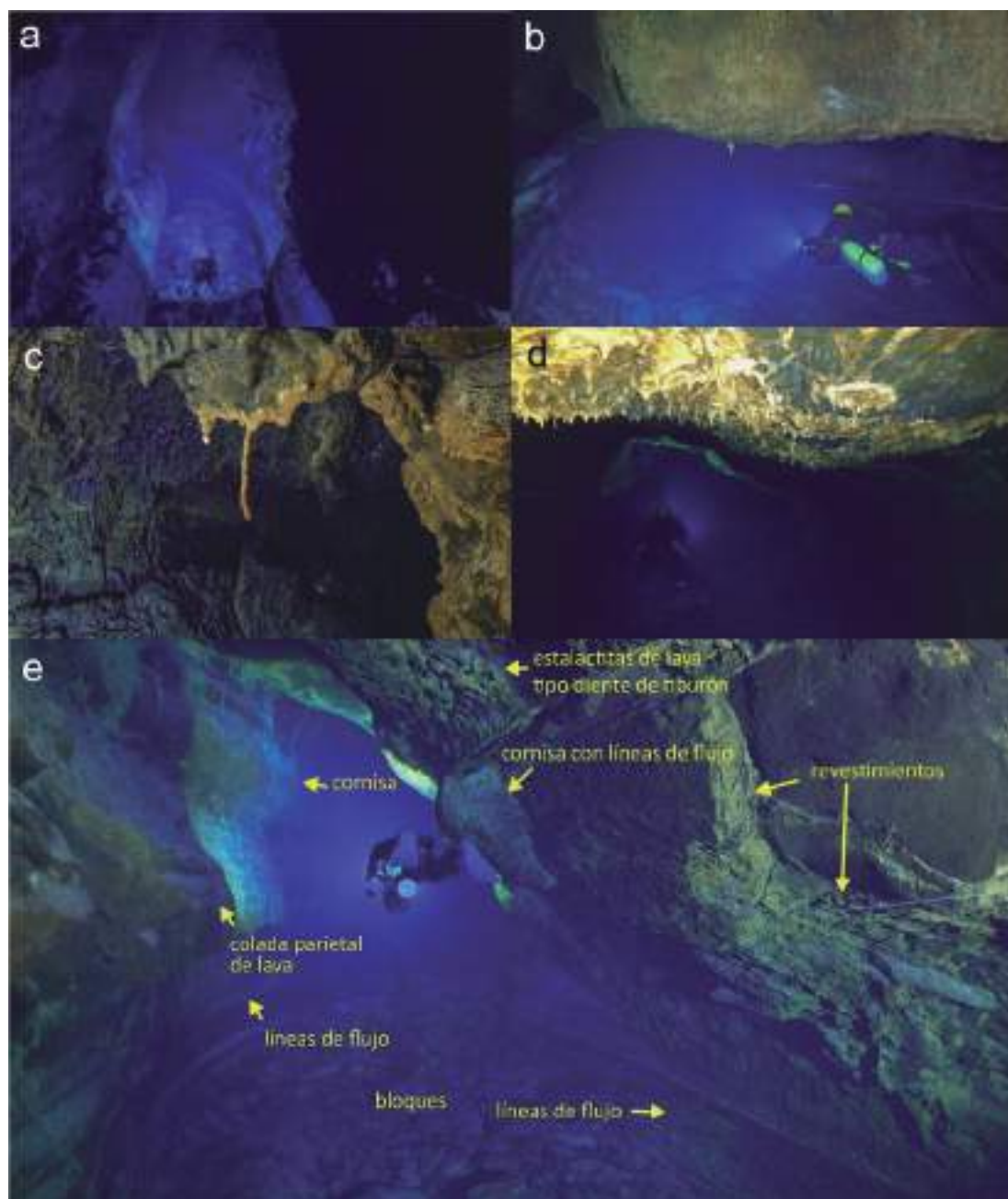


Figura 4. a) Cañón de 18 m de altura en la galería principal a ca. 650 m, las terrazas inferiores a ambos lados de la galería marcarían el último flujo de lava; b) Helictita de lava en la galería principal a ca. 400 m; c) Estalactitas tubulares de lava a unos 450 m; d) Estalactitas en diente de tiburón. A favor de las grietas de retracción se han producido mineralizaciones secundarias; e) Múltiples características geomorfológicas en una sección del Túnel de la Atlántida (galería de entrada).

1998) a medida que el tubo de lava se enfría. En las paredes de enfriamiento de la cueva, algunos minerales se solidifican primero, formando una matriz porosa y gruesa (figura 4c).

Estalactitas de diente de tiburón (*sharktooth stalactites*): A diferencia de las estalactitas de lava tubulares, que se extruyen por los gases que escapan, la estalactita de diente de tiburón crece por acreción. En la mayoría de los casos, a medida que fluctúa el nivel de lava que fluye dentro de un tubo activo, cubre las protuberancias del techo con una fina capa de lava. La protuberancia original pudo haber sido un pequeño goteo formado cuando el techo fundido se enfrió. Esto da como resultado una estalactita ancha, que generalmente se estrecha hasta un punto. Una sección transversal de dicha estalactita mostrará capas sucesivas, al igual que los conductos de los tubos contienen revestimientos que pueden tener varias capas de espesor a partir de flujos sucesivos (figura 4d). Muchos de estos tipos de estalactitas presentan una mineralización secundaria formada principalmente por carbonato cálcico, aunque también existen otros minerales. Los mismos se han formado en condiciones vadosas, posteriormente al enfriamiento del tubo y previo a la intrusión del agua marina. El análisis de estos espeleotemas puede ofrecer valiosos datos para el estudio de la subida del nivel del mar en esta zona desde el último máximo glacial.

## **El Túnel de la Atlántida como LIG de interés geomorfológico**

Como se ha comentado, el tubo volcánico de La Corona se sitúa en el Geoparque Mundial UNESCO de Lanzarote y Archipiélago Chinijo. Los Geoparques Mundiales de la UNESCO son territorios que se benefician de un patrimonio geológico destacado como recurso para favorecer las poblaciones locales, que es el eje fundamental de una estrategia de desarrollo socioeconómico, a través de proyectos educativos, geo-turísticos y de conservación de la geodiversidad. En este Geoparque se han inventariado 68 lugares de interés geológico (LIG), entre terrestres y marinos, con alta singularidad y representatividad, 13 de ellos con relevancia internacional. Respecto a este inventario, encontramos dos catálogos diferentes donde se encuentra el Túnel de la Atlántida. Por una parte, el Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG), mantenido por el IGME, donde se recoge el mismo siguiendo el criterio de denominación del dominio geológico (en este caso IC-Islands Canarias), un código numérico y un sistema unificado de nomenclatura de los LIG que asigna un nombre formado por tres términos: (1) la descripción del elemento o proceso que constituye el tipo de interés principal, (2) la edad (periodo) del rasgo, elemento o proceso y (3) la referencia geográfica a su ubicación (Vegas *et al.*, 2011; García-Cortés *et al.*, 2014; García-Cortés y Cabrera, 2021; Carcavilla *et al.*, 2022).

De este modo, este LIG se registra como IC-1011- Tubo volcánico pleistoceno del volcán de La Corona-La Atlántida, otorgándole un interés principal volcanológico. Como se ve, si bien el tubo volcánico total es el de La Corona, ya se presenta la parte sumergida, el Túnel de la Atlántida, como una singularidad individualizada dentro del mismo.

Por otra parte, con motivo de la presentación de la Candidatura de Lanzarote y el Archipiélago Chinijo a la Red Europea de Geoparques en el año 2013, se realizó un

nuevo inventario, más preciso que los anteriores, elaborando un listado de los LIG para Lanzarote, el Archipiélago Chinijo y la plataforma de abrasión asociada al contorno de los territorios emergidos, inventariándose un total de 68 Lugares de Interés Geológico, de los que 49 corresponden a territorios emergidos y 19 a sumergidos (Mateo, 2015). Aunque se utilizó la metodología propuesta por el IGME para el IELIG (García-Cortés *et al.*, 2014), el Túnel de la Atlántida aparece con dos códigos y nomenclaturas diferentes a los propuestos en el IELIG. Como LIG emergido, se denomina LZ06-Tubo Volcánico La Corona-Atlántida, habiéndose suprimido el dominio geológico y la edad del LIG, pero, una vez más, singularizando la sección sumergida del tubo volcánico. Como LIG sumergido aparece como MR15-Tubo Volcánico de La Atlántida.

En una revisión de los LIG sumergidos del Geoparque de Lanzarote y Archipiélago Chinijo (Galindo *et al.*, 2017) se presentan 17 LIG submarinos, incluyendo el Tubo Volcánico de La Atlántida (o Tubo Volcánico La Corona-Atlántida, tiene las dos denominaciones), sin ningún código de dominio geológico ni de inventario, asignándole un valor volcanológico y paleoclimática, pero sin definir ninguna característica geológica del mismo.

Posteriormente (Galindo *et al.*, 2019), en una recopilación de los LIG submarinos de Lanzarote, se vuelve a denominar LZ06- Túnel de la Atlántida, desapareciendo en este caso la denominación del Tubo volcánico de La Corona.

Todas estas denominaciones pueden provocar equívocos y se debería unificar en un código y nombre único, independientemente que se incluya en inventarios nacionales o locales. En este caso se ha presentado un catalogo de elementos geomorfológicos sumergidos asociados a la formación del tubo volcánico que por sí mismos justifican el singularizar el Túnel de la Atlántida como un LIG en sí mismo.

En próximas publicaciones se presentarán evidencias sedimentológicas y mineralógicas, así como una reconstrucción paleoambiental y paleoclimática que aportará datos para proponer el Túnel de la Atlántida como un LIG individualizado.

## Agradecimientos

Este trabajo forma parte del Proyecto CGL2017-91218-EXP, financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España.

## Referencias

- Allred, K., Allred, C. (1998). Tubular lava stalactites and other related segregations. *Journal of Caves and Karst Studies*, 60: 131-140.
- Bunnell, D. (2013). Caves of Fire: Inside America's Lava Tubes. *National Speleological Society* (ed.).
- Carracedo, J.C., Singer, B., Jicha, B., Guillou, H., Rodríguez-Badiola, E., Meco, J., Pérez-Torrado, F.J., Gimeno, D., Socorro S., Láinez A. (2003). La erupción y el tubo volcánico del volcán Corona (Lanzarote, Islas Canarias). *Estudios Geológicos*, 59: 277-302. <https://doi.org/10.3989/egeol.03595-6104>.

- Carcavilla, L., Cabrera, A., Díez-Martínez, E., Luengo, J., Vegas J. (2022). Treinta años de geoconservación en España. *Museología e Patrimonio*, 15: 54-82.
- Dóniz-Páez, J. Coello, E., Romero, C., Guillén, C. (2007). Valoración del patrimonio geomorfológico del tubo volcánico de Montaña del Castillo (Tenerife, Canarias). *Minius*, XV: 85 -96
- Galindo et al., (2017). Resultados preliminares del inventario de lugares de interés geológico submarinos del Geoparque Mundial UNESCO de Lanzarote y Archipiélago Chinijo. In: *J. Afonso-Carrillo (Ed.), Investigando el mar: viaje al planeta agua*, pp. 15-40. *Actas X II Semana Científica Telesforo Bravo*.
- Galindo,, I., Romero C., Llorente, M., Rubio, J.C., Díaz, G.A., Sánchez, N., Martín-González, E., Mangas, J., Vegas, J. (2019). Geoheritage in the Shallow Submarine Slopes of an Oceanic Volcanic Edifice: A New Option for Diving Geotourism. In: *Mateo, E., Martínez-Frías, J., Vegas, J. (eds.) Lanzarote and Chinijo Islands Geopark: From Earth to Space. Geoheritage, Geoparks and Geotourism*. Springer, Cham., pp.85-98.
- García-Cortés, A. Carcavilla, L. (2013). Documento metodológico para la elaboración del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG). *Instituto Geológico y Minero de España*. 64 pp.
- García-Cortés, A., Carcavilla, L, Díaz-Martínez, E., Vegas, J. (2014). Documento metodológico para la elaboración del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG). *Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Economía y Competitividad*., Madrid. Versión 16, 72 pp.
- García-Cortés A., Cabrera A.M. (2021). El inventario español de lugares de interés geológico (IELIG): Metodología y reflexiones para su futura actualización. *De Re Metallica*, 36: 53-68.
- García-Valdecasas, A. (1985). Estudio faunístico de la cueva submarina "Túnel de la Atlántida", Jameos del Agua, Lanzarote. *Naturalia Hispánica*, 27: 1-56.
- Grupo Espeleológico Standard (1981). Memoria Expedición del Grupo Standard al "Túnel Atlántida". *Inédito*.
- Ilser, O. (1987). Expédition internationale 1986 au tunnel de l'Atlantida: Canaries. *Spelunca Bulletin*, 25: 25-30.
- Lario, J. (2021). El Túnel de la Atlántida (Lanzarote): Características geomorfológicas y sedimentológicas. *Informe interno para el Geoparque Mundial UNESCO Lanzarote y Archipiélago Chinijo*, 37 pp.
- Martínez, A., González, B.C., Núñez, J., Wilkens, H., Oromí, P., Iliffe, T., Worsaae, K. (2016). Guía interpretativa de los ecosistemas anquialinos de los Jameos del Agua y Túnel de la Atlántida. *Cabildo de Lanzarote (ed.)*, 306 pp.
- Mateo-Mederos, E. (2015). La gestión del Patrimonio Geológico de Lanzarote. In: *J. Afonso-Carrillo (ed.), Lanzarote: naturaleza entre volcanes*. Actas X Semana Científica Telesforo Bravo, pp. 87-118.
- Mendo, A., Ortega, L. (1988). El Túnel de la Atlántida: Retorno a la Prehistoria. *Geo*, 14: 9-25.
- Portilla, C., Medina, J. (2017). Exploraciones en el Túnel de la Atlántida. *T&A Travel*, <https://traveltya.es/espeleobuceo-en-el-tunel-de-la-atlantida/>
- Tomasi, I., Massironi, M., Meyzen, C.M., Pozzobon, R., Sauro, F., Penasa, L., Santagata, T., Tonello, M., Santana Gomez, G.D., Martínez-Frías (2022). Inception and evolution of La Corona lava tube system (Lanzarote, Canary Islands, Spain). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127: e2022JB024056.
- Vegas, J., Lozano, G, García-Cortés, A., Carcavilla, L., Díaz- Martínez, E. (2011). Adaptación de la metodología del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico a los inventarios locales de patrimonio geológico: municipio de Enguیدanos (Cuenca). Avances y retos en la conservación del Patrimonio Geológico en España. Actas de la IX Reunión Nacional de la Comisión de Patrimonio Geológico, Sociedad Geológica de España, pp. 271-276.

# Exploración y detección de flujos de calor en el entorno de la Cueva de Nerja (Málaga) mediante sensores térmicos aerotransportados

Cristina LIÑÁN BAENA <sup>(1,2)</sup>, Lucía OJEDA RODRÍGUEZ <sup>(2)</sup>, Alain BRAVO VALENTÍN <sup>(3)</sup>, Iñaki VADILLO PÉREZ <sup>(2)</sup>, Yolanda Del ROSAL PADIAL <sup>(1)</sup>, José BENAVENTE HERRERA <sup>(4)</sup>, Luis-Efrén FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ <sup>(1,5)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto de Investigación Fundación Cueva de Nerja. cbaena@cuevadenerja.es, yolanda@cuevadenerja.es

<sup>(2)</sup> Departamento de Geología. Universidad de Málaga. luciaor@uma.es, vadillo@uma.es

<sup>(3)</sup> Cruz Roja Española. C/ Zabale 6, 48220 Durango (Vizcaya). alain.bravo@cruzroja.es

<sup>(4)</sup> Departamento de Geodinámica. Universidad de Granada. jbenaven@ugr.es

<sup>(5)</sup> Director-Conservador de la Cueva de Nerja. conservador@cuevadenerja.es

---

## Resumen

La aplicación de diversas técnicas geofísicas en el entorno de la Cueva de Nerja ha evidenciado la existencia de múltiples oquedades en el macizo carbonático en el que ésta se desarrolla. Entre ellas, la de mayor entidad por su mínimo gravimétrico residual se sitúa al Noroeste de la Cueva de Nerja. La proximidad de este mínimo gravimétrico a las salas interiores de la cueva, donde se observan patrones de temperatura desligados del resto de la cavidad, nos permite afirmar que este volumen de aire ejerce una gran influencia en la atmósfera de la cueva. La existencia de esta oquedad de grandes dimensiones se ha probado mediante técnicas geofísicas y atmosféricas. Hasta la fecha, las exploraciones en superficie no han encontrado conexiones espeleológicas de esta cueva con el exterior. Estas exploraciones se ven dificultadas por lo agreste del entorno (altas pendientes y vegetación densa) por lo que se llevó a cabo una campaña de exploración con sensores térmicos aerotransportados (drones) que permitieran detectar puntos de emanaciones de aire más caliente del interior de la Cueva (20-21 °C). La campaña se llevó a cabo en colaboración con personal y equipo de la Cruz Roja Española entre los días 26 y 28 de noviembre de 2021. Esta fecha fue la elegida para que la diferencia térmica entre el exterior y el interior fuese máxima y se aumentaran las posibilidades de detectar emanaciones de aire más cálido del interior del macizo. La campaña requirió una planificación de vuelos digitales diurnos para escanear el terreno, cubrir con fotogrametría toda la zona a explorar y ajustar y programar el sector de vuelo, los nodos de inicio y final de ruta y una altura fija al suelo. La recogida de información térmica se inició en el mínimo de temperatura exterior del día 27 de noviembre (05:00 am) y finalizó a las 08:30 am del mismo día, completándose la toma de datos durante la madrugada del día siguiente, en un horario similar. El tratamiento de la ingente cantidad de información espacial (imágenes de alta resolución, información térmica, procesado y acoplado de las imágenes en 3D, renderización, entre otros procesos informáticos) requirió de centenares de horas de procesado de CPU. Entre los resultados a destacar, se constatan anomalías térmicas evidentes que servirán de punto de partida para reconocer posibles puntos de acceso espeleológico en posteriores campañas de campo.

**Palabras clave:** dron, Cueva de Nerja, sensores térmicos , ventilación.

## ***Exploration and detection of heat flows in the area surrounding the Nerja Cave (Málaga) by means of aerotransported thermal sensors.***

### **Abstract**

*The application of various geophysical techniques in the area around Nerja Cave has revealed the existence of multiple cavities in the carbonate massif in which it is located. Among them, the most important due to its residual gravimetric minimum is located northwest of Nerja Cave. The proximity of this gravimetric minimum to the cave rooms, where we observe temperature patterns that are not linked to the rest of the cave, allows us to affirm that this air volume greatly influences the cave atmosphere. Geophysical and atmospheric techniques have proved the existence of this large cavity. To date, surface explorations have found no speleological connections between the cave and the outside. These explorations are made difficult by the rugged environment (high slopes and dense vegetation), so an exploration campaign was carried out using airborne thermal sensors (drones) to detect points of warmer air emanations from the interior of the cave (20-21 °C). The campaign was carried out with staff and equipment from the Spanish Red Cross between 26 and 28 November 2021. This date was chosen to maximise the thermal difference between the exterior and the interior and increase the chances of detecting warmer air emanating from the interior of the massif. The campaign required the planning of digital daytime flights to scan the terrain, cover the whole area to be explored with photogrammetry, and adjust and programme the flight sector, the start and end nodes of the route, and a fixed height to the ground. The collection of thermal information began at the minimum outdoor temperature on 27 November (05:00 am) and ended at 08:30 am on the same day, completing the data collection during the early hours of the following day at a similar time. Processing a huge amount of spatial information (high-resolution images, thermal information, processing and coupling of the 3D images, rendering, among other computer processes) required hundreds of hours of CPU processing. Among the results, there are evident thermal anomalies that will serve as a starting point to recognise possible speleological access points in subsequent field campaigns.*

**Keywords:** *Nerja Cave, thermal sensors, drone, ventilation.*

## **Introducción**

La Cueva de Nerja es una importante cueva patrimonial y turística, con una media de unos 485.000 visitantes al año. Tiene un desarrollo topográfico de unos 5 km, y un volumen aproximado de 300.000 m<sup>3</sup>. Tiene tres entradas principales, dos torcas sub-

circulares con un diámetro de 1 y 6 m, localizadas a 161 y 162 m s.n.m. (S.E.M., 1985), y una entrada principal, actualmente habilitada para la entrada de los turistas, con unos 12 m<sup>2</sup> de superficie y que se sitúa a una cota de 158 m s.n.m. Alrededor de un tercio de la cueva, las denominadas Galerías Turísticas, está abierto a la visita desde 1960, mientras que el resto del cavernamiento, las Galerías Altas y Galerías Nuevas, solo son accesibles para estudios científicos y actividades de conservación.

La cavidad está conectada físicamente con Cueva Pintada, una cavidad de menor tamaño localizada al NE de la Cueva de Nerja, cuya entrada se sitúa a una cota de 250 m s.n.m (figura 1). Ambas cuevas se desarrollan en la zona no saturada del acuífero carbonatado de Sierra Almijara (Pérez y Andreo, 2007), constituido por mármoles dolomíticos altamente fracturados de la Unidad Almijara, y pertenecientes al Complejo Alpujárride de la Cordillera Bética.

Aunque la conexión entre ambas cuevas y el importante papel que juega Cueva Pintada en la ventilación del sistema kárstico se conoce desde hace varios años (Liñán y del Rosal, 2015; Liñán *et al.*, 2018), la localización de la misma es desconocida hasta la fecha, y previsiblemente no practicable desde el punto de vista espeleológico.

En el entorno de la Cueva de Nerja existen otras cavidades, sin acceso conocido desde el exterior pero que han sido detectadas mediante la observación directa, a través de cámaras introducidas en sondeos (Vadillo *et al.*, 2012), o de métodos indirectos, como la microgravimetría y la tomografía eléctrica de resistividad (ENADIMSA, 1991, 1992; Martínez-Moreno *et al.*, 2021). Alguna de estas cuevas conectan físicamente con la Cueva de Nerja, como indican los estudios microclimáticos realizados (Liñán *et al.*, 2020), además de otras evidencias faunísticas (Castillo *et al.*, 2021), microbiológicas (Jurado *et al.*, 2021), geomorfológicas y geofísicas (Martínez-Moreno *et al.*, 2021). Estos últimos autores establecen que en las laderas del cerro denominado Fuente Perro, ubicado al NO de la Sala de la Montaña, la sala más interna de la Cueva de Nerja, se localizan dos cavidades de grandes dimensiones (área azul, figura 2) y que estarían conectadas —al menos una de ellas— con el sector no visitable de la Cueva de Nerja, además de con el medio exterior, de acuerdo con los datos microclimáticos registrados en la Cueva de Nerja (Liñán *et al.*, 2018, 2020). Así, el tamaño del cavernamiento de la Cueva de Nerja superaría al actualmente conocido. Sin embargo, las características orográficas de la zona y la presencia de vegetación densa en algunas laderas de dicho cerro, impiden o dificultan el acceso y reconocimiento directo del terreno y, por tanto, la localización de las posibles entradas/salidas de los flujos de aire que circulan entre el exterior y el medio subterráneo y, en definitiva, de las conexiones entre el exterior y estos cavernamientos. Estas conexiones son de gran influencia en la circulación del aire y en la ventilación del conjunto del sistema kárstico, por lo que su localización y estudio resulta de gran interés para la conservación de la cavidad.

Según el modelo de ventilación natural de la Cueva de Nerja (figura 1), durante el período de invierno la temperatura exterior es notablemente más baja que la temperatura del aire subterráneo, de forma que los flujos de aire exterior tienden a entrar en el subsuelo por las entradas de la Cueva de Nerja, ubicadas a menor cota (entre ellas, las

torcas y la entrada turística). Al circular por el subsuelo, el aire se calienta y disminuye su densidad, de forma que este aire más cálido sale al exterior por las conexiones situadas a cotas más altas de la sierra, entre las cuales se incluye Cueva Pintada (250 m s.n.m) pero también otras cuevas conectadas con el exterior, cuyas entradas (o posibles entradas) son actualmente desconocidas.

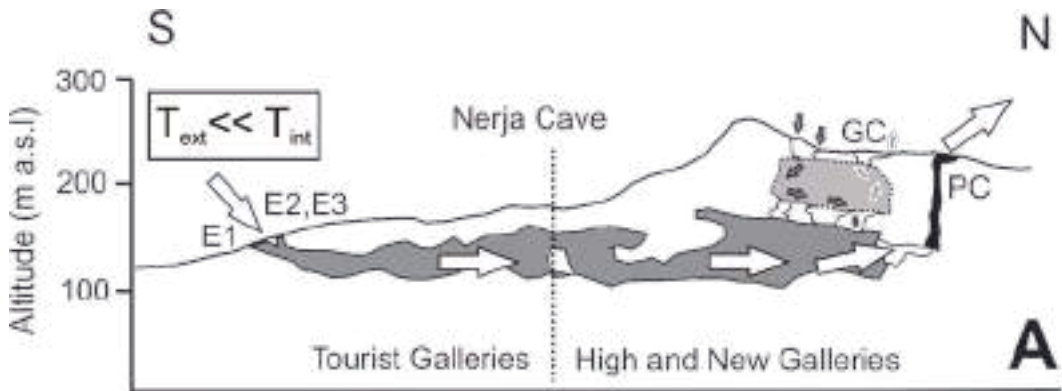


Figura 1. Modelo de ventilación de la Cueva de Nerja y otras cavidades anexas durante el mes de noviembre. Leyenda: PC- Cueva Pintada, GC- Cueva detectada mediante técnicas geofísicas, E1- entrada turística, E2 y E3- torcas,  $T_{ext}$ - temperatura del aire exterior,  $T_{int}$ - temperatura del aire subterráneo. Las flechas señalan el sentido de los flujos de aire. (Modificado de Liñán et al., 2020).

En este contexto, se ha planificado y realizado una campaña de trabajo para la exploración y detección de flujos de calor en el entorno de la Cueva de Nerja (Málaga), mediante sensores térmicos aerotransportados, durante los días 26 al 28 de noviembre de 2021. El objetivo principal de la campaña de investigación ha sido el reconocimiento aéreo y la toma de ortofotos térmicas aéreas de alta resolución sobre un área previamente definida en función de los datos científicos disponibles, la cual incluye la Cueva de Nerja, la Cueva Pintada y otras áreas en las que se han detectado previamente mínimos gravimétricos (figura 2). De particular interés es volar el dron por encima de la principal anomalía gravimétrica de la zona, localizada al NO de la Cueva de Nerja, para localizar posibles accesos al cavernamiento que señala dicha anomalía, conectado a su vez con la Cueva de Nerja, así como volar el dron por encima de la cueva conocida, ya que existen indicios de posibles nuevas conexiones entre el exterior y algunas de sus salas, como se ha comentado previamente.

## Metodología

Los trabajos se han desarrollado de forma conjunta entre los investigadores de las universidades de Málaga y Granada, del Instituto de Investigación de la Cueva de Nerja y la unidad de drones de Cruz Roja Española, operadora de drones registrada en los archivos de la autoridad aeronáutica española AESA. La aeronave empleada en los vuelos fue la denominada DJI MAVIC 2 ENTREPRISE, dotada de cámaras óptica y térmicas de alta resolución (M2EA) y con un peso máximo de 1,1 kg. Se trata de un dron equivalente



al marcado C2 previsto en el Reglamento Delegado (UE) 2019/945 de la Comisión, de 12 de marzo de 2019, sobre los sistemas de aeronaves no tripuladas y los operadores de terceros países de sistemas de aeronaves no tripuladas. La aeronave está dotada de sensores por todos sus lados para evitar colisiones y de luces estroboscópicas para dar alta visibilidad al dron desde todas las perspectivas.

En todo momento se siguió la normativa aeronáutica para las operaciones en el escenario abierto tal y como se contemplan en el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 de la Comisión de 24 de mayo de 2019 relativo a las normas y los procedimientos aplicables a la utilización de aeronaves no tripuladas. Los trabajos fueron previamente autorizados por la Consejería Competente (Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible), previa solicitud por parte del Instituto de Investigación de la Cueva de Nerja.

Antes del vuelo se realizó una planificación de la campaña, mediante el *software* avanzado de planificación UgCS, al objeto de realizar la captura del polígono de vuelo seleccionado, cuya superficie total fue de 42 ha. Se establecieron cuatro misiones de vuelo con una duración aproximada de cuatro horas que, a su vez, contemplaban ocho cambios de batería.

Durante el primer día de la campaña de trabajo (26 de noviembre) se realizó un vuelo diurno en el entorno de Cueva Pintada, al objeto de recoger una primera información sobre el contraste térmico existente entre la roca y el aire subterráneo y la influencia de la hora de observación, orientación de las laderas, altura de vuelo, pendientes, etc. La entrada de Cueva Pintada, por la que en esos momentos salía aire cálido procedente del medio subterráneo según el patrón de ventilación vigente en el sistema kárstico (figura 1) se utilizó a modo de patrón, para calibrar el equipo en función de la respuesta observada y de las mediciones de temperatura del aire realizadas en la entrada de la cueva con un equipo portátil Vaisala equipado con una sonda de temperatura HMP155A (rango de medida: -80 a +60 °C, precisión  $\pm 0.17$  °C). El principal objetivo era dotar al pixel de una variable con el valor de temperatura. Este pixel obtiene una caracterización de color en función de la temperatura, rango y perfil empleado, obteniendo como resultado los puntos cálidos en una imagen. En este proyecto se ha empleado una paleta de gris/rojo, con objeto de dar una perspectiva más cálida a los puntos calientes con la interpretación de los datos en rojo

Tras analizar los datos resultantes del vuelo preliminar y teniendo también en cuenta las características climáticas de la zona de estudio, se decidió realizar los vuelos del dron sobre el polígono programado durante la madrugada de los días 27 y 28 de noviembre de 2021, entre las 05:00 a.m. y las 08:30 a.m., a fin de conseguir el máximo contraste térmico entre el aire subterráneo y el aire exterior. Para poder realizar los vuelos nocturnos con seguridad, éstos se iniciaron en el punto más alto del área de estudio, a fin de observar al dron en todo su vuelo desde una perspectiva segura.

Para el tratamiento de las imágenes obtenidas por el dron se ha empleado un equipo Intel i7, con 16 Gb de Ram, y dos tarjetas gráficas *Nvidia rtx 3060*. Para el procesamiento de imágenes se ha empleado el *software Pix4D Mapper*, el cual permite generar un árbol

de nodos entre las imágenes, dando como resultado un conjunto de imágenes en 2D y 3D.

## Resultados

Los dos vuelos nocturnos realizados con el dron sobre el polígono de estudio han permitido obtener un amplio archivo de imágenes en las que se constatan anomalías térmicas evidentes, zonas con mayores temperaturas coloreadas de rojo (figura 3) y que representan potenciales conexiones entre el exterior y el medio subterráneo.

El resultado final del procesado y ensamblaje de todas las imágenes ha sido la obtención de una ortofoto en 3D, para su uso con la herramienta *Google Earth*, y la posibilidad de poder explorar los puntos cálidos de las imágenes obtenidas.

Estas anomalías térmicas servirán de punto de partida para reconocer posibles puntos de acceso espeleológico en posteriores campañas de campo. Dado el amplio volumen de información obtenido, éste será analizado progresivamente, a fin de planificar la prospección física del terreno con el objetivo de localizar posibles conexiones practicables con el medio subterráneo y posibles accesos no conocidos a la Cueva de Nerja o a

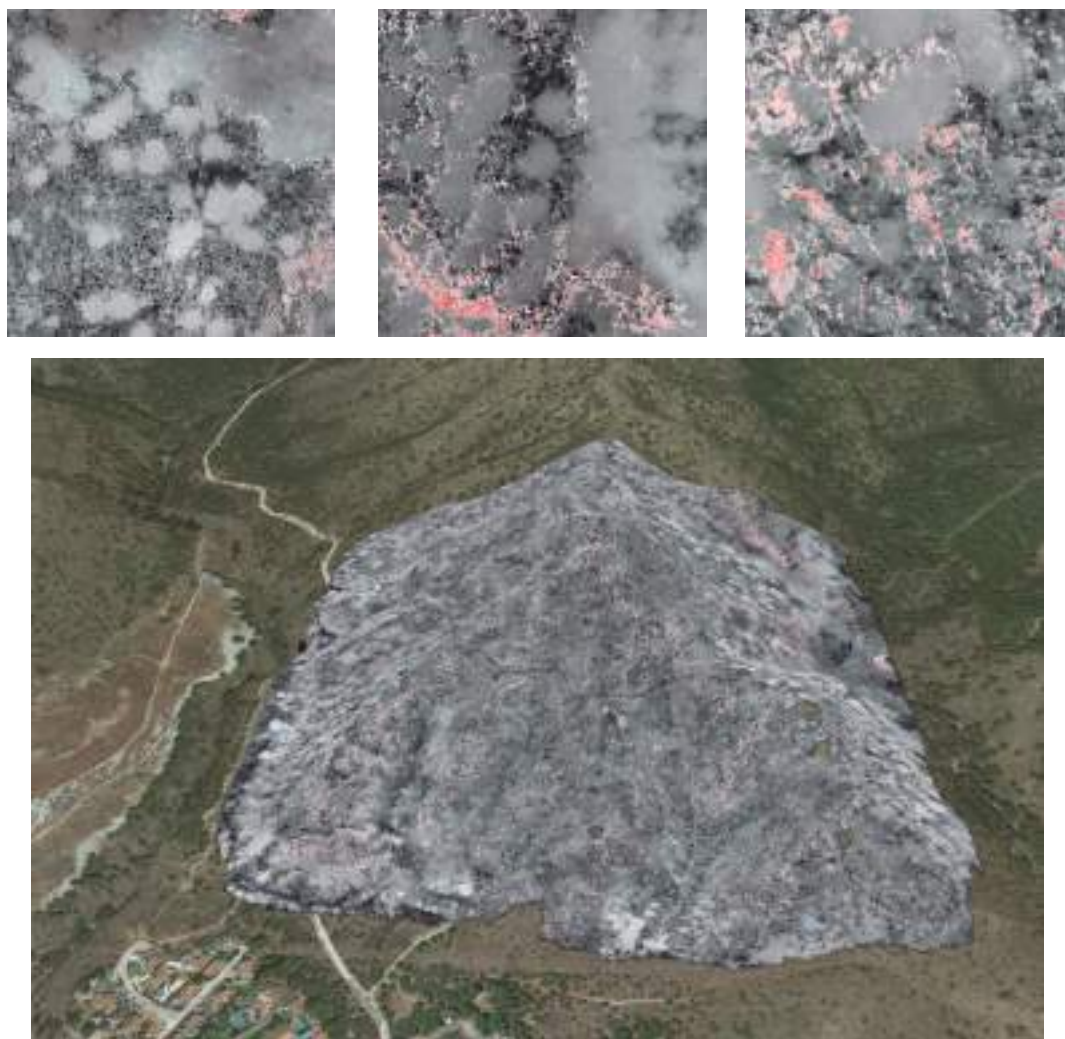


Figura 2. En amarillo, polígono seleccionado para el reconocimiento aéreo y la toma de ortofotos térmicas mediante dron. Los colores azules señalan las principales anomalías gravimétricas detectadas en la zona de estudio, según Martínez-Moreno et al., (2021). En el recuadro de la esquina superior derecha se detallan, en verde, las direcciones programadas para los vuelos. Figura modificada de Galindo et al. (2017).

cavernamientos próximos. Como primer paso, el 2 de diciembre de 2021 se realizó una inspección preliminar en una de las zonas próximas al cavernamiento situado al NO de la Sala de la Montaña (figura 4), donde las imágenes del dron mostraban salida localizada de aire caliente. Se localizaron cuatro potenciales conexiones, aunque ninguna practicable.

## Conclusiones

Este trabajo supone una contribución al uso de la termografía para la detección de entradas de cavidades en un karst mediterráneo mediante la observación de emisiones térmicas procedentes del medio subterráneo.



*Figura 3. Ejemplos de imágenes obtenidas tras los vuelos (arriba) e imagen final con las fotografías ensambladas y georeferenciadas (abajo).*



*Figura 4. Área próxima al cavernamiento del cerro Fuente Perro, prospectada el 2 de diciembre de 2021, e imágenes de algunas potenciales conexiones localizadas en la zona.*

El vuelo diurno realizado en el entorno de Cueva Pintada ha permitido observar la respuesta térmica de una conexión equivalente a las que se esperaba detectar (salidas de aire cálido desde una/s cavidad/es) pero de ubicación conocida, así como reconocer posibles interferencias (presencia de vegetación, fauna,...) en las imágenes obtenidas desde el aire.

La realización de los vuelos nocturnos a las horas idóneas de observación (horas de máximo contraste térmico roca-aire subterráneo) ha permitido obtener un amplio conjunto de imágenes en las que se constatan anomalías térmicas evidentes, y que servirán de punto de partida para reconocer posibles accesos espeleológicos a nuevos cavernamientos en posteriores campañas de campo.

## **Agradecimientos**

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto PID2021-125619OB-C22 y del Proyecto General de Investigación Interdisciplinar de la Cueva de Nerja (área de Geología), financiado por la Fundación Pública de Servicios Cueva de Nerja y autorizado por la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía. Nuestro agradecimiento a la Unidad de drones de Cruz Roja por su trabajo y dedicación.

## Referencias

- Castillo, P., Barranco, P., del Rosal, Y., Liñán, C. Fernandez-Cortes, A., Cabello, T. and Tinaut, A. (2021). Un grillo entre turistas. XIX Congreso de Entomología "Os insectos e o homem", congreso on line, 71.
- ENADIMSA (1991). *Prospección gravimétrica en las Cuevas de Nerja (Málaga). Informe de resultados*. Informe inédito. Fundación Pública de Servicios Cueva de Nerja.
- ENADIMSA (1992). *Prospección gravimétrica en las Cuevas de Nerja (Málaga). Informe de resultados*. Informe inédito. Fundación Pública de Servicios Cueva de Nerja.
- Galindo, J., Martínez-Moreno, F.J., González-Castillo, L., Martínez-Martos, M. and Benavente Herrera, J. (2018). *Prospección geofísica en el entorno de la Cueva de Nerja para la detección de cavidades y su influencia en la circulación del aire y ventilación del endokarst*. Informe inédito. Fundación Pública de Servicios Cueva de Nerja.
- Jurado, V., del Rosal, Y., Liñán, C., Martín-Pozas, T., Gonzalez-Pimentel, J.L. and Saiz-Jimenez, C. (2021). Diversity and Seasonal Dynamics of Airborne Fungi in Nerja Cave, Spain. *Applied Science*. 11 (13), 6236. <https://doi.org/10.3390/app11136236>.
- Liñán, C. and del Rosal, Y. (2015). Natural ventilation of karstic caves: New data on the Nerja Cave (Malaga, S of Spain). *Environmental Earth Sciences*. doi:10.1007/978-3-642-17435-3\_57.
- Liñán, C., del Rosal, Y., Carrasco, F., Vadillo, I., Benavente, J. and Ojeda, L. (2018). Highlighting the importance of transitional ventilation regimes in the management of Mediterranean show caves (Nerja-Pintada system, southern Spain). *Science of the Total Environment*, 631-632, 1268-1278. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.304>.
- Liñán, C., Ojeda, L., Benavente, J., del Rosal, Y., Vadillo, I. and Carrasco, F. (2020). Coupling air temperature records and gravimetric data to interpret ventilation patterns in a Mediterranean karstic system (Nerja-Pintada caves, southern Spain). *Science of the Total Environment*, 730, 139147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139147>.
- Martínez-Moreno, F.J., Galindo-Zaldívar, J., Liñán Baena, C., González-Castillo, L., Benavente Herrera, J., Martínez-Martos, M., del Rosal Padiá, Y., Fernández Rodríguez, L.E., Tendero-Salmerón, V. and Madarieta-Txurruka, A. (2021). Development and collapse of karstic cavities in folded marbles: Geomorphological and geophysical evidences in Nerja Cave (southern Spain), *Journal of Applied Geophysics*, 187, 104287, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104287>.
- Pérez, I. and Andreo, B. (2007). Sierra Almijara (M.A.S. 060.024) y Alberquillas (M.A.S. 060.063). In: Durán (coord.), *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga. Diputación de Málaga*, 143-148.
- S.E.M. 1985. *La Cueva de Nerja*. Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga, 87 pp.
- Vadillo, I., Benavente, J., Neukum, C., Grützner, C., Carrasco, F., Azzam, R., Liñán, C. and Reicherterd, K. (2012). Surface geophysics and borehole inspection as an aid to characterizing karst voids and vadose ventilation patterns (Nerja research site, S. Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 82, 153-162. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.03.006>.



## **El Hidrogeodía: una propuesta de divulgación para conocer la relación entre las aguas subterráneas, las formaciones kársticas y las cuevas**

Almudena DE LA LOSA ROMÁN <sup>(1)</sup>, Juan José DURÁN VALSERO <sup>(1)</sup>, Carlos BAQUEDANO ESTÉVEZ <sup>(1)</sup>, Raquel MORALES GARCÍA <sup>(1)</sup>, Luis MORENO MERINO <sup>(1)</sup>, Javier HEREDIA DÍAZ <sup>(1)</sup>, Fabián LUIS LÓPEZ OLMEDO <sup>(1)</sup>, Amalia ROMERO PRADOS <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>CN-IGME-CSIC. C/Ríos Rosas, 23. Madrid 28003. a.delalosa@igme.es, jj.duran@igme.es, c.baquedano@igme.es, r.morales@igme.es, l.moreno@igme.es, j.heredia@igme.es, fa.lopez@telefonica.net, a.romero@igme.es

---

### **Resumen**

El año 2021 fue declarado por la UNESCO, a propuesta de la Unión Internacional de Espeleología, como "Año Internacional de las Cuevas y el Karst". Bajo el lema "explorar, comprender y proteger", se propuso ampliar y mejorar el conocimiento actual de las cuevas, promover su conservación, y poner en valor la importancia de la diversidad natural de estas formaciones como patrimonio natural y cultural. El principal objetivo de este trabajo es mostrar el Hidrogeodía como una eficaz herramienta de divulgación de las aguas subterráneas, agente constructor de las formaciones kársticas y las cuevas. El Hidrogeodía es una jornada de divulgación de la hidrogeología que se celebra con motivo del Día Mundial del Agua (22 de marzo). Esta jornada está promovida por el Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH-GE) con la colaboración de Organismos Públicos de Investigación y Universidades, y consiste en actividades de divulgación, abiertas al público general. Dentro del Hidrogeodía 2021 de Madrid, se realizó un recorrido didáctico por las formaciones kársticas más relevantes del sureste de la Comunidad de Madrid, destacando la dolina de Titulcia y el karst yesífero de Estremera, donde se localiza la Cueva de Pedro Fernández o "Sima de las Yeseras". Se eligió esta zona, un tanto desconocida y de gran importancia hidrogeológica, por la presencia de afloramientos yesíferos karstificables y su estrecha relación con las aguas subterráneas, las cuales han dado lugar a un tipo de modelado superficial y subterráneo tan particular. Además, la abundancia de estos terrenos yesíferos susceptibles de sufrir procesos de disolución, hace que los procesos de karstificación tengan una repercusión económica y social muy relevante, debido a los riesgos e impactos que pueden ocasionar en el entorno próximo. El éxito de esta jornada nos lleva a proponer el marco del Hidrogeodía como una excelente herramienta divulgativa para la concienciación de la población respecto a la belleza, fragilidad e importancia ecológica y económica de los entornos kársticos y de las cuevas, y que pueden servir de ejemplo para realizar futuras ediciones del Hidrogeodía en diferentes regiones españolas, europeas e iberoamericanas.

**Palabras clave:** Comunidad de Madrid, disolución, Hidrogeodía, karst, yesos.

## **The "hydrogeoday": an educational proposal to learn about the relationship between groundwater, karst formations and caves**

### **Abstract**

*The year 2021 was declared by UNESCO, at the proposal of the International Union of Speleology (UIS), as "International Year of Caves and Karst". Under the slogan "explore, understand and protect", it was proposed to expand and improve the current knowledge of the caves, promote their conservation, and value the importance of the natural diversity of these formations as natural and cultural heritage. The main objective of this work is to show the Hidrogeodía as an effective tool for showing groundwater, building agent for karst formations and caves. The Hidrogeodía is an initiative to disseminate hydrogeology that is celebrated on behalf of the World Water Day (March 22nd). This activity is promoted by the Spanish Group of the International Association of Hydrogeologists (AIH-GE) with the collaboration of Public Research Organizations and Universities, and consists of a free daily excursion, open to the general public. Among the Hidrogeodía 2021 of Madrid, a didactic tour through the most relevant karst formations in the southeast of the Community of Madrid was proposed, highlighting the Titulcia sinkhole and the Estremera gypsum karst, where the Cave of Pedro Fernández or "Sima de las Yeseras" is located. This area somewhat unknown and hydrogeologically important area was chosen because of the presence of karstifiable gypsiferous outcrops and their close relationship with groundwater, which have given rise to such a particular type of surface and underground modeling. In addition, the abundance of these gypsum lands susceptible to dissolution processes makes the karstification processes generate a very relevant economic and social impact, due to the risks and impacts they can cause in the immediate environment. The success of this initiative leads us to propose the framework of Hidrogeodía as an excellent tool for an informative activity to raise the awareness among the population regarding the beauty, fragility and ecological and economic importance of karst environments and caves, serving as an example to carry out future editions in different Spanish, European and Ibero- American regions.*

**Keywords:** *Community of Madrid, dissolution, gypsum, Hydrogeoday, karst.*

## **Introducción**

Los terrenos kársticos son muy importantes para la naturaleza y para la humanidad. Más del 20% de la superficie emergida del planeta son rocas carbonáticas, yesíferas y salinas donde los procesos de disolución son frecuentes, dando lugar a paisajes exokársticos en superficie y a redes endokársticas en el subsuelo. Aproximadamente el 29% del territorio español está ocupado por rocas potencialmente karstificables; unos 110.000 km<sup>2</sup> de rocas carbonatadas y 35.000 km<sup>2</sup> de materiales evaporíticos (Durán y López Martínez, 1989). En la Comunidad de Madrid existen ejemplos muy interesantes de karst en rocas carbonáticas, bien conocidos, como el karst de Torrelaguna, donde se localiza la



famosa cueva del Reguerillo, la de mayor desarrollo explorado de la Comunidad. (Torres *et al.* 2005). Sin embargo, la mayor parte de los afloramientos karstificables existentes pertenecen a rocas yesíferas, incluidas en las secuencias sedimentarias del relleno de la depresión del Tajo. Estos sedimentos yesíferos, de edad Cenozoica, se distribuyen a lo largo de una banda muy extensa por el sureste de la comunidad.

El año 2021 ha sido declarado "Año Internacional de las Cuevas y el Karst" por la UNESCO, a propuesta de la Unión Internacional de Espeleología, con el objetivo de impulsar su conocimiento, fomentar su conservación y la divulgar la importancia que tienen estas formaciones tanto para el patrimonio natural como cultural.

En la actividad de divulgación del Hidrogeodía 2021, se ha propuesto un recorrido a través de las formaciones kársticas yesíferas más relevantes del sureste de la Comunidad de Madrid (destacando la dolina de Titulcia y el karst yesífero de Estremera), debido a que es una zona un tanto desconocida, pero de gran importancia hidrogeológica por la presencia de afloramientos yesíferos karstificables y su estrecha relación con las aguas subterráneas y con un elevado potencial como recurso didáctico-divulgativo. La dolina de Titulcia es una dolina de colapso de dimensiones espectaculares, unos 40 m de diámetro y 20 m de profundidad, próxima a la Laguna de San Juan. Por otro lado, en la zona de Estremera se pueden observar numerosas morfologías superficiales de disolución kárstica como lapices y dolinas, así como el complejo kárstico subterráneo "Pedro Fernández" o "Sima de las Yeseras", una de las cuevas excavadas en yesos con mayor desarrollo kilométrico y que contiene importantes valores geoarqueológicos, científicos y didácticos.

## **El karst y la geología de la Comunidad de Madrid**

En la Comunidad de Madrid existen ejemplos muy interesantes de karst en rocas carbonáticas algunos bien conocidos, como el karst de Torrelaguna en calizas y dolomías cretácicas, en donde se localiza la famosa cueva del Reguerillo (figura 1), la de mayor desarrollo explorado de la Comunidad, con casi 8 km de galerías topografiadas.

Sin embargo, la mayor parte de los afloramientos karstificables existentes en la Comunidad de Madrid se localizan en las rocas evaporíticas del Mioceno que forman parte del relleno de la Cuenca del Tajo (Alonso-Zarza *et al.*, 2004).

Los sedimentos yesíferos del Cenozoico, concretamente del Mioceno (20 Ma), se distribuyen a lo largo de una banda muy extensa por el sureste de la Comunidad de Madrid (figura 2). La sucesión de estos sedimentos fue dividida en tres grandes unidades (Junco y Calvo, 1983) que por su disposición estratigráfica fueron denominadas: Unidad Inferior, Unidad Intermedia y Unidad Superior, separadas entre sí por importantes discontinuidades y cada una de ellas con una clara tendencia progradante y granocreciente hacia el centro de la cuenca (figura 2).

Los materiales más antiguos aflorantes corresponden a la Unidad Inferior, que al encontrarse en disposición horizontal o subhorizontal se localizan siempre en la parte baja de los valles, incluido Madrid capital y las localidades cercanas (Rivas-Vaciamadrid,



*Figura 1. Entrada a la cueva del Reguerillo.*

Carabaña, Aranjuez y Estremera, p.e.), reconociéndose muy bien en los cantiles y farallones a favor de los ríos que drenan esas zonas. Por encima, se sitúa la Unidad Intermedia en las zonas topográficamente más altas de Madrid y de sus alrededores (Moncloa-Dehesa La Villa, Vallecas) y al sureste de la Comunidad se localizan ya los depósitos más modernos de la Unidad Superior, conformando extensas planicies que configuran el paisaje de las zonas altas de ese sector y que se denominan “páramos” (Campo Real, Villarejo de Salvanés, Colmenar de Oreja y Chinchón). Por último, los depósitos cuaternarios, principalmente las terrazas fluviales de los ríos Jarama, Tajuña y Tajo, están formadas por gravas y arenas que han sido objeto de intensas explotaciones para áridos y se reconocen principalmente a lo largo del fondo de dichos valles, si bien se pueden identificar también restos de terrazas altas por encima de los cantiles que delimitan dichas arterias (Díaz Martínez y Rodríguez Aranda, 2008).

Parte de los materiales salinos, los más antiguos, se generaron como resultado de la regresión marina acaecida a finales del Cretácico, así como durante la sedimentación continental durante el Paleógeno. Posteriormente, durante el Mioceno, en extensas y distintas zonas de la península se instaló una sedimentación lacustre endorreica que dio lugar a la precipitación de materiales evaporíticos, como es el caso de los yesos de la Cuenca de Madrid. En ocasiones, estas formaciones se encuentran cubiertas por depósitos cuaternarios aluviales, generándose deformaciones gravitacionales (paleodolinas) como consecuencia del hundimiento del sustrato yesífero (Calvo *et al.*, 1984; Rodriíguez-Aranda *et al.*, 1997)

En el caso de la Comunidad de Madrid, el área que ahora conforma los campos del sureste de la misma, estuvo cubierta durante el Mioceno por un gran sistema lacustre interior. El carácter endorreico de este sistema en aquella época y la desecación que trajo

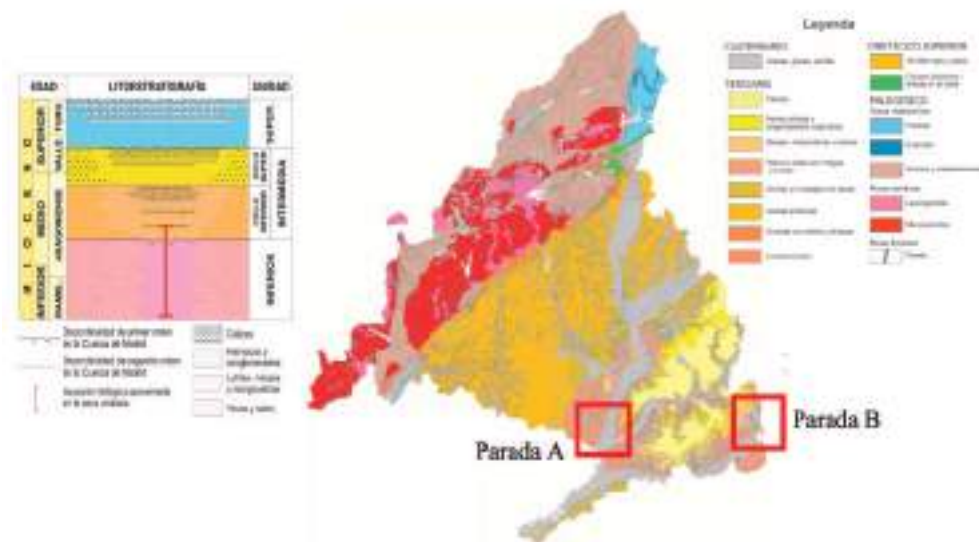


Figura 2. Esquema geológico de la Comunidad de Madrid y leyenda litoestratigráfica del Mioceno con localización de las zonas visitadas: Parada A- dolina de Titulcia y Parada B- Kasts de Estremera. Fuente: Menduña et al. (2005).

consigo la posterior evolución climática, provocó la precipitación de grandes depósitos de sales evaporíticas, carbonatos, sulfatos y cloruros. (Calvo et al. 1989.).

Una vez depositados, los materiales evaporíticos presentan una mayor velocidad de disolución, y por tanto un mayor riesgo geológico, que los materiales carbonáticos. La solubilidad del yeso en agua pura a una temperatura de 20 °C es de 2.53 gr/L, es decir entre 10-30 veces mayor que la de carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>) en presencia de anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>). Sin embargo, la solubilidad de los yesos también puede verse afectada por otros factores como la temperatura del agua, la presencia de sales y el tamaño de los granos que forman la roca, entre otros. Además, el desarrollo de estos procesos de disolución, pueden estar favorecidos por procesos físicos como la presencia de un bajo espesor de la cobertera detrítica, la alta permeabilidad de esta cobertera, así como por la fracturación. Otros aspectos que condicionan el desarrollo de estos procesos pueden deberse a aspectos hidrogeológicos como las variaciones estacionales del nivel freático, así como la poca profundidad del mismo, y a aspectos antrópicos como las extracciones intensivas de agua, regadío y conducciones no impermeabilizadas (Mancebo-Piqueras, J.A. 2008)

## Recorrido por las formaciones kársticas yesíferas

El recorrido propuesto durante la actividad del Hidrogeodía 2021, nos llevó a conocer la espectacular dolina de Titulcia, próxima a la laguna de San Juan en la Comarca de las Vegas (figura 3), pasando por los cantiles yesíferos del sureste de Madrid y concluyendo el itinerario en el sistema kárstico de Estremera, en la Cueva de Pedro Fernández.

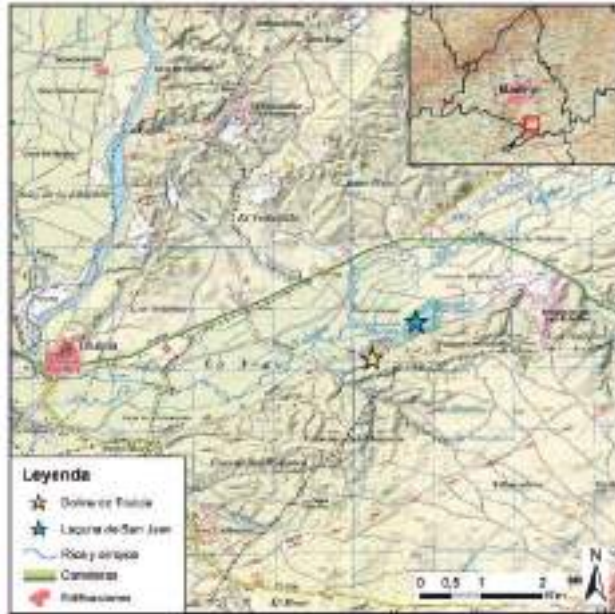


Figura 3. Localización de la dolina de Titulcia.

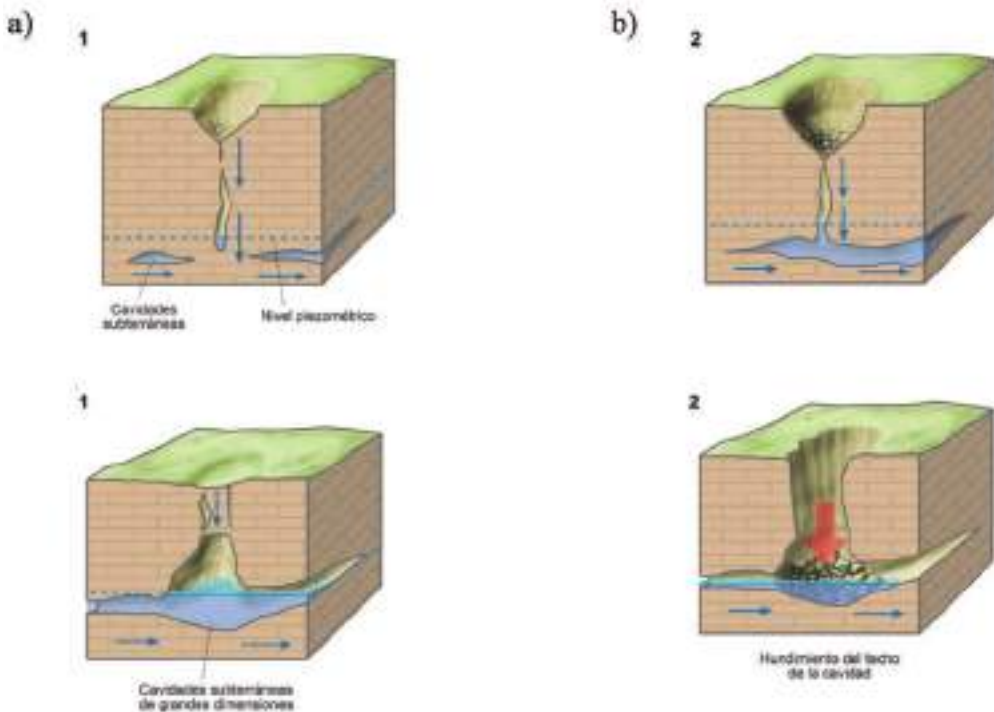


Figura 4. Esquema de una dolina de disolución y de colapso. Fuente: Morales y Rodríguez (2015).



*Figura 5. Vista general e interior de la dolina de Titulcia*

La dolina de Titulcia (figura 5) representa una dolina de colapso (figura 4). Se desarrolla en los cerros de la margen izquierda del cauce del río Tajuña, sobre los yesos karstificados de la Unidad Inferior. Se trata de una dolina cilíndrica, de contorno circular y de paredes verticales, en las que se pueden observar grandes bloques de yeso fracturados. Sus dimensiones son 38 m de diámetro y unos 20-25 m de profundidad.

Su fondo se sitúa a una cota próxima a la laguna de San Juan, situada en el margen izquierdo del río Tajuña, entre los núcleos urbanos de Chinchón y Titulcia. Por su cercanía a la laguna, se cree que, tanto la laguna como la dolina, forman parte de un mismo sistema kárstico, causante del desarrollo de las cavidades subyacentes y del posterior hundimiento de la cobertera que cubría la dolina en su parte superior (Mancebo- Piqueras, 2008).



*Figura 6. Pliegues producidos por deformación plástica por subsidencia en yesos miocenos de la Cuenca del Tajo (autovía M-45, SE de Madrid).*



Figura 7. Localización de la dolina del karst yesífero de Estremera.

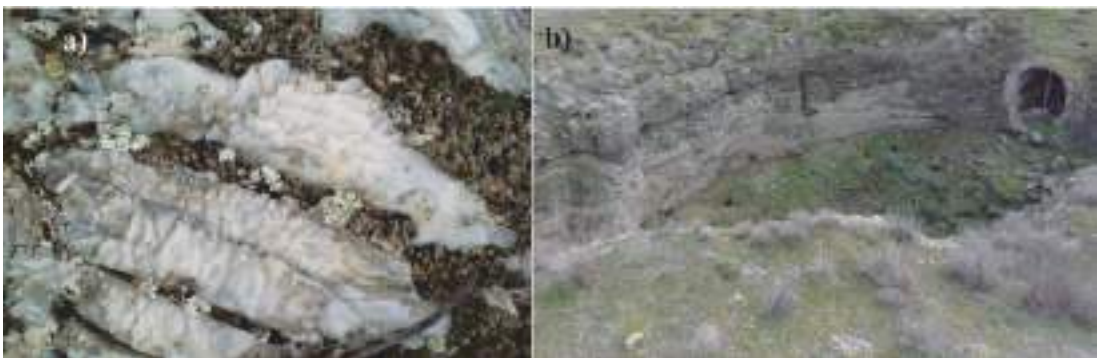


Figura 8. a) Microlapiaz en yesos. b) dolina de colapso en el karst de Estremera, modificada por actividades antrópicas.

### Riesgos geológicos asociados a procesos kársticos en yesos

En la Comunidad de Madrid, la abundancia de terrenos yesíferos susceptibles de sufrir procesos de disolución hace que los procesos de karstificación generen una repercusión económica y social muy relevante, debido a los riesgos e impactos que pueden ocasionar.

Por un lado, la deformación que experimenta el terreno puede provocar daños graves en todo tipo de estructuras (edificios, infraestructuras de comunicaciones, etc.), y, por otra parte, las dolinas, al actuar como sumideros y vías de ascenso a sistemas de cavidades subterráneas, pueden dificultar e incluso imposibilitar el almacenamiento de agua en

los embalses, arruinando costosos proyectos. Tal es el caso del Pontón de la Oliva, primer embalse construido por el Canal de Isabel II (1851-1858).

En la zona sureste de Madrid, esto se ha puesto de manifiesto en zonas urbanizadas como Rivas-Vaciamadrid o en Mercamadrid (donde se producen asientos diferenciales en edificios y estructuras que se sitúan sobre terrenos kársticos o por la transformación de anhidrita en yeso, al hidratarse esta y aumentar su volumen) (Escolano Sánchez, 2005). También ha afectado a grandes infraestructuras como en la línea 7 del Metro de Madrid, en el túnel del AVE Madrid-Valencia a su paso por Ontígola o en la autovía M-45 (figura 6), cuyos taludes ofrecen bellas imágenes de paleo-colapsos en los yesos terciarios. En este caso, se han realizado importantes trabajos de relleno con hormigón de cavidades y se han adoptado precauciones geotécnicas especiales.

## El karst de Estremera

En el karst de Estremera (figura 7 y 8) pueden observarse numerosas morfologías exokársticas, como lapiaces y dolinas, que son las formas superficiales de disolución kárstica más habituales (Arandilla *et al.*, 1973).

En el karst de Estremera también existen numerosas cavidades, la mayoría de pequeño tamaño, a excepción del complejo kárstico subterráneo "Pedro Fernández" o "Sima de las Yeseras", situado dentro de la finca "Dehesa de San Pedro", al sur del río Tajo.

La cueva de Pedro Fernández cuenta con un importante desarrollo horizontal, unos 4 kilómetros, y presenta una superficie interior de 8.000 metros cuadrados, siendo el mayor ejemplo de karstificación en yesos en la Cuenca del Tajo y una de las cuevas excavadas en yeso de mayor recorrido en España. (Ayala *et al.*, 1986; Calaforra y Pulido, 1989). Fue declarada Monumento Histórico Artístico en 1972 (decreto 1704/1972 del 15 de junio) y alberga en su interior un importante yacimiento arqueológico de la Edad de Bronce. Actualmente, la Comunidad de Madrid prohíbe su entrada, no facilitando permisos para su visita.

El único acceso posible a la cavidad se realiza a través de una sima (figura 9a), en la que es preciso descender 13 metros profundidad, hasta una gran sala, confluencia de varias galerías, las cuales aparecen rellenas prácticamente en su totalidad por gran número de bloques de rocas procedentes de sucesivos derrumbes. Las galerías se sitúan a distinta profundidad, yendo desde los -3 m a los -34m. (Almendros y Antón, 1983).

Tres parecen ser las causas que han originado el patrón morfológico de las galerías que conforman la cueva: la presencia de una densa red de fracturas existentes (fracturación que ha jugado un papel muy importante en la posterior evolución de la cavidad), los procesos químicos de disolución y los probables efectos de movimientos neotectónicos. El resultado es la creación de la red de galerías, más profundas que anchas (figura 10), que han ido dando lugar a salas con diferentes tamaños en diversos vértices de confluencia. (Almendros y Antón, 1983).



Figura 9. Entrada del complejo kárstico subterráneo “Pedro Fernández” o “Sima de las Yeseras”, cerrada con una verja metálica. b) Arroyo Salado, Vista desde la entrada al complejo kárstico

Aunque esta red kárstica se muestra en la actualidad inactiva hidrogeológicamente, sus cavidades fueron testigos de la circulación de agua subterránea por el interior del acuífero que conforman los yesos miocenos. Otra evidencia de la existencia de circulación del agua subterránea es la presencia de pequeños manantiales que drenan los materiales yesíferos en contacto con los tramos arcillosos de la secuencia sedimentaria (figura 9b).

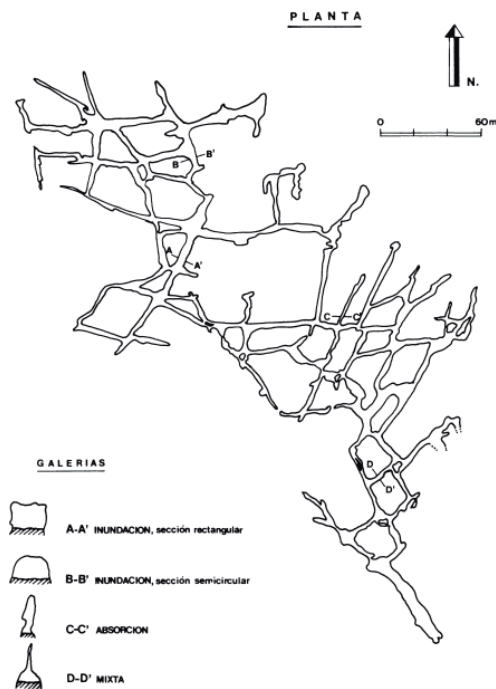


Figura 10. Red de galerías de la cueva de Pedro Fernández. Fuente: Almendros y Antón (1983).





Figura 11. a) Cráneo con cristalizaciones de yeso en parte de su superficie. Fuente: Molero del Peso, V. (2015). b) Cavidades de habitación localizadas en el Risco de las Cuevas (Perales de Tajuña).

Estos manantiales cumplen una función ambiental importante, dando lugar a ecosistemas gipsícolas de gran interés como el ejemplo del Arroyo Salado, afluente del Tajo por la margen izquierda y cuyo topónimo responde a la salinidad de sus aguas, el cual se encuentra próximo a este complejo kárstico.

Desde el punto de vista de la calidad de las aguas, la alta solubilidad del yeso y la presencia ocasional de otras sales hace que las aguas del sureste de la Comunidad de Madrid sean, en términos generales, de mala calidad química para diversos usos, como el abastecimiento o la agricultura

Sin embargo, estas aguas han sido utilizadas en algunos lugares cercanos como aguas minero-medicinales, destacando las famosas aguas de Carabaña (Sánchez Vigil, 1999) y el Balneario La Margarita. Su empleo como aguas purgantes constituyó una herramienta muy eficaz contra todo tipo de enfermedades a finales del siglo XIX y principios del XX.

### *Aspectos históricos del karst en yesos del sureste de Madrid*

Los restos arqueológicos hallados en el interior del complejo kárstico subterráneo "Pedro Fernández" pertenecen a la Edad del Bronce (periodo cultural de la prehistoria reciente comprendido aproximadamente entre el 1.600 y el 1.200 a.n.e). En ella, existen restos tan relevantes como posibles grabados en las paredes de algunas galerías, distintas manifestaciones de cerámica y vasijas en lo que parecen ser repisas naturales, la existencia de una pileta excavada y utilizada como depósito de recogida de agua y restos de distintos enterramientos (figura 11a). La Cueva de Pedro Fernández (2021, enero).

En lo que se refiere a la función de la cueva, se cree que tuvo funcionalidades diversas, siendo cueva-necrópolis, cueva-santuario y cueva de habitación.

La cueva y el yacimiento en superficie con el que se complementa, jugaron un importante papel en relación a su posición geográfica. Esto se debe a que el asentamiento controlaba un importante cruce de comunicaciones pecuarias, situadas en la zona media del curso del Tajo y los valles del Henares, Tajuña, Manzanares y Jarama.

La cueva se sitúa en la margen izquierda del Arroyo salado, pudiendo contribuir a la obtención de sal, producto cuya explotación sería de gran importancia para la socioeconomía de los habitantes de la cueva de Pedro Fernández.

Actualmente y con el fin de proteger el yacimiento, la Dirección General de Patrimonio Cultural, ha procedido al cierre cautelar de la misma, instalando una gran parrilla metálica sobre el pozo de entrada. Así pues, desde hace una década se prohíbe completamente su entrada para no alterar o destruir los restos allí encontrados.

Por otra parte, los cantiles yesíferos de la Comunidad de Madrid han servido también como lugares de habitación por parte de nuestros antepasados prehistóricos, como ocurre en el Risco de las Cuevas de Perales de Tajuña (declarado en 1931 Patrimonio Nacional). (figura 11b).

Son más de 50 las cavidades abiertas en el acantilado yesífero, algunas de ellas de importantes dimensiones y unidas con las inmediatamente superiores o inferiores. No se tienen datos que permitan su datación precisa, aunque hay referencia de materiales arqueológicos desde el neolítico, época a la que pertenecen los primeros utensilios líticos encontrados en la zona.

## **Consideraciones y reflexiones finales**

El karst de la región del sureste de Madrid, al igual que muchos otros de la Península Ibérica, es un magnífico ejemplo del importante papel que juegan las aguas subterráneas y los procesos kársticos en el exterior y el interior de los acuíferos desarrollados en rocas yesíferas.

Estos recorridos didácticos constituyen una buena herramienta como actividad de formación y divulgación. Este itinerario ha sido incluido dentro de las actividades desarrolladas en el Hidrogeodía de Madrid 2021. Consideramos que la buena acogida que ha tenido este tipo de actividades pone de manifiesto su gran potencial para mostrar al público la importancia de los entornos kársticos y de las cuevas en general. Asimismo, estas actividades pueden extrapolarse a otras regiones. Además, ese año debido a la situación provocada por la epidemia de COVID-19, se llevaron a cabo videos explicativos [[https://www.youtube.com/watch?v=JExK66ka1\\_8&t=3s](https://www.youtube.com/watch?v=JExK66ka1_8&t=3s)] que han permitido llegar a más personas, extendiéndose e integrando a todas aquellas con problemas de movilidad o discapacidad auditiva.

## Agradecimientos

Este recorrido didáctico ha sido incluido en la actividad del Hidrogeodía de Madrid 2021, coordinado por la AIH (Asociación Internacional de Hidrogeólogos) y financiado este año por la FECYT. Agradecemos la colaboración en este evento a todas aquellas personas que nos han facilitado el acceso a los lugares de visita, en especial a Pedro Rodríguez, actual propietario del Balneario de Carabaña y al guarda del mismo.

Gracias también a Carlos Lorenzo Carnicero del Servicio de Trabajos Aéreos (SAT) del IGME por las imágenes aéreas realizadas con el dron, a Amalia Romero Prados por la realización y edición del video del Hidrogeodía 2021, así como a Sergio Raúl Durán Laforet por su apoyo con el reportaje gráfico y en labores de campo.

## Referencias

- Almendros, M.A., Antón, F.J. (1983). El complejo kárstico-yesífero subterráneo "Pedro Fernández" (Estremera, provincia de Madrid). *Cuadernos do Laboratorio Xeológico de Laxe*, 5. VI Reunión do Grupo Español de Trabajo de Cuaternario, 333-345.
- Alonso-Zarza, A., Calvo, J.P. Silva, P.G., Torres, T. (2004). Cuenca del Tajo. En: Vera, J.A. (Ed.). *Geología de España*. Sociedad Geológica de España e Instituto Geológico y Minero de España, 550-556.
- Arandilla, P., Ferreiro, D., Hernández, A., del Olmo, P. (1973). *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 y memoria asociada. 2ª Serie (MAGNA). Hoja 607 Tarancón*. IGME. Madrid.
- Ayala, F.J., Rodríguez-Ortiz, J.M., Prieto, C., Durán, J.J., Del Val, J., Rubio, J. (1986). *Mapa del karst de España a escala 1:1.000.000 y memoria asociada*. IGME. Madrid.
- Calaforra, J.M., Pulido, A. (1989). Principales sistemas kársticos en yesos en España. En: Durán, J.J. y López-Martínez, J. (Eds.). *El Karst en España*. Sociedad Española de Geomorfología, Madrid, 277-294.
- Calvo, J.P., Ordóñez, S., García del Cura, M. A., Hoyos, M., Alonso-Zarza, A., Sanz, M.E., Rodríguez Aranda, J.P. (1989). Sedimentología de los complejos lacustres miocenos de la Cuenca de Madrid. *Acta Geológica Hispánica*, 24, 281-298.
- Calvo, J.P., Ordóñez, S., Hoyos, M., García del Cura, M.A. (1984). Caracterización sedimentológica de la unidad intermedia del Mioceno de la zona sur de Madrid. *Revista de Materiales y Procesos Geológicos*, 22, 145-176.
- Díaz-Martínez, E., Rodríguez-Aranda, J. P. (2008). Itinerarios geológicos en la Comunidad de Madrid. IGME, *Colección Guías Geológicas*, nº1, 192 p.
- Gutiérrez, F., Calaforra, J.M., Cardona, F., Ortí, F., Durán, J.J., Garay, P. (2004). El karst en las formaciones evaporíticas españolas. En: Andreo, B. y Durán, J.J. (Eds.). *Investigaciones en sistemas kársticos españoles*. IGME, Madrid, 49-87.
- Durán, J.J. y López Martínez, J. (1989): Perspectiva general del karst en España. En J.J. DURÁN VALSERO y J. LÓPEZ MARTÍNEZ (Eds.). *El karst en España. Monografías*, 4, 13-28. Sociedad Española de Geomorfología, Madrid.
- Escolano Sánchez, F. (2005). Caracterización geológico-geotécnica de las facies de transición y evaporíticas de la Cuenca de Madrid en el interfluvio Manzanares-Jarama. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. Caminos, Canales y Puertos. 325 pp. [https://oa.upm.es/9359/1/FELIX\\_ESCOLANO\\_SANCHEZ\\_A.pdf](https://oa.upm.es/9359/1/FELIX_ESCOLANO_SANCHEZ_A.pdf)
- Junco, F. y Calvo, J. P. (1983). Cuenca de Madrid. En: *Geología de España. Libro Homenaje a J. M. Ríos, T. II*. IGME, Madrid, 534-542. Comunidad de Madrid. ITGE y Comunidad de Madrid, Madrid, 83 p.
- La Cueva de Pedro Fernández (2021, enero). La Villa de Estremera. Asociación cultural La Tercia. <http://www.estremera.org/LacuevadePedroFernandez1.htm>
- Mancebo-Piqueras, J.A. (2008). *Karstología de yesos. Algunas aplicaciones en ingeniería civil*. Universidad Politécnica de Madrid. Tesis doctoral. 189 pp. [https://oa.upm.es/1085/1/JOSE\\_ANTONIO\\_MANCEBO\\_PIQUERAS.pdf](https://oa.upm.es/1085/1/JOSE_ANTONIO_MANCEBO_PIQUERAS.pdf)
- Mendiña, J., y Fort, R. (2005). *Las piedras utilizadas en la construcción de los Bienes de Interés Cultural de la Comunidad de Madrid anteriores al siglo XIX*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 131 p.

Almudena De la LOSA ROMÁN, Juan José DURÁN VALSERO, Carlos BAQUEDANO ESTÉVEZ, Raquel MORALES GARCÍA, Luis MORENO MERINO, Javier HEREDIA DÍAZ, Fabián Luis LÓPEZ OLMEDO, Amalia ROMERO PRADOS, A. - **El Hidrogeodía: una propuesta de divulgación para conocer la relación entre las aguas subterráneas, las formaciones kársticas y las cuevas.**

---

- Molero del Peso, V. (2015). *Los restos óseos humanos procedentes de la cueva de Pedro Fernández (Estremera, Madrid, III y II milenio a.c.)*. Universidades de Alcalá, Autónoma de Madrid y Complutense de Madrid. Trabajo Fin de Máster. 38 pp.
- Morales, R. y Rodríguez, L. (Dir.) (2015). *Rutas azules por el patrimonio hidrogeológico de Alicante*. IGME y Diputación Provincial de Alicante, 445 pp. ISBN: 978-84-7840-960-0.
- Rodríguez-Aranda, J.P. y Calvo, J.P. (1997). Desarrollo de paleokarstificación en facies yesíferas del Mioceno de la Cuenca de Madrid. Implicaciones en el análisis evolutivo de sucesiones lacustres evaporíticas. *Boletín Geológico y Minero*, 108 (4-5), 377-392.
- Sánchez Vigil, J.M. (1999). *Carabaña: Documentación histórica, 1528-1939*. Madrid.
- Torres, T., Ortiz, J.E., Cobo, R., Puch, C., Julia, R., Grün, R. y Soler, V. (2005). Génesis y edad del Karst del Cerro de la Oliva y la Cueva del Reguerillo (Torrelaguna, Madrid). *Libro homenaje al profesor D. Rafael Fdez. Rubio*, 225-242.

# Nature protection and management in a highly populated country - Israel 2022

Yariv MALIHI <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Central district ecologist, INPA - Israel Nature Reserves & National Parks Authority.  
yariv.m@npa.org.li

---

## **Abstract**

*Israel is a highly populated country with four biogeographical zones and remarkable diverse ecological systems, habitats and species. INPA is the only government organization that act by law to protect species and to declare areas as national parks or nature reserves where everything is protected.*

*Managing Israel nature include: species conservation in all the country areas, and habitats protection in nature reserves and national parks. All protected areas needs watchful management of species, habitats and visitors. The minority of the protected areas are highly intensive with ca. 50,000 - 250,000 visitors per year, hence requires measurements to manage the visitors in order to keep the site asset protected and sustainable.*

*With nearly 2%, population growth per year, Israel land use, light pollution and habitat fragmentation are few of the factors that makes nature conservation a real challenge!*

## **INPA goals**

The Israel Nature and Parks Authority (INPA) was established as two entities (which were unified in 1998), based on a law passed by the Knesset in 1963, for the purpose of fulfilling the goals of the National Parks Law, the Nature Reserves and Commemoration Sites Law and the Wildlife Protection Law.

The INPA is a government authority, a public body that holds in trust some public assets including nature reserves and national parks. These assets do not belong only to the current generation and the Authority is committed to them as to a holding that is must protect for the long-term, for future generations as well. The goals of the INPA are to further its commitments to nature and heritage sites, to foster them for the benefit of the public and to educate the public in keeping with these goals.

## **INPA vision**

- The INPA protects nature, including habitats, ecosystems, plant and animal diversity in nature reserves, national parks and open spaces.
- The INPA works to preserve and manage the special look of typical landscapes throughout the country for the benefit of all inhabitants, while protecting the balance between economic, social, cultural and environmental needs. The INPA works to protect treasures of heritage and culture in national parks and

nature reserves, while developing these sites, adding interpretive elements and upgrading visitor accessibility.

- The Authority works toward building an ever-stronger relationship with the public, to cooperate and educate the public for greater appreciation of the values of nature, landscape and heritage.
- The INPA is a partner in forging a national policy for the protection of the values of nature, landscape and heritage, in cooperation with colleagues in Israel and abroad, now and for future generations.
- The INPA protects treasures of nature, landscape and heritage and connects people to places, fostering affinity to the Land of Israel in the spirit of the Declaration of Independence.

## **Conservation policy**

The INPA determines which areas are worthy of conservation and promotes their official declaration as nature preserves and national parks, and manages these areas. The Authority also plans a comprehensive policy of open-space management and ecological corridors. In addition, the Authority works to preserve species by saving endangered local species, and deals with invasive species.

## **Enhancing Accessibility**

The INPA invests extensively in making nature reserves and national parks accessible to the public, including entrances, trails that vary in difficulty, and trails accessible to persons with disability. We also hold events to encourage people to visit our sites, such as folklore presentations, guided tours, explanatory signs and staffed information stations. INPA challenge is to protect nature and biodiversity together with high public accessibility.

## **Israel Nature**

With a small land area, Israel characterized by a wide range of physical conditions and by a rich variety of flora and fauna. Along its 470 kilometer length, Israel embraces landscapes that normally separated by thousands of kilometers in other countries. Mount Hermon in the north boasts snowy slopes and alpine fauna and flora, while the Gulf of Eilat, in the south, harbors spectacular coral reefs and colorful fish that represent the tropical zones. Lying between these two extremes are arid desert areas, lush oases, green Mediterranean woods and forests, and the lowest point on earth - the Dead Sea.

## **Biogeographical regions**

Israel's geographic location at the junction of three continents, coupled with the climatic changes throughout the history of this region have been largely responsible for the

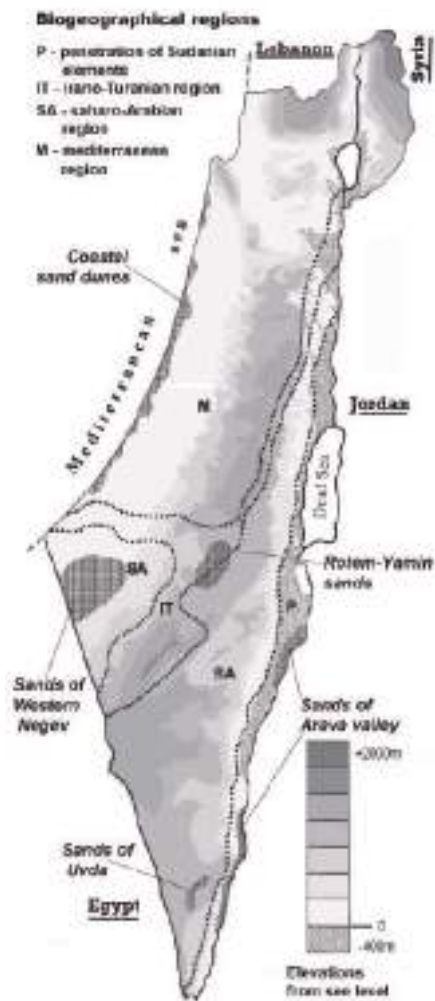


Figura 1. Biogeographical regions of Israel.

country's high diversity of species. The wealth of Israel's biological diversity expressed in some 2,700 plant species (150 of which are indigenous to Israel), 8 amphibian, 103 reptile, 206 nesting birds and 104 mammal species. Within its small land area, two different and even opposing climate regimes are found - Mediterranean in the north and desert in the south. The central part of Israel is a transition area between these two biogeographical regions, where desert biota replaced gradually by Mediterranean biota (figure 1).

Situated at the meeting point of four phytogeographical regions - Mediterranean, Irano-Turanian, Sudanian and Saharo-Arabian, Israel contains a diverse collection of herbaceous plants, especially annuals and geophytes, typical of all four.

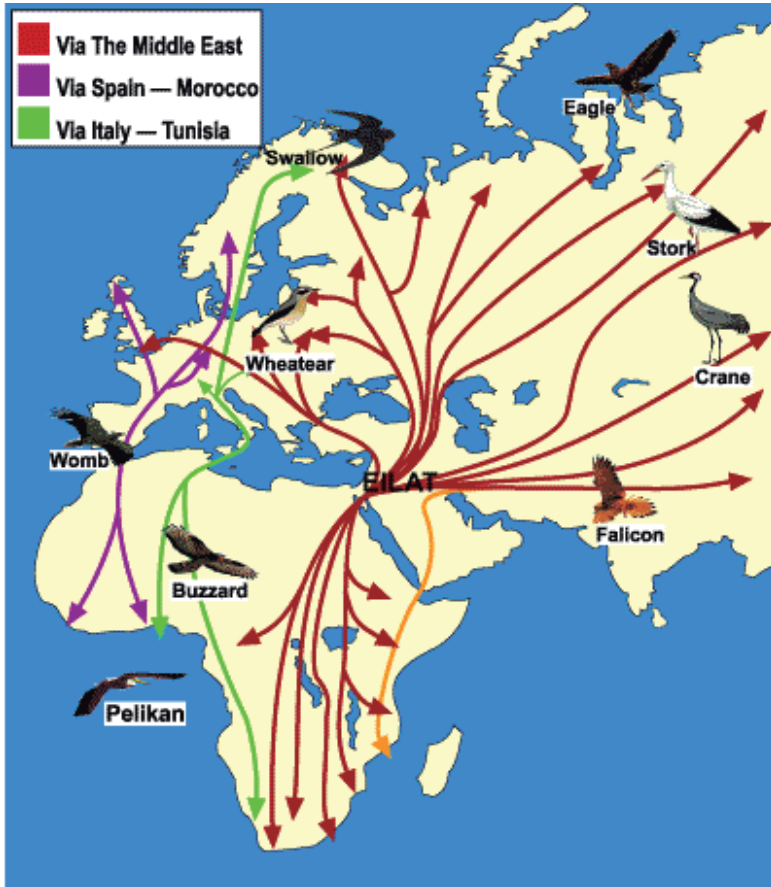


Figure 2. Migration paths of birds from Israel

Species widely distributed over the entire Mediterranean climate region reach their southern limit of distribution in Israel. Saharan or Asian desert species reach their northern limits of distribution in this country while Irano-Turanian species reach their western limit here. Sudanian species reach their northern limits along the rift valley. Israel is the northernmost limit for the presence of plants such as the papyrus reed (*Cyperus papyrus*) and the southernmost limit for others like the bright red coral peony (*Paeonia mascula*). Furthermore, Israel is a unique meeting point for number of species e.g. the three hedgehog's species: Southern White-breasted Hedgehog, Long-eared Hedgehog and Desert Hedgehog.

Israel is also a main migration route for Palearctic birds and the only terrestrial meeting point for organisms from Europe, Asia and Africa. Over 150 million birds follow the migration route through Israel in spring and fall. This migration is spectacular for birds watching on one hand but on the other hand, it creates a challenging human-wildlife conflict especially cranes and pelicans that ~ 100,000 individuals migrates and feed on seeds and fishes correspondently (figure 2).



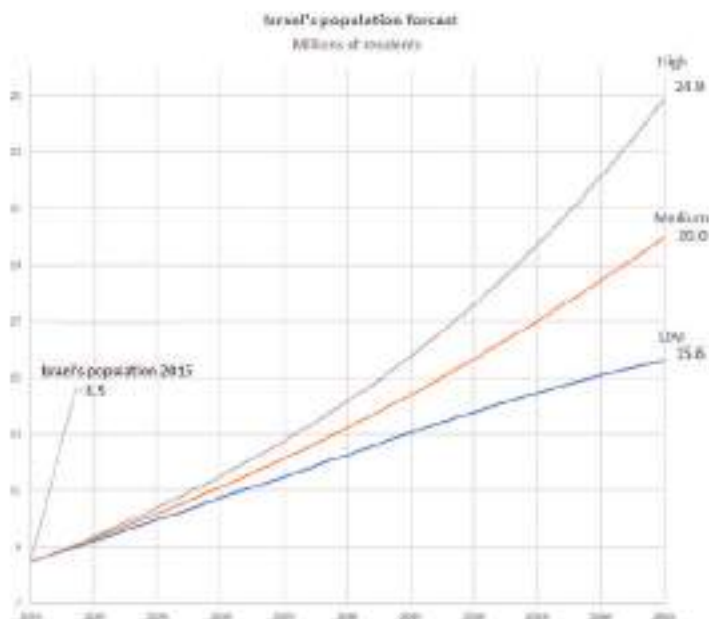


Figure 3. The Israeli Bureau of Statistics' prediction – shows expected population growth in Israel until 2065. The three lines are the three predictions according to different levels of population growth - high, medium and low. According to past predictions, the "high" line has been the closest to reality. This means that unless a drastic change happens soon, in 2065 nearly 25 million will be living here – which will make Israel one of the crowds places on earth.

## Israel Population Growth (worldpopulationreview.com)

For a country of its size, the population of Israel is very high. Since the establishment of the State, the population has increased approximately tenfold, primarily because of the high immigration of Jews into the country. Generally, the growth rate increased by about 138,000 or 1.8% annually since 2012, which is similar to the growth rate that has been observed in the last 8 years, and it is expected that the population will increase roughly 5 million over the next 20 years or so. While central Israel is highly populated and northern Israel populated in a moderate rate, the south of Israel populated scarcely. Therefore, only 3% of the Mediterranean region and nearly 20% of the desert are protected nature reserves, many of which overlap military training areas (figure 3).

## The State of Nature Reports

The reports Published by Hamaarag, Israel's National Ecosystem Assessment Program, since 2010. The State of Nature Report 2022 - Trends and Threats volume, presents a spatial and temporal situation report of the main factors and processes related to human activity that influence the state of nature in Israel.

## Highlights of 2022 report:

### *Land Use in Israel*

Mapping and analysis of land use change and conversion in recent years: built-up land, transportation infrastructure, agriculture (plantations and field crops), disturbed areas (quarries, solar farms, and more), natural and artificial water bodies and other uses.

The rate of removal of open landscapes (natural, afforested and agricultural landscapes) in Israel remains high. During the period 2017-2020, 30 km<sup>2</sup> on average removed per year for development. Approximately 72 km<sup>2</sup> of natural and afforested landscapes and



Figure 4. Connectivity map of Israel. Hamaarag, the state of nature report 2022

69 km<sup>2</sup> of farmland converted to other land uses. Most of it for construction, and the rest converted to other uses such as transportation and solar farms.

### *Light Pollution in Israel - Ecological and Spatial Aspects*

Artificial night lighting has negative impacts on ecosystems and on the functioning of the organisms living in them. The intensities of artificial night lighting in Israel's open landscapes and the extent of the lit up area are steadily increasing.

67% of Israel's land area north of Be'er Sheva city is lit up at night at intensities that have been found to cause damage to ecosystems. Even protected areas, such as nature reserves, affected by light pollution reaching them from nearby sources

Nearly all of Israel's beaches exposed to artificial night lighting; approximately 78% of them exposed to a higher intensity of artificial night lighting than that of a full moon. In Eilat, light pollution on the beaches is endangering the coral reef.

### *Connectivity and Fragmentation of Open Landscapes in Israel*

Mapping and analysis of the connectivity and fragmentation of Israel's open landscapes. Accelerated development has a marked impact on the fragmentation pattern of Israel's open landscapes - in the north and center of the country the open landscapes are divided into small, fragmented units, while from Be'er Sheva (Negev desert) southwards most of the open landscapes are relatively extensive and continuous. North of Be'er Sheva, 83% of the land is located within 1 km of the closest road, compare (figure 4).

## **INPA action for species conservation and habitat fragmentation**

In the Mediterranean region of Israel, where nature reserves dispersed in a total area of 250 km<sup>2</sup>, the main problem facing nature conservation is habitat fragmentation. While most of the wildlife of Israel still lives and protected outside nature reserves, the decrease in open areas may well make nature reserves the last stronghold for many species. However, the small size of most reserves makes them vulnerable to impacts from their surroundings, thus placing the future of the flora, fauna and ecosystems, in the reserves, at risk.

It is widely believed that species extinction can have the most serious consequences - and it is irreversible. The problem is especially acute in Israel, whose diminutive size, momentum of development and population growth make the protection of precious natural resources and open space landscapes especially difficult.

Therefore, INPA science division works in 2 channels:

1. Strategic Planning for Species Conservation - plants and vertebrates such as sea turtles and rare endemic iris species.
2. Strategic Planning for protected areas - parks, reserves and ecological corridors shared with "friendly" agriculture.

## Nature reserves and National parks Management

Twenty five percent of Israel land areas are protected ad Nature reserves or National parks. Managing protected areas involves:



Figure 5. Ecological corridors in Israel, marked in green.

1. Research (species red lists, animal's behavior and movement, etc.)
2. Action (sea turtles program, fallow deer reintroduction, streams rehabilitation, etc.)
3. Monitoring to view our action (animal counts, plant survey, co2 levels, etc.)
4. Guidelines and policy (light pollution policy, road over pass policy, etc.)

The majority of Israel's Parks and reserves are open spaces, only 75 out of 350 protected sites are fenced, and a ticket to visit needed. These intensive sites with a working staff focus on the visitors needs while preserving the site assets. The asset can be endangered species; rare habitat ancient fortress or stalactite, all must be protected and accessible for the public. While managing the site, it has to be monitored, in order to establish whether the visit is sustainable or harming the site assets.

However, a ranger that manages open space of nature reserves and national parks, focus on the ecological system such as species diversity, invasive species, etc. In those sites, the ranger managing visitors via marked trails, well-defined campsites and day visit only. Some of our nature reserves, e.g. Ayalon cave, are closed and only researchers with a permit can monitor and investigate it.

## **Ecological corridors management**

The ecological corridors includes core areas - nature reserves, national parks, forests and transit areas - agriculture (figure 5). Until recently, the ecological corridor was a scheme based on planning comities understanding where to develop and where leave open areas for wildlife and plants. However, that was insufficient and important areas approved for development. Therefore, in the last 5 years, the ecological corridors in Israel promote as a statutory plan by the INPA and the national planning comities. This plan focus on the regulation of agriculture use, roads and railways over and under passes, noise and light pollution, invasive species, fences etc.

## **Discussion and conclusion**

Israel is a highly populated country with four biogeographical zones and remarkable diverse ecological systems, habitats and species. INPA is the only government organization that act by law to protect species and to declare areas as national parks or nature reserves where everything is protected. Research, action plans and monitoring programs are applied for species and habitats, together with guidelines and policies. However, all of those above are not sufficient.

In this small country, nature does not have the luxury of large areas without human disturbance. Therefore, protecting Israel's species and habitats richness in the 21th century has to be nationwide with intensive public awareness and involvement. Israel land use, light pollution and habitat fragmentation are just few examples of the factors

that exclusively depends on human activities and planning. Hence, all INPA action plans requires supportive means from most governmental agencies and ministries.

The national ecological corridors plan is ca. 50% based on agriculture land use, expecting farmers to cooperate with species biodiversity goals. Furthermore, ministry of housing must take in consideration wildlife corridors while planning new settlements and roads.

Israel's light pollution map requires the ministry of transportation, together with the planning comities, to take wildlife night priorities while planning road lights and interchanges. Israel's electricity authority planning division, and even Israel air force training programs, must consider bird's migration routes, and season, in order to avoid collisions.

Even though Israel Nature & Parks Authority is a statutory agency managing about 30% of the country land, protecting habitats and species biodiversity main efforts is done outside the protective areas, trying to collaborate and affect other governmental ministries.

## Summary

Managing Israel nature include: species conservation in all of the country areas, with habitats protection in nature reserves and national parks. All protected areas need watchful management of species, habitats and visitors. The minority of the protected areas are highly intensive with ca. 50,000 - 250,000 visitors per year, hence requires measurements to manage the visitors in order to keep the site asset protected and sustainable. With nearly 2%, population growth per year, makes nature conservation a real challenge!

## References

- Israel Nature and Parks Authority official website; <https://www.en.parks.org.il/>
- Levin, N. & Shmida A. 2007. Determining Conservation Hotspots Across Biogeographic Regions Using Rainfall Belts: Israel as a Case Study; *Israel Journal of Ecology and Evolution*.
- Kravchenko, V. 2004. Biogeography and ecology of sand-dwelling noctuids (Noctuidae: Lepidoptera) in Israel. *Israel journal of Entomology*.
- Frumkin R. et.al. 1995. A review of bird migration over Israel. *Journal für Ornithologie*.  
<https://worldpopulationreview.com/countries/cities/israel>
- Ben-Moshe N, Renan I (Eds). State of Nature Report 2022 - Trends and Threats. Hamaarag - Israel's National Ecosystem Assessment Program, Steinhardt Museum of Natural History, Tel Aviv University.
- Rotem, D & Guck, E. (2021). Representation of large and natural ecological units in Israels protected areas, reassessment. INPA publications.
- Labin, T. et. al. (2017). Light pollution and its mitigation - Scientific background, current status and possible action plans. Experts' opinion, The Israel Society of Ecology and Environmental Sciences. pp 74
- Levin N, et.al. (2007). Landscape continuity analysis: A new approach to conservation planning in Israel. *Landscape and Urban Planning* 79: 53-64.
- Shkedy, Y & Sadot, E. (2000) Ecological corridors in Israel open areas as a means for nature conservation. INPA - Science Division.
- Rotem, et.al. (2015) Ecological corridors in Israel - Practice and guideline for planning and management. INPA - Science Division.

## Minerales luminiscentes de la Mina Rica y la "Sala Negra" de Pulpí (Almería)

Lucía MARTEGANI <sup>(1,2)</sup>, Fernando GÁZQUEZ SÁNCHEZ <sup>(1,2)</sup>, Ángel FERNÁNDEZ CORTÉS <sup>(1,2)</sup>, Juan GISBERT GALLEGO <sup>(1,2)</sup>, Milagros CARRETERO TORTOSA <sup>(3)</sup>, Jesús MORILLAS RAMOS <sup>(3)</sup>, Francisco Javier FERNÁNDEZ AMO <sup>(4)</sup>, José María CALAFORRA CHORDI <sup>(1,2)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo de Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Departamento de Biología y Geología. Universidad de Almería. lm263@ual.es, f.gazquez@ual.es, acortes@ual.es, jgisbert@ual.es, jmcalforra@ual.es

<sup>(2)</sup> Centro Andaluz de Evaluación y Seguimiento y del Cambio Global (CAESCG). Universidad de Almería.

<sup>(3)</sup> Geoda de Pulpí. Empresa Municipal del Suelo de Pulpí. 04640 Pulpí, Almería.  
milagrosarreterotortosa@gmail.com, jmorillasr@gmail.com

<sup>(4)</sup> Técnicas Mineras de Santa Marta S.L., francis@tecmineras.com

---

### Resumen

La Mina Rica de Pulpí (Almería) es conocida internacionalmente por albergar la mayor geoda de yeso descubierta en Europa hasta la fecha, que además es la única visitable a escala mundial. Sin embargo, antes del descubrimiento de la geoda en 1999, la mina ya era frecuentada por coleccionistas y aficionados a la mineralogía debido a la gran diversidad mineralógica que alberga y a su rico patrimonio minero. Algunos de estos minerales presentan propiedades luminiscentes al ser expuestos a la luz ultravioleta. Este fenómeno consiste en la emisión de luz visible de un color distinto al del mineral al ser éste sometido a un estímulo energético. Esta característica extremadamente visual de algunos de los minerales de la Mina Rica se ha convertido en uno de sus muchos atractivos turísticos. Recientemente, se ha abierto al público el Museo de Luminiscencia o "Sala Negra" en el núcleo urbano de Pulpí, que sirve como complemento perfecto a la visita a la mina. Cabe destacar que se trata del museo de minerales luminiscentes más grande de Europa. En este trabajo se han inventariado los más de 900 muestras de minerales luminiscentes expuestos en la Sala Negra y se ha analizado la mineralogía de algunos de los minerales de la Mina Rica. En el museo predominan los carbonatos (32%), entre los que destacan la calcita y el aragonito, seguidos de los silicatos hidratados (19%) como el ópalo, el ágata y la hyalita y de haluros como la fluorita (11%). Las coloraciones luminiscentes más frecuente son el blanco y el rosa, que suelen corresponder a la calcita y el aragonito, así como el morado de la fluorita, el anaranjado del ágata y el verde del ópalo y la hyalita. En la Mina Rica los minerales luminiscentes más comunes son la calcita (anaranjado o rosado), el yeso (blanco o morado), la celestina (blanco o anaranjado) y la barita (morado o anaranjado).

**Palabras clave:** luminiscencia, Mina Rica, sala negra.

## **Luminescent minerals from the Mina Rica mine and the "Dark Room" of Pulpí (Almería)**

### **Abstract**

*Mina Rica (Pulpí, Almería) is worldwide known for hosting the largest gypsum geode discovered to date in Europe, which is also the only one open to public on a global scale. However, before the discovery of the geode in 1999, the mine had already been frequented by collectors of mineralogy due to its great mineralogical diversity and rich mining heritage. Some of these minerals have luminescent properties when exposed to UV light. Luminescence consists of the emission of visible light, usually of a different color to the original mineral, when it is exposed to an energetic stimulus. This extremely visual feature of some of the minerals of the Mina Rica mine has become one of its main tourist attractions. The Luminescence Museum or "Dark Room" has been opened recently to the public in the Pulpí town. It is the largest museum of luminescent minerals in Europe and serves as a perfect complement to the mine visit. In this work, over 900 luminescent samples that are exhibited in the Dark Room have been inventoried and the mineralogy of some minerals from the Mina Rica mine has been analyzed. Carbonates is the most abundant mineral group in the museum (32%), being calcite and aragonite the most common, followed by hydrated silicates (19%) such as opal, agate and hyalite and halides such as fluorite (11%). The most frequent luminescent colors are white and pink, which usually correspond to calcite and aragonite, as well as purple in fluorite, orange in agate and green in opal and hyalite. In the Mina Rica mine, the most common luminescent minerals are calcite (orange or pink), gypsum (white or purple), celestine (white or orange) and barite (purple or orange).*

**Keywords:** dark room, luminescence, Mina Rica.

## **Introducción**

Entre las numerosas propiedades físicas que poseen los minerales, una de las que se destaca especialmente por su atractivo visual es la luminiscencia. El fenómeno de la luminiscencia se produce cuando un material recibe energía de una radiación incidente y consiste en la emisión de luz cuyo origen no es consecuencia directa de incandescencia, sino que se trata de una forma de radiación a baja temperatura (Klein y Hurlbut, 1997). Esta característica poco frecuente no sólo les otorga a los minerales luminiscentes una importante utilidad para su identificación, la prospección de menas minerales y la distinción entre piedras preciosas naturales y sintéticas (Modreski y Aumente-Modreski, 1996), sino que les aporta un elevado valor adicional como elementos turísticos y museísticos.

Cuando se produce el fenómeno de la luminiscencia, la luz se emite desde estados cuánticos de alta energía de un átomo, ion, molécula o red cristalina (Modreski y Aumente-Modreski, 1996). La fuente de energía necesaria para producir tales estados excitados puede variar y puede provenir de luz ultravioleta, calor, deformación mecánica



u otro tipo de radiación. Cada uno de estos procesos, y la respuesta de los minerales a ellos, darán lugar a diferentes tipos de luminiscencia (tabla 1). Aquella que se produce al exponer los minerales a una fuente de rayos ultravioleta se denomina de forma genérica fluorescencia. La radiación ultravioleta provoca la excitación de los electrones, que pasan desde su estado inicial o fundamental de menor energía a un estado excitado de mayor energía. Si bien el retorno de los electrones a su nivel energético original provoca la emisión de luz visible de igual longitud de onda, estas partículas pueden recaer en un estado intermedio (figura 1) y emitir un fotón luminoso de mayor longitud de onda que la excitación inicial (Klein y Hurlbut, 1997). Es decir que, independientemente del color generado, el resultado es principalmente una propiedad de aquellos minerales cuya superficie les permite absorber el ultravioleta invisible y reemitir parte de esta energía como luz visible (Robbins, 1983).

Al igual que el espectro de luz visible, el ultravioleta se divide en regiones de diferentes longitudes de onda que difieren en sus propiedades. En la actualidad, el instrumento utilizado como fuente de energía de esta radiación suele ser la lámpara de rayos ultravioletas. Los minerales varían en su capacidad de absorción de las porciones del espectro ultravioleta de forma desigual. De esta manera, algunos generan fluorescencia únicamente cuando son expuestos a rayos UV de onda corta (200-300 nm), otros cuando los rayos UV son de onda larga (300-380 nm) y otros lo hacen de forma indistinta (Klein y Hurlbut, 1997; Robins, 1983). El color de la luz emitida por fluorescencia no suele coincidir con la del mineral original, además de variar considerablemente con las longitudes de onda.

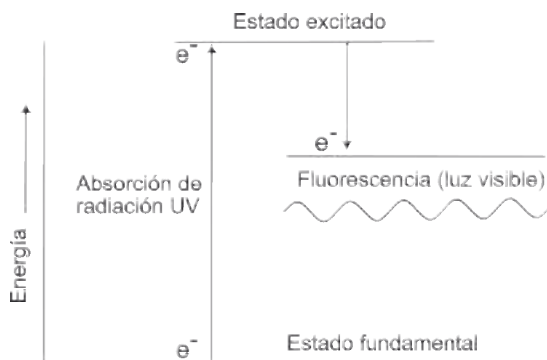


Figura 1. Niveles energéticos que participan en el proceso de fluorescencia. Tomado y modificado de Klein y S. Hurlbut (1997).

Es importante destacar que la propiedad de la fluorescencia no siempre se manifiesta en todos los ejemplares de un mismo mineral. Mientras algunos la presentan, otros, aparentemente similares e incluso localizados en el mismo yacimiento, pueden no ser fluorescentes. Esto se debe a que en la mayoría de los casos la fluorescencia depende de la presencia de elementos o compuestos activadores (Warren *et al.*, 1995.; Wenk y Bulakh, 2004). Los activadores suelen presentarse en los minerales en pequeñas cantidades en forma de impurezas. Algunos de los más comunes son el manganeso ( $Mn^{+2}$ ), europio ( $Eu^{+2}$ ), cromo ( $Cr^{+3}$ ) y tierras raras, como samario ( $Sm^{+3}$ ) y disprosio ( $Dy^{+3}$ ) (Modreski y

Aumente-Modreski, 1996). En ocasiones se requiere un segundo elemento o para producir fluorescencia, por ejemplo, el  $Pb^{+2}$  en combinación con  $Mn^{+2}$  son los causantes de la fluorescencia en la mayoría de los minerales que contienen manganeso. También puede suceder que los activadores estén compuestos por varios átomos, como es el caso de los grupos uranilo ( $UO_2^{+2}$ ), wolframato ( $WO_4^{-2}$ ), molibdato ( $MoO_4^{-2}$ ) y disulfuro ( $S_2^{-}$ ). En algunos minerales, como la scheelita ( $CaWO_4$ ) y la autunita [ $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10-12H_2O$ ], el activador es denominado intrínseco, ya que forma una parte esencial de la composición y la red cristalina (Robbins, 1994). Otra causa de la fluorescencia está relacionada con defectos en la red cristalina de los minerales (Wenk y Bulakh, 2004). Finalmente, en muchos otros minerales, el origen de la luminiscencia es complejo y actualmente no se conocen sus causas.

En cuanto a su ubicación, si bien los minerales fluorescentes pueden encontrarse en una gran variedad de localidades y rocas de caja, tienden a concentrarse en ciertos tipos de depósitos minerales, tales como skarns, yacimientos de zinc y manganeso, rocas ígneas alcalinas, carbonatitas y pegmatitas. En estos depósitos, los minerales fluorescentes más comunes son la fluorita ( $CaF_2$ ) (la cual da origen al nombre de esta propiedad), la willemita [ $Zn_2(SiO_4)$ ], la scheelita, la calcita ( $CaCO_3$ ), el aragonito ( $CaCO_3$ ), el ópalo ( $SiO_2 \cdot nH_2O$ ) y la autunita (Klein y Hurlbut, 1997).

La fosforescencia, que consiste en la emisión de luz una vez finalizada la excitación con rayos UV, se encuentra estrechamente relacionada con la fluorescencia, ya que sólo difieren en la cantidad de tiempo que tardan los electrones en regresar a su estado fundamental (Wenk y Bulakh, 2004). Mientras que en la fluorescencia los puestos vacantes de menor energía se completan en fracciones de segundo, en los minerales fosforescentes existe un tiempo de retardo entre la excitación de los electrones y su retomo al estado fundamental, por lo que continúan emitiendo luz, incluso durante horas en algunas ocasiones.

Existen además otros tipos de luminiscencia menos frecuentes en los minerales tales como la termoluminiscencia, la triboluminiscencia, la catodoluminiscencia y la

Tipo de luminiscencia	Fuente de energía	Ejemplos
Fluorescencia	Exposición del mineral a la acción de rayos UV	Fluorita, scheelita, calcita
Fosforescencia	Exposición del mineral a la acción de rayos UV	Fluorita, willemita, scheelita
Termoluminiscencia	Calentamiento del mineral a una temperatura por debajo del rojo	Fluorita, calcita, apatito
Triboluminiscencia	Deformación mecánica del mineral al ser molido o rayado	Cuarzo, fluorita, estibita
Catodoluminiscencia	Bombardeo al mineral de electrones de alta energía	Minerales carbonatcos
Radio luminiscencia	Irradiación al mineral con rayos X, gamma u otros	Calcita, aragonito, leucita

Tabla 1. Tipos principales de luminiscencia presentes en los minerales (Klein y Hurlbut, 1997; Correcher et al., 2004).

radioluminiscencia que ocurren cuando los minerales que presenta estas propiedades son expuestos a estímulos energéticos de distinta índole (tabla 1).

En este trabajo se ha llevado a cabo una categorización de los más de 900 minerales luminiscentes presentes en la Sala Negra de Pulpí (Almería), recientemente abierta al público como museo. Además, se han analizado algunos minerales de Mina Rica (Pilar de Jaravía, Almería) que poseen también esta propiedad. El objetivo principal fue identificar los tipos de minerales luminiscentes de Mina Rica y los colores de luminiscencia predominantes tanto en la mina como en la Sala Negra, lo que servirá como punto de partida para futuras acciones turísticas previstas en ambos sitios. Adicionalmente, se sugieren las posibles causas de la luminiscencia (activadores) de los minerales analizados, basándose en la bibliografía disponible.

## **Entorno geológico e importancia de Mina Rica**

La Mina Rica (concesión "Quien Tal Pensara"), se ubica en la vertiente oriental de la Sierra del Aguilón en Pilar de Jaravía, (Pulpí, Almería). Esta sierra forma parte del complejo Alpujárride (Cordillera Bética) y se localiza entre capas carbonáticas paleozoicas y metapelitas triásicas (Morales-Ruano, 1994; Martínez Frías, 1998; Martínez Frías *et al.*, 1998). En la mina se distinguen dos litologías predominantes. La primera forma las laderas de la Sierra del Aguilón y está constituida por filitas y cuarcitas con intercalaciones de areniscas, calcoesquistos, yesos, brechas y milonitas, con una potencia de unos 100 m. A este conjunto le suprayacen 50 m de rocas carbonáticas (calizas, dolomías y calcoesquistos), que forman los crestones de la sierra. La mineralización de Fe-Pb-Ag-Ba-Sb-Hg que motivó las tareas de explotación en Mina Rica, relacionada con actividad volcánica de edad miocena, se formó en un ambiente hidrotermal en tres pulsos diferentes, el primero depositó minerales de hierro y manganeso (siderita y los oxihidróxidos), el segundo sulfuros y sulfosales (galena, pirita y bournonita) y finalmente, sulfatos y mercurio (barita, celestina y mercurio) (Martínez-Frías, 1998; Fernández-Cortés *et al.*, 2006).

A partir de la segunda mitad del siglo XIX, la actividad extractiva en Mina Rica y los alrededores de la Sierra del Aguilón comenzó a adquirir importancia. En primera instancia y hasta 1870, se comenzó a explotar la galena argentífera para la obtención de plomo y plata. Posteriormente, los principales minerales de la mena fueron la siderita y los óxidos e hidróxidos ferrosos con el objetivo de explotar el hierro. En torno a 1890, el hierro pasó a ser el principal objetivo de la actividad minera en la Mina Rica, desplazando casi completamente a la plata. En los años siguientes la actividad minera fue perdiendo importancia en la zona de la Sierra del Aguilón y alrededores de forma progresiva, hasta que finalmente hacia 1970 se abandonó por completo (Calaforra y Ferrer, 2017).

Además de la singular diversidad mineralógica presente y el rico patrimonio minero legado por la actividad extractiva desarrollada durante décadas, la Mina Rica surgió como lugar de interés geoturístico al producirse en 1999 el descubrimiento de la Geoda

gigante por parte de un grupo de mineralogistas miembros de la Sociedad Mineralogista de Madrid. La geoda, ubicada entre el tercer y el cuarto nivel de explotación de la mina, se encaja en las dolomías triásicas que forman parte de la Sierra del Aguilón (Calaforra *et al.*, 2001). Alberga cristales de hasta 2 m de largo datados en 165.000 años (Gázquez *et al.*, 2022) y se trata de la mayor geoda de yeso descubierta hasta la fecha en Europa. La Mina Rica y la Geoda gigante fueron abiertas al público en el año 2019 gracias a los esfuerzos del Ayuntamiento de Pulpí y de la Junta de Andalucía, con la colaboración de la Universidad de Almería. Para ello se llevaron a cabo trabajos de reacondicionamiento y limpieza durante varios años. Actualmente, estas instalaciones cuentan con un recorrido turístico guiado con información geológica e histórica que se ha convertido en unos de los reclamos turísticos más importantes de la provincia de Almería.

## Museo de Luminiscencia de Pulpí

El Museo de Luminiscencia o Sala Negra de Pulpí, denominada de esta manera debido al color oscuro de sus paredes, suelo y techo, se inauguró en el Espacio Escénico de dicho municipio en diciembre de 2021 gracias a una colaboración entre el Ayuntamiento de Pulpí, la Empresa Municipal de Suelo de Pulpí S.L. y la Universidad de Almería. En esta sala se exhiben 13 vitrinas donde se encuentra expuesta una colección de más de 900 minerales y algunos fósiles luminiscentes de todas partes del mundo con variados colores de luminiscencia (figura 2). Si bien todos los minerales de la colección son fluorescentes, unos pocos son además fosforescentes, incluyendo algunos ejemplares sintéticos.



Figura 2. A) Imagen panorámica de la Sala Negra iluminada con bombillas de luz blanca. B) Sala Negra a oscuras con las vitrinas iluminadas con luz UV de onda larga. (Fotografías: Francisco Hoyos).

La sala cuenta con una visita guiada, donde el fenómeno de la luminiscencia puede ser observado en todas las vitrinas al iluminarlas con luz UV de onda larga, mientras que tres de ellas también pueden ser iluminadas con luz UV de onda corta. De esta manera se puede apreciar el cambio de color producido al someter a los minerales a luz UV con diferentes longitudes de onda. Conjuntamente con la Geoda de Pulpí de Mina Rica, la Sala Negra constituye un gran atractivo turístico para la zona, siendo el espacio con minerales y fósiles luminiscentes más grande de Europa abierto al público.

## Materiales y métodos

Este trabajo se llevó a cabo a partir de muestras de minerales luminiscentes presentes tanto en los diferentes niveles de Mina Rica como en la Sala Negra de Pulpí. Para la obtención de las primeras se realizó un recorrido general en la mina y se identificaron sectores con concentración de minerales luminiscentes utilizando una lámpara de luz UV portátil Alonfire H42UV equipada con longitudes de onda de 365 y 395 nm. Las muestras fueron seleccionadas de acuerdo con la diversidad en los colores de luminiscencia, además de contar con un tamaño apropiado para la realización de análisis (figura 3A, B y C). Posteriormente, se llevó a cabo una revisión detallada en laboratorio de las muestras obtenidas, donde se observó que el hábito de los sectores luminiscentes en cada una de ellas variaba considerablemente, presentándose como pátinas pulverulentas, formas

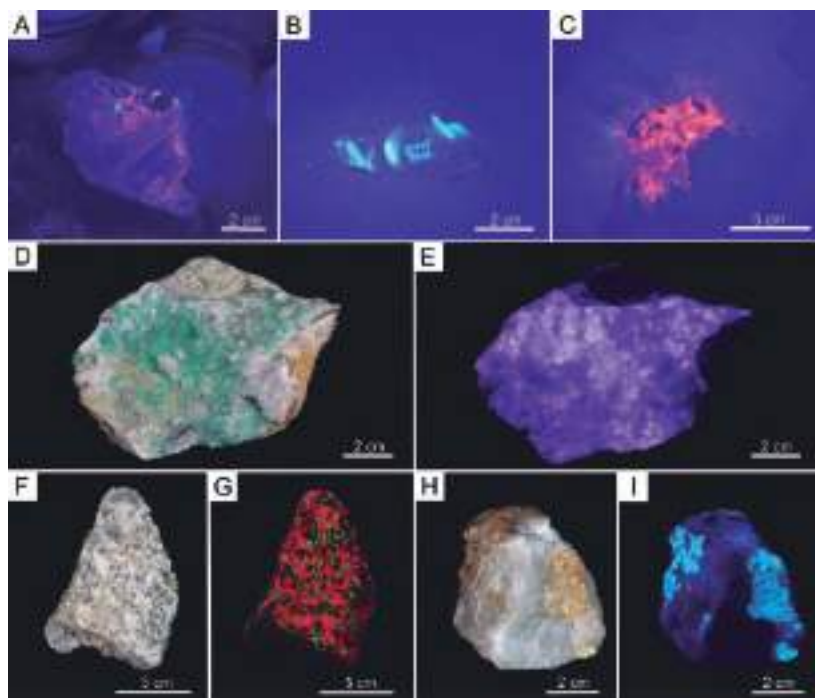


Figura 3. (A, B, C) Muestras de minerales luminiscentes de Mina Rica. (D, E) Fluorita con luz blanca y luz UV de onda larga, respectivamente (F, G) Paragénesis de calcita, willemita y franklinita con luz blanca y luz UV de onda corta, respectivamente. (H, I) Scheelita (y cuarzo) con luz blanca y luz UV de onda corta, respectivamente. (Fotografías: elaboración propia y Francisco Hoyos).

cristalinas y microcristalinas. Finalmente, con el objetivo de identificar los tipos de minerales luminiscentes de la mina, se molieron las muestras hasta obtener un polvo fino homogéneo que se utilizó para análisis de DRX empleando el equipo D8 ADVANCE modelo DAVINCI con radiación  $\text{Cu}_{K\alpha}$  ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ).

En el Museo de Luminiscencia, por su parte, se llevó a cabo un inventario de los más de 900 minerales y fósiles luminiscentes expuestos en sus vitrinas (figura 3D, E, F, G, H e I). En dicho inventario se tuvo en cuenta el tipo de mineral, su categoría en la clasificación de Dana y Strunz (Palache *et al.*, 1951; Strunz, 1970), el color de la luminiscencia y la longitud de onda bajo la cual emite luz.

## Resultados

### *Minerales luminiscentes de Mina Rica*

En la Mina Rica los minerales luminiscentes más frecuentes son los carbonatos y los sulfatos. Dentro de los primeros destacan la calcita y la dolomita  $[(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3]$ , que en general presentan colores de luminiscencia anaranjados o rosados. En cuanto a los sulfatos, abundan el yeso, que adquiere color blanco (figura 3B) o morado bajo luz UV, la celestina ( $\text{SrSO}_4$ ), con colores de luminiscencia blancos o anaranjados (figura 3A y C) y por último la barita ( $\text{BaSO}_4$ ), con luminiscencia morada o anaranjada. Cabe mencionar que el color de la luminiscencia de estos minerales se mantuvo al iluminar las muestras con las dos longitudes de onda proporcionadas por la lámpara UV portátil (365 y 395 nm).

### *Minerales luminiscentes de la Sala Negra de Pulpi*

En el Museo de Luminiscencia las dos clases de minerales predominantes son los tectosilicatos (34%) y los carbonatos (32%), seguidos por los haluros (11%) (figura 4A). En relación con los tipos de minerales, destacan la calcita y el aragonito (19% y 13%, respectivamente), a los que le siguen los silicatos hidratados como el ópalo (8%), la hyalita (7%) y el ágata (4%). Otros minerales abundantes en las vitrinas de la Sala Negra son la fluorita y la hackmanita  $[\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{Cl}_2, \text{S})]$  (11% y 3%, respectivamente) (figura 4B). Por su parte, los colores de luminiscencia más habituales son el blanco y los de la gama del rosa (rosa claro y fucsia), que suelen estar asociados a minerales frecuentes como la calcita y el aragonito, así como el anaranjado que producen el ágata y la hackmanita (entre otros), el verde del ópalo y la hyalita y el morado de la fluorita (figura 4C). Finalmente, en la Sala Negra, un 22% de las vitrinas cuentan con iluminación mediante luz UV de onda corta (además de luz UV de onda larga) y un 88% sólo se ilumina con luz UV de onda larga (figura 4D).

### *Posibles causas de la luminiscencia en los minerales de Mina Rica y la Sala Negra*

Aunque en los minerales pueden existir una gran variedad de elementos extraños, en general no resulta sencillo saber cuáles funcionan como activadores. Esto sucede, por

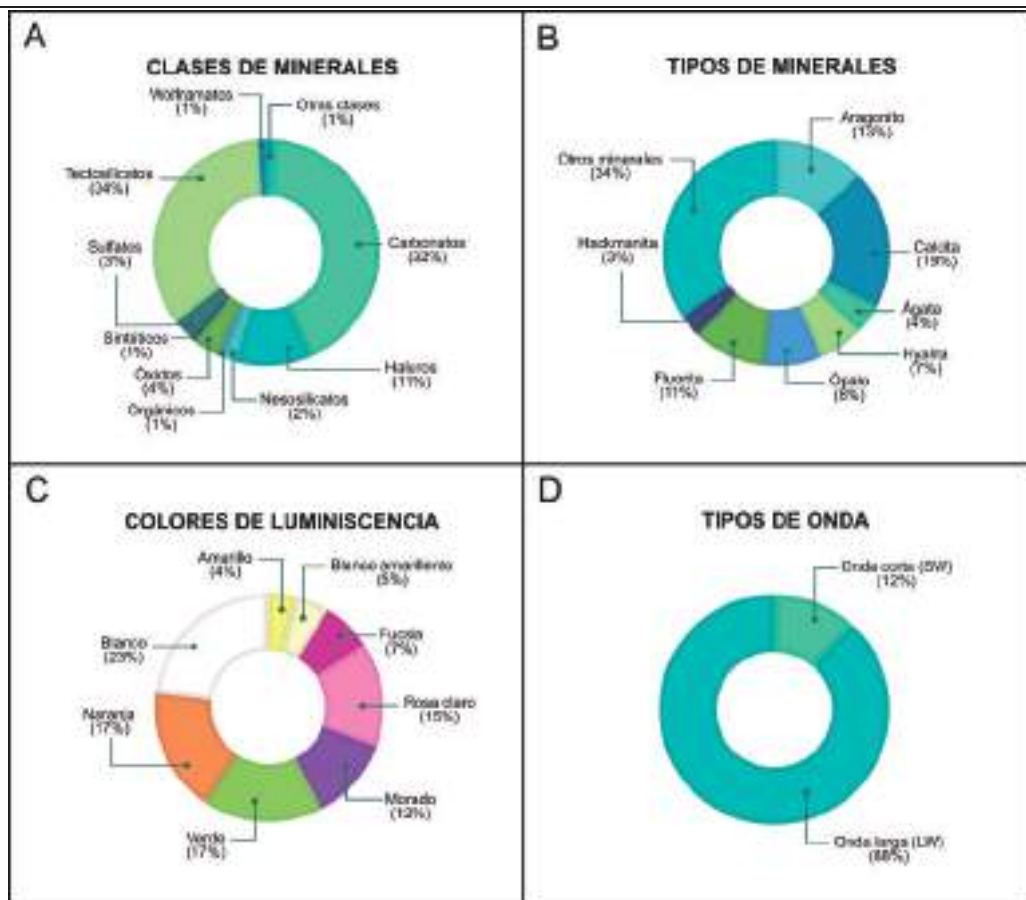


Figura 4. A) Clases de minerales luminiscentes de la Sala Negra de acuerdo con las clasificaciones de Palache et al. (1951) y Strunz (1970). B) Minerales luminiscentes más abundantes en la Sala Negra. C) Colores de luminiscencia más frecuentes en los minerales de la Sala Negra. D) Abundancia de las vitrinas que cuentan con luz UV de onda corta y de onda larga (SW y LW, respectivamente, según sus siglas en inglés).

un lado, porque algunos de ellos pueden generar propiedades luminiscentes incluso encontrándose en cantidades extremadamente pequeñas. Además, un mismo elemento activador puede generar diferentes colores de luminiscencia al estar rodeado por diferentes conjuntos de iones y ambientes mineralógicos (Warren et al., 1995).

En consecuencia, el estudio de los activadores en los minerales luminiscentes ha sido objeto de diversas investigaciones a lo largo del tiempo (White, 1975; Robbins, 1983; Robbins, 1994; Modreski y Aumente-Modreski, 1996; Wenk y Bulakh, 2004). De acuerdo con estos autores, los principales elementos que poseen un rol de importancia como activadores son el manganeso, las tierras raras y el uranio, entre otros.

El  $Mn^{2+}$ , y probablemente el  $Pb^{2+}$  como coactivador, podrían ser los causantes de los colores anaranjados y rosas en la calcita (y también de los verde en la willemita, e.g.

figura 3G). Por su parte, el  $\text{Eu}^{+2}$  podría ser el responsable de la luminiscencia morada de la fluorita (figura 3E). Los colores verdes de luminiscencia, como el de la hyalita, suelen atribuirse al U (que actúa en forma de  $\text{UO}_2^{+2}$ ), mientras que el origen de los colores anaranjados de la hackmanita estaría relacionado con la presencia de S (en forma de  $\text{S}_2^-$ ).

En el caso de la scheelita, su característico color de luminiscencia blanco azulado podría estar ligado al grupo wolframato ( $\text{WO}_4^{-2}$ ), que forma parte de su estructura cristalina. A pesar de la lista de activadores proporcionada previamente, el conocimiento actual de la acción de estos elementos es aún incompleto y existen todavía gran cantidad de minerales en los que la causa de su luminiscencia es desconocida.

## **Futuras acciones turísticas en la Mina Rica y la sala negra**

El conocimiento generado en este trabajo sobre los minerales luminiscente de la Mina Rica y de la Sala Negra de Pulpí podrán utilizarse en un futuro cercano para enriquecer la información turística que reciben los visitantes durante las visitas. Si bien existe actualmente una parte del recorrido turístico dentro de Mina Rica donde pueden observarse minerales luminiscentes *in situ*, se prevé confeccionar una vitrina similar a las expuestas en la Sala Negra que contenga minerales luminiscentes propios de Mina Rica. Esta vitrina será colocada dentro de la mina con la correspondiente descripción de cada mineral y pasará a formar parte de la visita guiada. Además, se está trabajando en un compendio con fotografías e información geológica de detalle sobre los minerales presentes en la Sala Negra y su luminiscencia y en un tríptico previsto para entregar al público que visite el museo, con un resumen de los resultados obtenidos en este estudio. Paralelamente, se prevé realizar análisis adicionales de las muestras luminiscentes mediante fluorescencia de rayos X y espectrometría de masas para determinar los activadores que generan la luminiscencia en estos minerales.

## **Agradecimientos**

El presente trabajo ha sido financiado a través del Proyecto de transferencia de conocimiento UAL-Transfiere (LUMMIN) de la Universidad de Almería. Los autores agradecen especialmente a D. Manuel Guerrero por la colaboración en la obtención de las muestras en la Mina Rica y a D. Francisco Hoyos, quien ha cedido las fotografías utilizadas para ilustrar este trabajo.

## **Referencias**

- Calaforra, J.M., Moreno, R., García-Guinea, J., Guerrero, M., Romero, A. (2001). La geoda gigante de Pulpí (The giant Geode of Pulpí): Patrimonio geológico y minero. *Medio Ambiente*. 37: 42-43.
- Calaforra, J.M., Ferrer, V. (2017). La Geoda Gigante de Pulpí. Pilar de Jaravia (Almería). *Diputación de Almería (ed.)*. 78 pp. ISBN:9788494172588.
- Correcher, V., Valle Fuentes, F.J., García-Guinea, J. (2004). Espectros de emisión de radioluminiscencia y termoluminiscencia de una leucita de Monte Somma (Italia). *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 43 (4): 919-924.



- Fernández-Cortés, Á., Calaforra, J.M., García-Guinea, J. (2006). The Pulpí gigantic geode (Almería, Spain): geology, metal pollution, microclimatology, and conservation. *Environmental Geology*. 50(5): 707. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0243-z>.
- Gázquez, F., Monteserín, A., Obert C., Münker, C., Fernández-Cortés, Á., Calaforra, J.M. (2022). The Absolute Age and Origin of the Giant Gypsum Geode of Pulpí (Almería, SE Spain). *Geosciences*. 12: 144
- Klein C., Hurlbut, C.S. Jr. (1997). Manual de mineralogía. Vol. 1 (4a. ed.). Basado en la obra de J.D. Dana. Editorial Reverté. Barcelona. 396 pp.
- Martínez-Frías, J. (1998). An ancient Ba–Sb–Ag–Fe–Hg bearing hydrothermal system in SE Spain. *Episodes*. 21: 248–251. <https://dx.doi.org/10.18814/epiiugs/1998/v21i4/006>.
- Martínez-Frías, J., Navarro, A., Lunar, R., García-Guinea, J. (1998). Mercury pollution in a large marine basin: a natural venting system in the south-west Mediterranean margin. *Nature Resources* 34(3): 9–15. <http://hdl.handle.net/10261/75988>.
- Morales-Ruano, S. (1994). Mineralogía, geoquímica y metalogénia de los yacimientos hidrotermales del SE de España (Águilas-Sierra Almagrera) (Mineralogy, geo-chemistry and metalgenesis of hydrothermal outcrops in SE Spain, Águilas-Sierra Almagrera). *Tesis doctoral. Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Universidad de Granada*, Granada.
- Modreski, P.J., Aumente-Modreski, R. (1996). Fluorescent Minerals. *Rocks & Minerals*, 71(1): 14–22.
- Palache, C., Berman, H, Frondel C. (1951). The System of Mineralogy, 7ª ed., vol. II. *John Wiley & Sons*, 1124 pp.
- Robbins, M. A. (1983). *Collector's book of fluorescent minerals*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Robbins, M. A. (1994). *Fluorescence. Gems and Minerals under Ultraviolet Light* Geoscience Press, Phoenix, AZ, 374pp.
- Strunz, H. (1970). Mineralogische Tabellen, 5ª ed. *Akademische Verlagsgesellschaft*, Leipzig, 621 pp.
- Warren, T. S., Gleason Bostwick S.R Verbeek E.R. (1995). Ultraviolet light and fluorescent minerals. *Published by Thomas S. Warren*.
- Wenk H., Bulakh, A. (2004). Color. In: *Minerals: Their Constitution and Origin*. Cambridge University Press, 208-216.
- White, W.T. (1975). Luminescent materials. *Transactions of the American Crystallographic Association*, 11: 31-49.



# Determinación de los niveles de gas radón en la cueva del Viento (Tenerife, Islas Canarias): Estudio dinámico y valoración de riesgo radiológico

María Esther MARTÍN GONZÁLEZ <sup>(1)</sup>, Xiomara DUARTE RODRÍGUEZ <sup>(2)</sup>, Pedro A. SALAZAR CARBALLO <sup>(2,3)</sup>, María LÓPEZ PÉREZ <sup>(2)</sup>, M. Candelaria MARTÍN LUIS <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Museo de Ciencias Naturales. Organismo Autónomo de Museos y Centros. 38003. Santa Cruz de Tenerife, Tenerife, España. mmartin@museosdetenerife.org

<sup>(2)</sup> Laboratorio de Física Médica y Radioactividad Ambiental (FIMERALL). SEGA. Universidad de La Laguna. 38200. San Cristóbal de La Laguna, Tenerife, España. fimerallsega@ull.edu.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Medicina Física y Farmacología, Facultad de Ciencias de la Salud. Universidad de La Laguna. 38200. San Cristóbal de La Laguna, Tenerife, España. psalazar@ull.edu.es

<sup>(4)</sup> Departamento de Biología Animal, Edafología y Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de La Laguna. 38200, San Cristóbal de La Laguna, Tenerife, España. mcmartin@ull.edu.es

---

## Resumen

La cueva del Viento es un tubo volcánico situado en la isla de Tenerife (Islas Canarias). Posee una longitud de 18,5 km y es el quinto tubo volcánico más largo de la Tierra. Su tramo turístico (180 m), recibe cada año más de 28.000 visitantes. Desde el punto de vista de la protección radiológica, la determinación de los niveles de gas radón en cuevas turísticas es de gran interés ya que la inhalación de radón es la segunda causa de cáncer de pulmón. Por ello, y de acuerdo con lo establecido en la legislación europea y española, se ha realizado un programa de control exhaustivo de los niveles de radón en la cueva del Viento para conocer su valor anual promedio y sus fluctuaciones estacionales, con el fin de minimizar la exposición frente al gas radón de trabajadores, turistas y espeleólogos. Los resultados obtenidos sugieren una dinámica temporal compleja en la que los niveles de radón pueden oscilar en un rango de 0-5.000 Bq/m<sup>3</sup>. Principalmente se detectan dos comportamientos bien diferenciados: (1) bajos niveles de gas radón en el interior de la cueva durante la estación húmeda (<300 Bq/m<sup>3</sup>), (2) valores elevados durante la estación seca (>1.000 Bq/m<sup>3</sup>). A su vez, la serie temporal de radón presenta variaciones diurnas y semidiurnas, debido al régimen de ventilación natural y a la acción de variables meteorológicas. La temperatura externa, las precipitaciones, y por ende la humedad del suelo, parecen ser parámetros claves que regulan los niveles de exhalación de gas radón. Se ha calculado la dosis efectiva de los trabajadores considerando un promedio de 10 horas semanales en el interior del tubo volcánico. Los cálculos de dosis efectivas hechos hasta el momento, mediante el empleo de detectores trazas, indican un valor anual de 2 mSv/año.

**Palabras clave:** cueva del Viento, guías turísticos, protección radiológica, radón, Tenerife.

## ***Establishing radon gas levels in the cueva del Viento (Tenerife, Canary Islands): Dynamic study and radiological risk assessment***

### **Abstract**

*The cueva del Viento is a volcanic tube located on the island of Tenerife (Canary Islands), it has a length of 18.5 km, being the fifth longest volcanic cavity on Earth. Every year, almost 28,000 people visit its touristic section, with 180 m in length. The assessment of radon gas levels in tourist caves is of major relevance from the standpoint of radioprotection, as radon inhalation is the second largest cause of lung cancer. As a result, and in compliance with European and Spanish regulations, an exhaustive monitoring program of the radon levels was carried out to determine its average annual value and its seasonal oscillations in La cueva del Viento. The main goal of this work has been to minimize radon gas exposure of workers, visitors, and cavers. Our results point to a complex temporal dynamic in which radon levels might fluctuate between 0-5,000 Bq/m<sup>3</sup>. Two well-differentiated behaviors were identified: (1) Low radon gas levels within the cave during the rainy season (<300 Bq/m<sup>3</sup>), (2) High levels during the dry season (>1,000 Bq/m<sup>3</sup>). Due to the natural ventilation regime and the effect of meteorological factors, the radon time series exhibits diurnal and semi-diurnal variations. Temperature, precipitation, and hence soil moisture, appear to be crucial components that controls radon gas exhalation levels. The effective dose for workers was computed based on a weekly average of 10 hours in the volcanic tube. Effective dose calculations made to date, using trace detectors, indicate an annual value of 2 mSv/year.*

**Keywords:** *cueva del Viento, radioprotection, radon; Tenerife, show caves.*

## **Introducción**

El radón (<sup>222</sup>Rn) es un gas radioactivo ubicuo en la naturaleza que se genera a partir del decaimiento natural del <sup>226</sup>Ra (serie radiactiva del <sup>238</sup>U). Este gas es incoloro, inodoro e insípido y está compuesto principalmente por el isótopo <sup>222</sup>Rn. Por su carácter de gas inerte, se encuentra libre en la naturaleza, originándose donde quiera que existan minerales con uranio y/o radio, los cuales se hallan repartidos de forma heterogénea en la corteza terrestre (Field 2007; Somlai *et al.*, 2009; Álvarez-Gallego *et al.*, 2015). Este carácter gaseoso del radón le confiere, además, una gran movilidad en el seno de la corteza terrestre, migrando desde su lugar de origen (emanación), a través de poros y grietas, hasta la atmósfera (exhalación), en donde se dispersa y su concentración suele ser muy baja (<5-15 Bq/m<sup>3</sup>). Por el contrario, en espacios cerrados con mala ventilación, como sótanos, garajes, minas, cuevas, túneles, etc., puede acumularse, llegando a alcanzar concentraciones perjudiciales para la salud (300-10.000 Bq/m<sup>3</sup>).

El <sup>222</sup>Rn es un emisor alfa con una vida media de 3,82 días (figura 1), el cual una vez inhalado puede generar, por decaimiento radiactivo, otros emisores alfa y beta de carácter sólido que permanecen en nuestros pulmones indefinidamente. Dichas partículas alfa

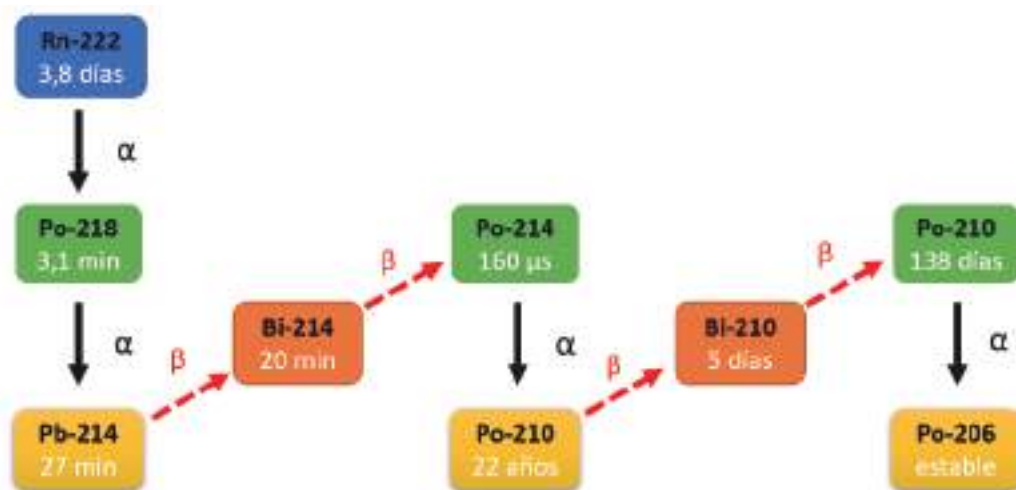


Figura 1. Serie radiactiva natural del  $^{238}\text{U}$  a partir del  $^{222}\text{Rn}$ .

poseen suficiente energía para producir ionización en el epitelio pulmonar y a largo plazo pueden ser responsables de la aparición de cáncer de pulmón. Cabe indicar que son sus hijos emisores alfa ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ), los más perjudiciales para la salud humana, ya que son los que más contribuyen a la dosis efectiva total. El radón es la segunda causa de cáncer de pulmón después del tabaco, aunque la sinergia entre ambas causas produce que la mayoría de los casos de cáncer de pulmón inducidos por el radón se dé en fumadores (WHO, 2009). Estudios recientes en Europa, Norteamérica y Asia sobre el radón en interiores y el cáncer de pulmón, aportan pruebas sólidas de que el radón provoca un número sustancial de casos de cáncer de pulmón en la población general. Las estimaciones actuales sobre la proporción de los casos de cáncer de pulmón atribuible al radón varían entre un 3% y un 14%, según la concentración media de radón en el correspondiente país y los métodos de cálculo empleados. En España, las últimas estimaciones indican que alrededor de 900 personas al año mueren de cáncer de pulmón asociado exclusivamente al radón (Ministerio de Sanidad, 2021), un número similar al de fallecidos en accidentes de tráfico anuales en los últimos años.

Ante la extensa evidencia científica que pone de manifiesto la existencia de una relación causa-efecto entre la exposición al gas radón y el cáncer de pulmón, en febrero de 1990 la Comisión Europea publicó su Recomendación 90/143/Euratom, y posteriormente, la Directiva 2013/59/Euratom. Esta última obligaba a los estados miembros a actualizar su legislación estableciendo como nivel de referencia el promedio anual de  $^{222}\text{Rn}$  en aire en  $300 \text{ Bq/m}^3$ . El estado español incorporó dichas directrices en el R.D. 732/2019, por el cual se modificaba el anterior Código Técnico de la Edificación, sin embargo este R.D. es específico para edificaciones y no es directamente aplicable a ambientes subterráneos naturales como cavidades kársticas o tubos de lava. La Directiva europea es por tanto vinculante a pesar de no existir (actualmente) una normativa estatal que la desarrolle, en concreto para el caso de espacios confinados como las cavidades volcánicas. Por otro

lado, las normas relativas a la protección radiológica de los trabajadores se encuentran recogidas en el Reglamento de Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes (R.D. 783/2001), el cual recoge las Recomendaciones de 1990 del ICRP (Comisión Internacional de Protección Radiológica). En base a dicha normativa se establece un límite de dosis efectiva de 1 mSv/año para la población general (público) y de 100 mSv de promedio en 5 años (20 mSv/año) para las personas dedicadas a trabajos que impliquen una exposición radiactiva (industria nuclear, radiología médica, minería, etc.), con un máximo de 50 mSv en un único año. Más restrictiva aún es la Instrucción IS-33 del Consejo de Seguridad Nuclear, que establece un valor de dosis efectiva a los trabajadores de 6 mSv/año y cuya superación requiere de dispositivos de vigilancia y la adopción de medidas de control alto (de tipo técnico o administrativo) destinadas a reducir las exposiciones. La Directiva 2013/59/Euratom también establece (artículo 35.2) que respecto a los lugares de trabajo (aplicable a los guías turísticos de cavidades): *“en los que la exposición de los trabajadores pueda superar una dosis efectiva de 6 mSv por año o el valor correspondiente de exposición al radón integrado en el tiempo que determinen los Estados miembros, estos se gestionarán como situación de exposición planificada y los Estados miembros determinarán cuáles de los requisitos fijados en el presente capítulo son adecuados. Respecto de los lugares de trabajo especificados en el artículo 54, apartado 3, y en los que la dosis efectiva anual para los trabajadores sea inferior o igual a 6 mSv, o en los que la exposición sea inferior al valor correspondiente de exposición al radón integrado en el tiempo, la autoridad competente exigirá que las exposiciones se sometan a revisión”*

El radón, debido a su mayor densidad con respecto al aire, tiende a acumularse en los niveles inferiores de cualquier recinto (natural o artificial). Además, factores ocupacionales como la ventilación natural o forzada y las condiciones ambientales y meteorológicas, afectan a los niveles registrados en viviendas, edificios y lugares subterráneos terrestre (Field, 2007; Somlai *et al.*, 2009; Álvarez-Gallego *et al.*, 2015). Por ejemplo, en regiones cálidas, la concentración en el interior de los edificios suele ser menor que en regiones frías, debido a un mayor aislamiento del exterior por el gradiente térmico en estos últimos. A su vez, los cambios de presión y temperatura pueden generar modulaciones diarias y estacionales en los niveles de radón y las lluvias intensas pueden favorecer la exhalación del gas por el basamento seco y poroso en edificios. Dicho comportamiento hace que, en nuestro país, durante los meses de invierno se registren valores más elevados de radón. Es bastante frecuente registrar un valor máximo durante el día y mínimo durante la noche, con una variación del orden del 20% con respecto al promedio diario; mientras que la variación estacional puede ser mayor, del orden del 50% con respecto al promedio anual.

Sin embargo, dicha aproximación y comportamiento (estacional y diario) no se puede extrapolar directamente a entornos subterráneos, donde muchas variables como la ventilación forzada, el diseño de barreras impermeabilizantes, etc., no pueden ser empleados. Incluso los porcentajes de cambio estacionales y diarios pueden ser muy superiores a los descritos anteriormente, como veremos más adelante, y seguir otros patrones de comportamiento. Los principales factores que pueden favorecer la acumulación de radón en ambientes subterráneos son: 1) el reducido intercambio de aire con la atmósfera exterior; 2) el lixiviado de elementos radiactivos desde la roca circundante hacia el interior de la cavidad por la acción de las aguas meteóricas; 3) la relación de

densidades entre el aire atmosférico/aire subterráneo; 4) variaciones de la humedad del suelo; 5) fenómenos de condensación que provocan el aislamiento de las cavidades subterráneas; 6) el régimen pluviométrico; 7) variaciones térmicas (efecto chimenea), etc. Finalmente, otros factores endógenos como la existencia de fallas activas o la actividad sísmica y/o volcánica, pueden producir cambios puntuales en la concentración de radón en las cuevas.

Varios estudios a nivel mundial han analizado la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en diversas cuevas, mostrando un amplio rango de concentraciones: : 0.1-20 kBq/m<sup>3</sup> (Hakl *et al.*, 1997 ); 0,3-8 kBq/m<sup>3</sup> (Pinza-Molina *et al.*, 2009); 31,9 kBq/m<sup>3</sup> (Álvarez-Gallego *et al.*, 2015); 1,9-8,4 kBq/m<sup>3</sup> (Alberigi *et al.*, 2011); 9,6- 91,8 kBq/m<sup>3</sup> (Wang *et al.*, 2019 ); 0,01-47,4 kBq/m<sup>3</sup> (Waring *et al.*, 2021). Además, según el modo de ventilación, profundidad y configuración de la cueva, se han descrito diferentes concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$ , así como complejos patrones estacionales. Recientemente, Wang y colaboradores (2019) clasificaron 35 cuevas según su morfología, identificando cinco tipos de regímenes de ventilación con diferentes fluctuaciones de  $^{222}\text{Rn}$  entre las estaciones húmeda y seca.

En base a los datos anteriormente presentados, queda evidenciado que los turistas, espeleólogos y guías turísticos de este tipo de enclaves subterráneos pueden estar expuestos a los efectos perjudiciales del Rn. Por tanto, es necesario minimizar el riesgo de exposición en este tipo de entornos laborales mediante un programa de evaluación de los niveles de  $^{222}\text{Rn}$ , con el que puedan tomar las decisiones oportunas sobre la protección radiológica de trabajadores y visitantes. Como se ha indicado anteriormente, los niveles de Rn están sujetos a variaciones estacionales importantes, por tanto, dicho estudio se recomienda que tenga una duración de al menos un ciclo anual completo. Estudios anteriores realizados en la cueva del Viento por nuestro laboratorio (Pinza-Molina *et al.*, 2009), mostraron niveles de radón entre 6,3-9,7 kBq/m<sup>3</sup> en julio de 1995 y entre 4,0-6,9 kBq/m<sup>3</sup> en marzo de 1997, lo que parece indicar una cierta estacionalidad, aparentemente con niveles más altos en verano que en invierno. Estos niveles son bastante superiores al límite de 300 Bq/m<sup>3</sup> establecido en la Directiva 2013/59/Euratom, aunque se debe señalar que este análisis fue realizado en el tramo no visitable de la cueva.

El objetivo principal del presente trabajo es estimar el promedio anual de  $^{222}\text{Rn}$  y la dosis efectiva anual recibida por los guías turísticos en la sección visitable de la cueva del Viento. Tanto las concentraciones de radón como las principales variables ambientales fueron registradas durante un año y medio aproximadamente. Se aplicaron diferentes métodos para cuantificar el gas  $^{222}\text{Rn}$  (detectores pasivos y activos) con distintas resoluciones temporales. El detector activo proporcionó una mejor resolución temporal (medidas horarias) de los cambios en las concentraciones dentro de la cueva. Se utilizaron detectores pasivos para cubrir las otras localizaciones de la cueva. A partir de los resultados obtenidos con los detectores pasivos se pudo calcular la concentración mensual, dosis mensual y evidenciar y cuantificar las fluctuaciones anuales. Por otro lado, los datos en continuo, de resolución horaria, permitieron proponer un modelo de circulación de aire en el corto (diario) y largo (anual) periodo en el que los cambios dinámicos de  $^{222}\text{Rn}$  registrados son influenciados principalmente por dos variables exógenas: la temperatura (correlación positiva) y el régimen de precipitaciones (correlación negativa).

## Descripción geológica de la zona de estudio

La cueva del Viento es un tubo volcánico situado en el flanco norte del volcán Pico Viejo, situado a 750 metros sobre el nivel del mar, en el Valle de Icod, en la isla de Tenerife (figura 2). La cueva del Viento se originó durante las primeras erupciones del volcán Pico Viejo, hace ca.  $27.030 \pm 430$  años, a partir de lavas de tipo pahoehoe, de composición basáltica y ricas en plagioclasa (Carracedo y Troll, 2013). La cueva tiene una extraordinaria

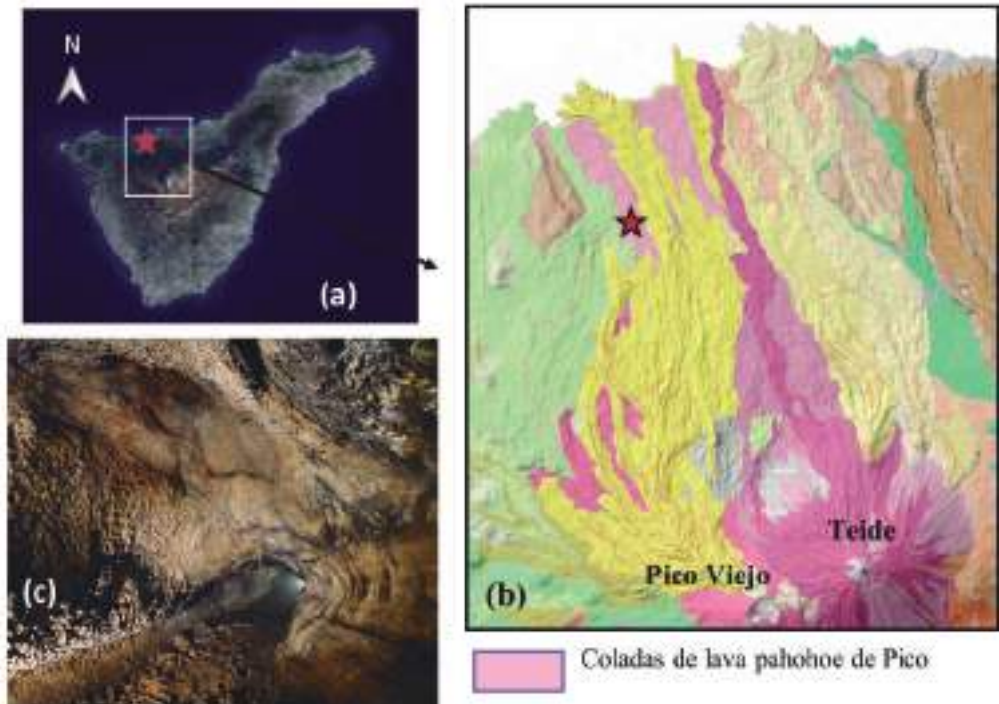


Figura 2. Localización de la cueva del Viento en la isla de Tenerife (a y b). La cueva está marcada con una estrella de color rojo. (b) Esquema geológico de la zona (Modificado de Carracedo y Troll, 2013). (c) Vista de la sección del tubo volcánico visitable.

complejidad, con varios tubos y ramales en tres niveles superpuestos e interconectados, simas de hasta 12 m de profundidad y varios jameos (Oromí, 2018). Otras estructuras menores son crestas, repisas y plataformas de lava, techos secundarios, estafilitos, canales lávicos y cascadas de lava. Con 18,5 km de longitud (Oromí y Socorro, 2021), la cueva del Viento es considerada como la quinta cavidad volcánica más larga de la Tierra (Carracedo y Troll, 2013).

El tramo turístico de la cueva del Viento tiene una longitud de unos 180 m. La explotación turística de la cueva está gestionada por el Organismo Autónomo de Museos y Centros del Cabildo de Tenerife, a través de la empresa pública IDECO, realizando diariamente entre 6 y 8 visitas con grupos de 15 personas y una duración aproximada de 1 hora en el interior. El máximo de rutas por guía es de 2 diarias, lo que supone una estancia máxima



de 2 horas diarias en el interior de la cueva. Durante 2019 la cueva recibió más de 28.200 visitantes, número que se redujo considerablemente en 2020 (4.820 personas) debido a la pandemia de la COVID-19, aunque en 2021 y 2022 se han recuperado los valores anteriores.

$$D_{Rn} \left[ \frac{mSv}{año} \right] = C_{Rn} \cdot D \cdot H \cdot F \cdot T$$

## Metodología

### *Detectores de trazas, cálculo de la dosis efectiva y promedio anual*

Las medidas en modo discontinuo de radón se llevaron a cabo en cinco localizaciones a lo largo de todo el perfil visitable (figura 3). Mensualmente, dichos detectores fueron expuestos al ambiente de la cueva (figura 4), retirados y conservados en ambiente inerte antes de ser analizados en el laboratorio Raducan S.L., acreditado bajo la norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2017 (acreditación ENAC nº: 1204/LE2219), donde fueron convenientemente analizados. La dosis efectiva anual (DRn) recibida debido al gas radón se puede estimar, siguiendo las recomendaciones de la United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNCEAR, 2000), a partir de la concentración promedia durante el periodo de estudio (un año), usando la Ecuación 1:

donde:

**C<sub>Rn</sub>** = Concentración de 222Rn [Bq/m<sup>3</sup>]

**D** = Factor de conversión de la dosis (9 · 10<sup>-6</sup>) [mSv · m<sup>3</sup> / Bq · h]

**H** = Factor de ocupación (0,055)

**F** = Factor de equilibrio (0,56)

**T** = Tiempo de ocupación (24 · 365 = 8.760) [h/año]

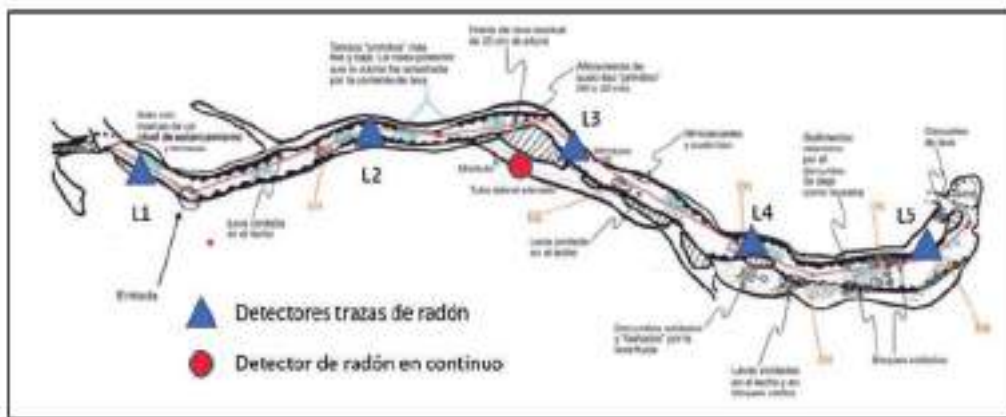


Figura 3. Mapa de la cueva del Viento con los distintos puntos de muestreo.

Cabe destacar que en este caso se ha elegido un valor de 0.56 para el factor de equilibrio (F) en lugar del que normalmente se utiliza (0.4), recomendado por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) para viviendas. Este valor (0,56) se ha seleccionado como valor promedio obtenido a partir de unas 900 medidas en cuevas y es utilizado frecuentemente en estudios radiológicos en lugares de trabajo subterráneos como en cuevas (Álvarez-Gallego *et al.*, 2015; Cigna, 2005 ; Yamada *et al.*, 2021).

Debido a la distribución no normal de los datos, la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  (mensual, anual) y la dosis calculada puede cambiar en función del parámetro de centralización empleado (media aritmética o geométrica, varianza, etc.). Por esta razón, para calcular la dosis efectiva anual recibida por los guías turísticos hemos procedido de la siguiente forma: 1) determinamos los valores de dosis mensuales en cada punto de acuerdo con la Ecuación 1, asumiendo un tiempo de permanencia en la cueva de 43 h/mes (y considerando un tiempo de exposición en cada punto de unas 8,6 h/mes); 2) las dosis mensuales se obtuvieron como la suma de las dosis calculadas en cada punto, y 3) las dosis anuales como la suma de los valores mensuales.

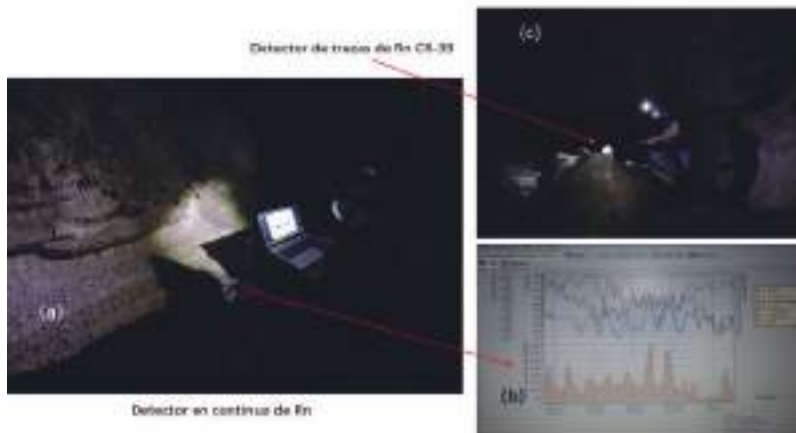


Figura 4. (a) Ubicación del monitor de radón en continuo en la localización L3; (b) Ejemplo de evolución temporal de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  durante un mes en el interior de la cueva del Viento con el monitor en continuo. (c) Localización de uno de los detectores de trazas.

### Medidas en modo continuo y análisis temporal de los resultados

Para las medidas de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en modo continuo en el interior de la cueva, se instaló un detector Radon Scout Plus (SARAD GmbH) a unos 100 m de la entrada (figura 3). Este equipo dispone de un detector de estado sólido (Silicio) diseñado para la medida de la actividad alfa integrada (tiempo de integración 1 h). Durante el tiempo de muestreo la cueva ha sido visitada periódicamente para descargar datos (figura 4) y comprobar el

funcionamiento del detector. Adicionalmente, fueron recopilados diferentes parámetros ambientales, registrados por el mismo equipo y otros proporcionados por una estación meteorológica (estación Llanito de Perera, de AgroCabildo), situada a 2 km de La cueva del Viento. La serie temporal experimental de radón se analizó en los dominios de tiempo y frecuencia. Los análisis de frecuencia se realizaron utilizando análisis de transformada rápida de Fourier (FFT) y transformada de Wavelet (WT). La evolución temporal se estudió mediante la metodología Box-Jenkins, mediante el modelo Autorregresivo de Medias Móviles Integradas (ARIMA) para el análisis y pronóstico de series temporales. Se utilizaron diferentes paquetes: Forecast (Hyndman *et al.*, 2020) y Biwavelet (Gohier *et al.*, 2021) (R-Software) para el análisis de series temporales y estudiar la correlación entre los niveles de  $^{222}\text{Rn}$  en interiores y diferentes variables endógenas y exógenas.

## Resultados y discusión

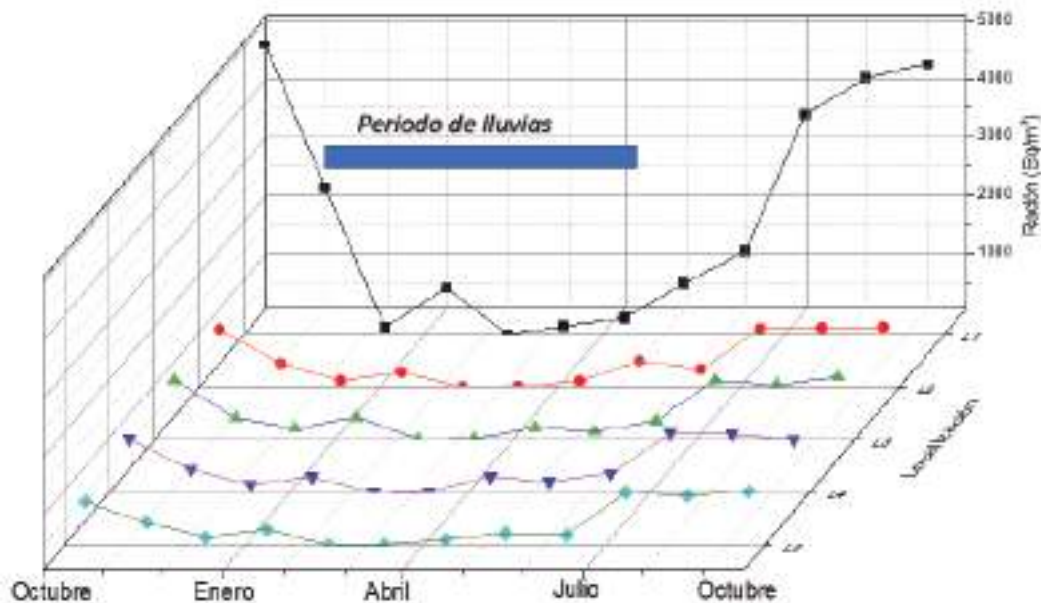


Figura 5. Evolución temporal del promedio mensual de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  durante un año en la interior de La cueva del Viento en las diferentes localizaciones de muestreo. La barra azul indica el periodo de lluvias.

Los valores de  $^{222}\text{Rn}$  registrados con los detectores de trazas en los cinco emplazamientos mencionados anteriormente, presentaron una distribución log-normal, característica en muchas variables geoquímicas, presentando una gran variabilidad y asimetría hacia la derecha. A partir del estudio de la curva acumulada se puede concluir que 23 medidas (el 38% de los datos recogidos) se encontraron por debajo del nivel de referencia ( $300 \text{ Bq/m}^3$ ) y el 60 % por debajo de los  $600 \text{ Bq/m}^3$  (2 veces el límite legal). Los valores extremos ( $> 1.200 \text{ Bq/m}^3$ ) fueron poco recurrentes, y siempre se alcanzaron en la localización L1

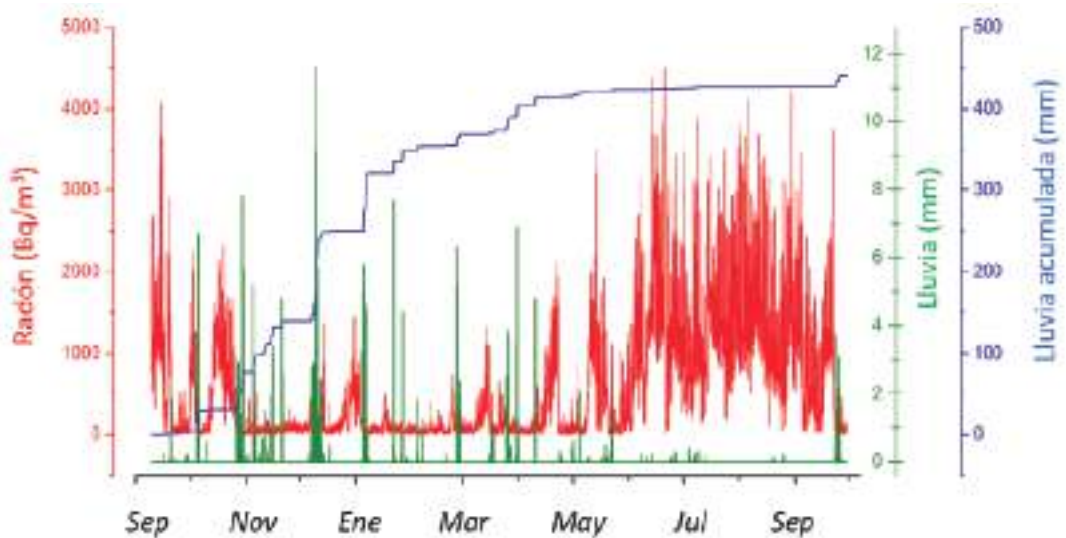


Figura 6. Serie temporal de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en el interior de La cueva del Viento. Series temporales de lluvia y lluvia acumulada registradas en las proximidades de La cueva del Viento. Todas las series temporales se registraron con una frecuencia horaria.

(entrada). Sin embargo, cabe destacar la gran cantidad de valores en torno a  $1.000 \text{ Bq/m}^3$  obtenidos durante los meses de verano (periodo seco), que representan un 25% del total de los datos. La figura 5 muestra la evolución temporal durante un año (del 01/10/2020 al 30/09/2021) de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en las cinco localizaciones estudiadas. A partir de estos datos se observa que la localización L1 (entrada) suele presentar valores más elevados, pudiendo ser atribuible dicho incremento al aporte continuo de gas del tramo no visitable adyacente, con una menor tasa de ventilación natural. Adicionalmente se observa una tendencia temporal, común en todos los detectores, con valores mínimos durante los meses de diciembre a junio. El estudio de correlación lineal con diferentes variables ambientales y meteorológicas muestran una buena correlación lineal entre la concentración de gas radón y (1) la temperatura externa (+0.79), atribuible al conocido efecto chimenea; y (2) las lluvias registradas en el mes anterior (-0.78). Este último efecto se ha comprobado in situ mediante la observación del suelo de la cueva, que ha estado saturado durante aproximadamente 5-6 meses durante el periodo de lluvias, disminuyendo la tasa de exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  hacia el interior del tubo volcánico. Cabe indicar que este último comportamiento es debido al carácter superficial del tubo (2-5 m de profundidad con respecto a la superficie). En cavidades más profundas suele encontrarse el comportamiento inverso, debido al aislamiento de la parte superior del tubo o cueva.

La serie temporal horaria de radón, registrada en la localización L3, muestra dos comportamientos bien diferenciados (figura 6). El primero de ellos se corresponde a valores bajos de concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  (periodo de lluvias, descrito anteriormente). Por otro lado, se detecta un segundo comportamiento con valores más altos y una mayor varianza, que muestran una acumulación considerable de  $^{222}\text{Rn}$  en el interior de la

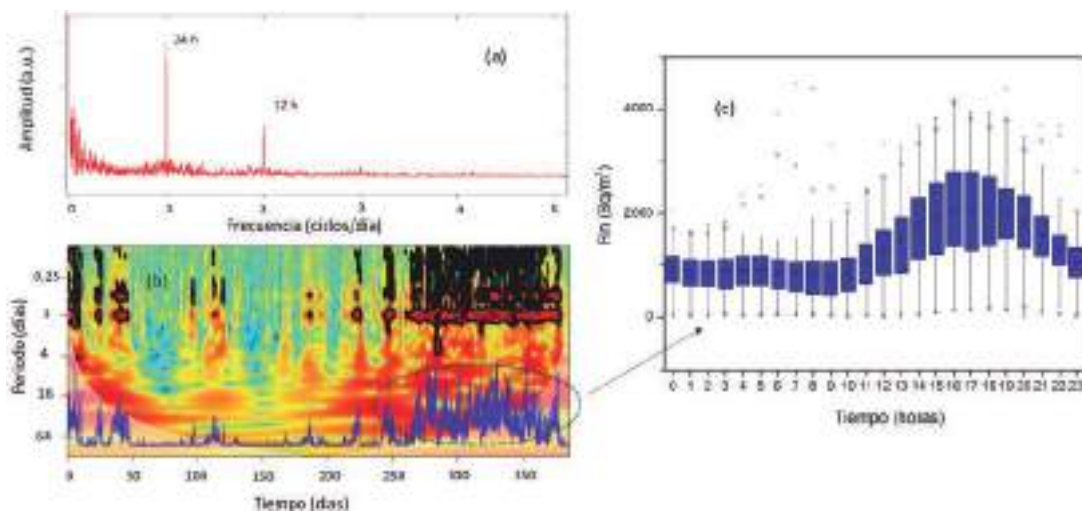


Figura 7. (a) Espectro de potencia de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  interior en La cueva del Viento. (b) Espectro de potencia de Wavelet de la serie temporal de radón (línea azul). El nivel de significancia del 5% del ruido rojo se muestra como un contorno negro grueso. El tono más claro es la región influenciada por los efectos de borde. (c) Evolución horaria de los niveles de  $^{222}\text{Rn}$  durante la temporada seca.

cueva durante la estación seca. Este comportamiento indica una dinámica compleja que modula la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en el interior de la cueva (en el corto y largo periodo), y correlacionadas principalmente con las variables ambientales de la cueva (temperatura (+) y humedad (-)). En la figura 6 se observa la dinámica de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en el interior del tubo, mostrando fluctuaciones (bajadas rápidas) en la concentración después de un período intenso de lluvia, necesitando varias semanas después de dicho episodio para volver a elevarse. Un estudio más detallado, empleando la transformada de Fourier (figura 7a) de la serie temporal  $^{222}\text{Rn}$ , muestra claramente la aparición de ciclos diurnos (24 h) y semidiurnos (12 h). Por otro lado, el análisis de Wavelet (figura 7b) revela que dichos ciclos sólo aparecen en la estación seca. Es en estas condiciones, en las que las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  son elevadas, cuando los efectos cíclicos de la ventilación natural en el interior del tubo se hacen más evidentes. Adicionalmente, dichas fluctuaciones y los fenómenos de intermitencia (ausencia de componente cíclica) aparecen también en las otras series temporales estudiadas (parámetros atmosféricos y ambientales). El estudio de las funciones de correlación cruzada, coherencia espectral y coherencia wavelet corroboró la presencia de ciclos comunes con otras variables exógenas (temperatura, humedad, etc.). Se observa también (figura 7c) como los niveles de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  empiezan a elevarse a mediodía y alcanzan un máximo a media tarde (3-4 horas después de alcanzarse el máximo de temperatura diaria). Este proceso cíclico se puede entender fácilmente debido a la dinámica de flujo en el interior del túnel, y a la aparición de gradientes de temperatura entre el exterior y el interior del tubo (efecto chimenea). Dicho fenómeno, junto con la configuración natural de la cueva con dos entradas situadas a diferentes alturas favorece un régimen de circulación de aire bien característico. Dicho patrón está caracterizado, como se observa en la figura

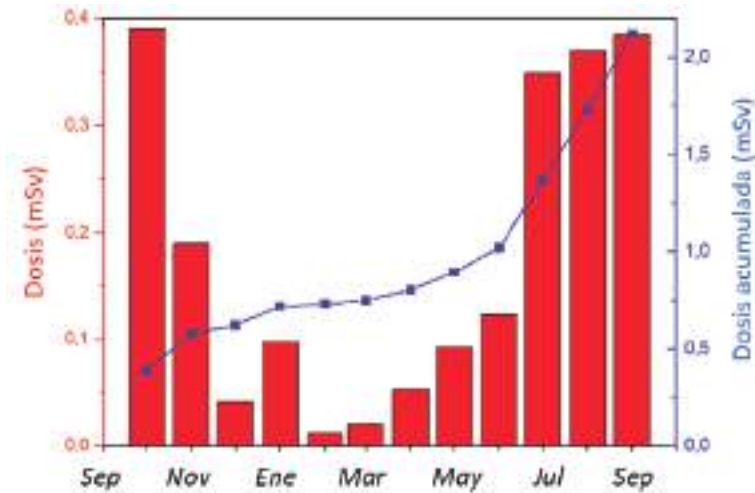


Figura 8. Dosis efectiva mensual y dosis acumulada calculadas por el radón en el tramo visitable de La cueva del Viento.

7c, con una peor circulación de aire externo por el interior de túnel y un incremento en la concentración de gas radón a partir de las primeras horas de la tarde. Finalmente, la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  comienza a descender por la noche debido a un incremento de la ventilación natural como consecuencia de la bajada de la temperatura exterior, que se mantiene hasta las primeras horas de la mañana. Las fluctuaciones diarias durante la estación seca se analizaron convenientemente mediante el empleo de técnicas de análisis de series de tiempo (metodología de Box-Jenkins). La serie de tiempo experimental de  $^{222}\text{Rn}$  se ajustó utilizando un modelo autorregresivo integrado de media móvil con componente estacional (24h): SARIMA (2,0,1) (2,1,0) 24, y su valor, en una ventana de tiempo semanal fue pronosticado con éxito.

## Estudio dosimétrico y adaptación a la normativa vigente

Los métodos de remediación convencionales (ventilación forzada, barreras de impermeabilización, etc.) para reducir los niveles  $^{222}\text{Rn}$  no se pueden implementar en cuevas turísticas. Dichos métodos pueden causar efectos contraproducentes en el microclima, biota y en las propias estructuras geológicas. Debido a estos efectos, la forma más conveniente de proteger a los guías turísticos, espeleólogos y científicos frente a la exposición al gas  $^{222}\text{Rn}$  es calcular la dosis recibida en condiciones de trabajo normales y minimizar, si fuera necesario, el tiempo que pasan en el lugar subterráneo.

Nuestros resultados, mostrados en la figura 8, confirman que las dosis más altas se recibieron durante la estación seca (ca. 0,4 mSv/mes) y el valor anual fue de ca. 2 mSv. Aproximadamente el 50% de la dosis efectiva anual se recibió en la localización L1, cerca de la entrada de la cueva (ver figura 2). Este valor, 2 mSv/año, es comparable a la dosis efectiva anual promedio mundial (2,4 mSv/año) calculada para la población mundial, expuesta a fuentes de radiación ionizante natural, y dos veces los valores permitidos en

lugares de trabajo (1 mSv/año). Según la legislación española, la cueva del Viento debe ser, por tanto, catalogada como "Zona Vigilada" por el riesgo de que los trabajadores estén expuestos a una dosis efectiva en el rango de 1-6 mSv/año. En base a esta categoría, es recomendable medir periódicamente la exposición a la radiación ionizante en este lugar.

Finalmente, y acorde al principio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) la dosis efectiva anual para los guías puede reducirse a 1,6 mSv/año si los trabajadores disfrutan sus vacaciones durante la estación seca. En el caso de los visitantes (dedicando 1 h por visita) la dosis recibida ( $\sim 4 \mu\text{Sv}$ ) puede considerarse despreciable. Sin embargo, este valor presenta una gran variabilidad, pudiendo oscilar entre  $0,25 \mu\text{Sv}$  (para  $50 \text{ Bq/m}^3$ ) y  $25 \mu\text{Sv}$  (para  $5.000 \text{ Bq/m}^3$ ) dependiendo de la fecha (estación seca o húmeda) y hora (ciclo diurno) de la visita.

## Conclusiones

1. Los niveles de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en la cueva del Viento muestran variaciones estacionales importantes, pudiendo alcanzar valores muy superiores a los recomendados por la normativa vigente ( $300 \text{ Bq/m}^3$ ) en algunos meses.

2. El valor calculado de dosis efectiva anual para los guías turísticos está en torno a  $2 \text{ mSv/año}$ , por debajo del límite legal anual para trabajadores ( $20 \text{ mSv/año}$ ) y por encima del límite ( $1 \text{ mSv/año}$ ) establecido para el público general. Dichos resultados indican que la exposición del radón para los visitantes es todavía más reducida (despreciable), en una ratio de aproximadamente de 1/500.

3. El estudio en modo continuo de radón y diferentes variables medioambientales, ha permitido conocer la dinámica y las fluctuaciones naturales que ocurren en el interior de la cueva del Viento.

4. La dinámica a corto periodo muestra ciclos diurnos y semidiurnos correlacionados con las variables ambientales y atmosféricas y la ventilación natural de la cueva.

5. Las fluctuaciones de radón a largo periodo se explican principalmente debido al régimen de lluvia en la zona (estaciones húmedas y secas). Siendo la humedad del suelo y la oclusión de los poros del terreno (originada por las lluvias) una de las principales fuentes de variación de este radionúclido.

6. El gradiente térmico diario y estacional da lugar a un gradiente de presión (efecto chimenea) que incrementa la exhalación de  $^{222}\text{Rn}$ . Dicho efecto da lugar a una correlación positiva entre la temperatura y los niveles de  $^{222}\text{Rn}$  en el interior del tubo volcánico

7. Finalmente, se recomienda realizar dosimetría de área en los puntos de interés del tubo volcánico y su evolución al menos durante dos años, con el fin de evaluar los niveles de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  y sus fluctuaciones de manera más representativa.

## Referencias

- Alberigi, S., Pecequilo B.R.C., Lobo, H.A.S., Campos, M.P. (2011). Assessment of effective doses from radon levels for tour guides at several galleries of Santana Cave, Southern Brazil, with CR-39 detectors: preliminary results. *Radiation Protection Dosimetry*, 145, 252-255. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr054>.
- Álvarez-Gallego, M., García-Antón, E., Fernández-Cortés, A., Cuezva, S., Sánchez-Moral, S. (2015). High radon levels in subterranean environments: monitoring and technical criteria to ensure human safety (case of Castañar cave, Spain). *Journal of Environmental Radioactivity*, 145, 19-29. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.03.024>.
- Carracedo, J.C., Troll, V. (eds) (2013). *Teide Volcano: Geology and Eruptions of a Highly Differentiated Oceanic Stratovolcano*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25893-0>.
- Cigna, A.A. (2005). Radon in Caves. *International Journal of Speleology*. 34(1-2), 1-18. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.34.1.1>.
- Chris, L. Waring, Stuart I. Hankin, Stephen, B., Solomon, Stephen Long, Andrew Yule, Robert Blackley, Sylvester Werczynski, and Andrew C. Baker (2021). Cave radon exposure, dose, dynamics and mitigation. *Journal of Cave and Karst Studies*, 83 (1): 1-19. DOI:10.4311/2019ES0124
- Directive Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom, OJ L 13, 17.1.2014, p. 1–73. <http://data.europa.eu/eli/dir/2013/59/oj>.
- Field, M. (2007). Risks to cavers and cave workers from exposures to low-level ionizing radiation from <sup>222</sup>Rn decay in caves. *Journal of cave and karst studies the National Speleological Society Bulletin*, 69, 207-228.
- Gouhier, T.C., Grinsted, A., Simko, V. (2021). *R package biwavelet: Conduct Univariate and Bivariate Wavelet Analyses (Version 0.20.21)*. <https://github.com/tgouhier/biwavelet>.
- Hakl, J., Hunyadi, I., Csige, I., Géczy, G., Lénárt, L., Várhegyi, A. (1997). Radon transport phenomena studied in Karst caves-international experiences on radon levels and exposures. *Radiation Measurements*, 28 (1-6), p. 675-684. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(97\)00163-7](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(97)00163-7)
- Hyndman, R.J., Athanasopoulos, G., Bergmeir, C., Caceres, G., Chhay, L., O'Hara-Wild, M., Petropoulos, F., Razbash, S., Wang, E. and Yasmeen, F. (2020). *Forecasting Functions for Time Series and Linear Models [R package forecast version 8.13]*. <https://pkg.robjhyndman.com/forecast/>.
- Ministerio de Sanidad (2021). *Mortalidad atribuible a la exposición a radón residencial en España, Informes, Estudios e Investigación*. 60 pp. [https://www.sanidad.gob.es/gl/ciudadanos/saludAmbLaboral/docs/04\\_Mortalidad\\_radon.pdf](https://www.sanidad.gob.es/gl/ciudadanos/saludAmbLaboral/docs/04_Mortalidad_radon.pdf)
- Oromí, P. (2018). *Researches in Lava Tubes*. In O.T. Moldovan, L'. Kovác and S. Halse (eds.) *Cave Ecology*, Springer International Publishing, Cham, 369-381.
- Oromí, P., Socorro, S. (2021). Biodiversity in the cueva del Viento Lava Tube System (Tenerife, Canary Islands). *Diversity*: 13, 226. <https://doi.org/10.3390/d13060226>.
- Pinza-Molina, C., Alcaide, J.M., Rodrigues-Bethencourt, R., Hernandez-Armas, J. (1999). Radon Exposures in the Caves of Tenerife (Canary Islands). *Radiation Protection Dosimetry*, 82, 219-224. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a032628>.
- Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. BOE núm. 311, <https://www.boe.es/eli/es/rd/2019/12/20/732>
- Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. BOE núm.178, <https://www.boe.es/eli/es/rd/2001/07/06/783/con>
- Recomendación de la Comisión, de 21 de febrero de 1990, 90/143/Euratom, relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios.



## Impacto de un evento de inundación en la comunidad bacteriana de un ecosistema subterráneo somero (Cueva del Pindal, Asturias)

Tamara MARTÍN POZAS <sup>(1)</sup>, Soledad CUEZVA ROBLEÑO <sup>(2)</sup>, Ángel FERNÁNDEZ CORTÉS <sup>(3)</sup>,  
María GONZÁLEZ-PUMARIEGA SOLÍS <sup>(4)</sup>, Elsa DUARTE MATÍAS <sup>(5)</sup>,  
Marco De la RASILLA VIVES <sup>(5)</sup>, Juan Carlos CAÑAVERAS JIMÉNEZ <sup>(6)</sup>,  
David BENAVENTE <sup>(6)</sup>, José Luis GOY GOY <sup>(7)</sup>, Javier ELEZ VILLAR <sup>(7)</sup>, Cesáreo SAIZ  
JIMÉNEZ <sup>(8)</sup>, Caridad ZAZO CARDEÑA <sup>(1)</sup>, Sergio SÁNCHEZ MORAL <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Museo Nacional de Ciencias Naturales, MNCN-CSIC. Madrid.

tmpozas@mncn.csic.es, carizazo@mncn.csic.es, ssmilk@mncn.csic.es

<sup>(2)</sup> Departamento de Geología, Geografía y CC. Ambientales, Universidad de Alcalá de Henares.  
soledad.cuezva@uah.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Biología y Geología, Universidad de Almería. acortes@ual.es

<sup>(4)</sup> Consejería de Cultura del Principado de Asturias. maria.glez-pumariegasolis@asturias.org

<sup>(5)</sup> Departamento de Historia. Universidad de Oviedo. mrasilla@uniovi.es

<sup>(6)</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante.  
jc.canaveras@ua.es, david.benavente@ua.es

<sup>(7)</sup> Departamento de Geología, Universidad de Salamanca. joselgoy@usal.es

<sup>(8)</sup> Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología, IRNAS-CSIC. Sevilla. saiz@irnase.csic.es

---

### Resumen

La Cueva del Pindal (Ribadedeva, Asturias) y su arte rupestre paleolítico forman parte de la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO desde 2008. Actualmente está abierta al público con visitas limitadas y en ella se desarrolla un proyecto de investigación sobre actividad microbiana en ecosistemas naturales subterráneos y su aplicación al diseño de estrategias de conservación. El sistema kárstico del Pindal se desarrolla en un macizo calcáreo modelado en forma de terrazas marinas (rasas), situadas entre 30 y 68 metros s.n.m que constituyen el área de captación hídrica preferente y en las que se observan numerosas estructuras exokársticas tipo dolina y poljé. Sobre una de las dolinas, situada casi en la vertical de la cavidad, se instaló una explotación ganadera en 1995. El 23 de octubre de 2019 tras un episodio extremo de precipitaciones (209 l/m<sup>2</sup>) se produjo una fuerte acumulación de agua en la dolina y una entrada masiva de agua y sedimentos en la cueva. El 31 de octubre se realizó un muestreo específico para conocer los cambios provocados en el ecosistema subterráneo. La inundación provocó un fuerte incremento de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio disponibles en los sedimentos y modificaciones muy significativas en la composición de las comunidades microbianas presentes en los sedimentos: aparición de nuevos filos bacterianos (*Firmicutes* y *Bacteroidetes*), incluyendo grupos de bacterias patógenas oportunistas (*Corynebacterium*, *Thauera*, *Clostridiales*) y la casi total desaparición de otros (*Rokubacteria* y *Nitrospirae*). Los resultados confirman que el agua y sedimentos arrastrados al interior de la cueva en la inundación fueron acompañados de residuos procedentes de la explotación ganadera, demostrando el alto grado de vulnerabilidad de este tipo de ambientes. Tras el estudio e

informe correspondiente, la actividad ganadera cesó en 2021 y continúa el estudio de las poblaciones microbianas para conocer su evolución a medio-largo plazo.

**Palabras clave:** Cueva del Pindal, arte rupestre, conservación, microbiología, inundación.

## ***Impact of a flood event on the bacterial community of a shallow subterranean ecosystem (Pindal Cave, Asturias)***

### **Abstract**

*Pindal Cave (Ribadedeva, Asturias) and its paleolithic cave art have been part of the UNESCO World Heritage List since 2008. The cave is currently open to the public with limited visits and a research project on the microbial activity in underground ecosystems is being carried out. The Pindal karstic system develops in a calcareous massif modeled in the form of wave cut platform (rasas), located between 30 and 68 meters a.s.l. These rasas constitute the preferred water catchment area in which numerous sinkhole and polje-type exokarstic structures can be observed. On one of the sinkholes, located almost vertically in the cavity, a livestock farm was installed in 1995. On October 23, 2019, after an extreme episode of rainfall (209 l/m<sup>2</sup>), there was a strong accumulation of water in the sinkhole and a massive entry of water and sediment into the cave. On October 31, a specific sampling was carried out to study the changes caused in the underground ecosystem. The flood caused a strong increase in organic matter, nitrogen, available phosphorus and potassium in the sediments and very significant changes in the composition of the microbial communities present in the sediments: appearance of new bacterial phyla (Firmicutes and Bacteroidetes), including groups of opportunistic bacterial pathogens (Corynebacterium, Thauera, Clostridiales) and the almost complete disappearance of others (Rokubacteria and Nitrospirae). The results confirm that water and sediments dragged into the cave in the flood were accompanied by manure from the livestock exploitation, demonstrating the high degree of vulnerability of this type of environment. After the study and corresponding report, the livestock activity ceased in 2021 and the study of the microbial populations continues to know their evolution in the medium-long term.*

**Keywords:** Pindal Cave, rock art, conservation, microbiology, flooding

## **Introducción**

La Cueva del Pindal (Asturias) fue el primer descubrimiento de arte parietal paleolítico en Asturias en 1908. Desde 2008 forma parte de la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO, inscrita como Cueva de Altamira y Arte Rupestre Paleolítico del Norte de

España. El Área de Protección fue delimitada en 2009 por el Principado de Asturias. El conjunto de arte en El Pindal incluye numerosas figuras pintadas y grabados, con un panel principal, situado a unos 250 m de la entrada, en el que destacan la figura prominente de una cierva, un pequeño mamut, trazos breves y signos complejos y un grupo magdalenense de pinturas rojas -bisontes, caballo, claviformes pirenaicos y series de puntos- rodeado de bisontes y caballos grabados (González-Pumariega, 2011). En la actualidad la cueva del Pindal está abierta al público con visitas guiadas limitadas, 5 días a la semana durante todo el año.

En el año 2001 se realizó un estudio puntual del estado de conservación de varias cuevas de Asturias (Sánchez-Moral *et al.*, 2002) entre las que se encontraba la Cueva del Pindal. En dicho estudio, se llevó a cabo un mapeo de los niveles de colonización microbiológica y del estado de conservación de la roca soporte. Las conclusiones de dicho estudio fueron que el estado de conservación del arte rupestre era relativamente bueno y se veía afectado por procesos naturales de lavado por escorrentía parietal. La amplia entrada con luz natural, favorecía el desarrollo de briofitos y colonias microbianas en los primeros 50 metros, pero hacia el interior, la roca soporte, los suelos acondicionados para las visitas y los sedimentos internos naturales se mantenían en un buen estado de conservación. Posteriormente, desde 2017 la cueva se estudia en un proyecto de investigación sobre actividad microbiana en ecosistemas naturales subterráneos y su aplicación al diseño de estrategias de conservación (proyecto SUBSYST). Este estudio incluye monitorización medioambiental y seguimiento isotópico de gases, junto a un detallado estudio para caracterizar las poblaciones microbianas presentes en diferentes sustratos de la cavidad y los procesos de interacción microbio-mineral en la interfaz aire-roca/espeleotema/sedimento.

En las primeras observaciones realizadas en el marco de ese proyecto se pudo advertir, en comparación con 2001, una extraordinaria proliferación de colonias microbianas y depósitos tipo *moonmilk* sobre los sedimentos, espeleotemas y roca soporte de la zona interna de la cueva. Tras dos años de estudio, el 23 de octubre de 2019 se produjo un evento de inundación por un episodio de precipitaciones registrado entre los días 19 y 23 de octubre en el que se acumuló un total de 209 l/m<sup>2</sup> con un máximo de 113,6 litros en 24 horas (18h del 22 a 18h del 23 de octubre). Desde el Museo Arqueológico de Asturias se solicitó la prestación de un servicio consistente en realización urgente de análisis químicos y microbiológicos de los sedimentos tras la inundación con el objetivo de conocer las consecuencias del evento y los daños producidos. La llegada masiva de agua y sedimentos arrastrados desde el exterior modificó de forma sustancial las condiciones ambientales en toda la zona interna afectada, surgiendo la necesidad y oportunidad de estudiar específicamente su impacto en las comunidades microbianas del ecosistema subterráneo.

En este trabajo se presentan los resultados de los análisis geoquímicos y microbiológicos realizados en las muestras de sedimentos recogidas en la Cueva del Pindal, en la campaña realizada solo unos días después de la inundación (31 de octubre de 2019) y su comparación con muestras tomadas previamente. Asimismo, se describen las principales características

geomorfológicas y de captación hídrica del sistema kárstico como principales factores condicionantes del origen de la inundación.

## Material y métodos

### *Aspectos climáticos y geomorfológicos*

El clima de la región tiene estaciones bien diferenciadas, con una temperatura media del aire de unos 12 °C y un nivel anual de precipitaciones unos 1150 mm. La cueva tiene una longitud de 590 m (314 m abiertos al turismo), con un patrón de desarrollo E-O y 110° N (ONO-ESE) y una única entrada a 24 m s.n.m. Para la obtención de un mapa geomorfológico del entorno de la cueva se combinó fotointerpretación clásica de pares estéreo de vuelos de 1956 y mapeo en entorno basado en SIG. El modelo de elevación digital (MED, píxel de 1 m) se obtuvo interpolando las primeras llegadas terrestres de LIDAR en formato ráster (datos originales de LIDAR del IGN) y los mapas se proyectan en el sistema geográfico ETRS89 h30. Del mismo MED se obtuvo la red de drenaje en un Sistema de Información Geográfica (Tarboton, 1997).

### *Estrategia de muestreo y metodología analítica*

El 31 de octubre se realizó una campaña de urgencia en la Cueva del Pindal en la que se procedió al muestreo de sedimentos y aire de la cueva. Para la localización de las muestras se empleó el balizado de iluminación de la cueva, desde la entrada (Baliza 1) hasta el final de la zona visitable (Baliza 18). En ese momento la cueva ya había desaguado y los efectos de la inundación, una semana después del evento, eran aún evidentes. La acumulación de agua afectó a gran parte de la cavidad (desde Baliza 6 a Baliza 14) y conllevó la llegada de nuevos materiales arenosos al cauce interior y la decantación de materiales limosos que se situaron sobre los ya existentes. Las muestras de sedimentos se tomaron en tres puntos (figura 1 y tabla 1) para su posterior análisis y comparación con materiales muestreados en marzo de 2019, antes de que se produjera la inundación.

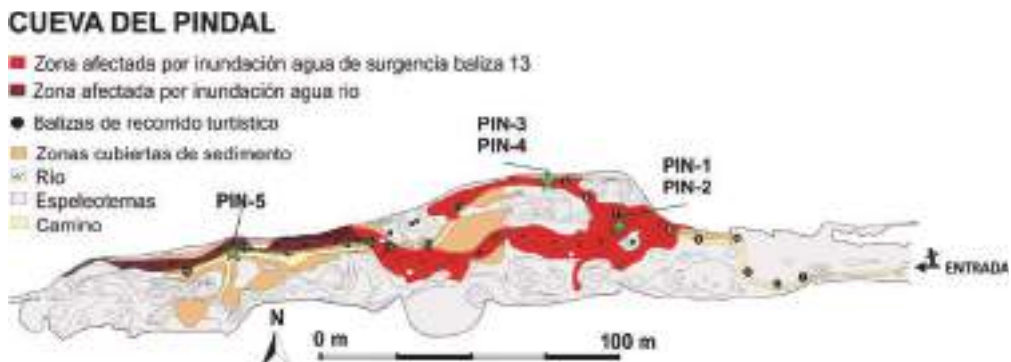


Figura 1. Localización de los puntos de muestreo de sedimentos del 31 de octubre de 2019.

Muestra	Zona	Descripción
PIN-1	Baliza 7	Sedimentos de desborde del cauce por inundación reciente
PIN-2	Baliza 7	Sedimentos arenosos del cauce previos a inundación
PIN-3	Baliza 9	Sedimentos de decantación producto de la inundación
PIN-4	Baliza 9	Sedimentos previos a la inundación, situados bajo PIN-3
PIN-5	Baliza 17	Sedimentos de desborde del cauce por inundación reciente

Tabla 1. Listado y descripción de las muestras de sedimentos del 31 de octubre de 2019.

El análisis mineralógico se realizó mediante Difracción de Rayos X (DRX) en un difractor Philips PW-1710 del MNCN-CSIC.

El análisis biogeoquímico se llevó a cabo en el Servicio de Análisis del IRNAS-CSIC mediante métodos detallados por Martin-Pozas *et al.* (2022).

Se tomaron cuatro muestras de sedimentos para un análisis microbiológico en los mismos puntos donde se había muestreado previamente en noviembre de 2017. El muestreo de



Figura 2. Localización de los puntos de muestreo microbiológico de octubre de 2019 (después de la inundación) y noviembre de 2017 (antes de la inundación).

2017 se había realizado en dos puntos: uno totalmente colonizado por *moonmilk* y otro sin colonizaciones microbianas visibles, según se muestra en la figura 2.

La primera zona de muestreo, denominada *Moonmilk Area* se correspondía con una zona de sedimento totalmente cubierta con *moonmilk* de calcita, un depósito mineral secundario originado por el metabolismo de actinobacterias (Martin-Pozas *et al.*, 2022). La segunda zona de muestreo o *Soil Area* se correspondía con una zona de sedimento desnuda, sin presencia de *moonmilk*. En ambas zonas se tomaron muestras a dos profundidades (0-1.5 y 1.5-3 cm), usando una espátula de acero estéril. Inmediatamente después, las muestras se suspendieron en DNA / RNA Shield™ en tubos de polipropileno estériles. Durante el transporte, todas las muestras se almacenaron a 4 °C, en oscuridad y se congelaron (-80 °C) para la posterior extracción de ADN.

En el Laboratorio de Monitorización Geoambiental del MNCN-CSIC, se extrajo el ADN de las diferentes muestras utilizando el kit DNeasy Power Soil de Qiagen. Para el análisis de utilizaron técnicas de secuenciación masiva (NGS) por amplificación de las regiones V3 y V4 del gen 16S rARN empleando los primers específicos para bacterias, Bakt 341F y Bakt 805R (Herlemann *et al.*, 2011). La preparación de las librerías de amplicones para la secuenciación en la plataforma Illumina MiSeq PE300 y el análisis bioinformático mediante el software (QIIME II) se realizaron siguiendo los métodos detallados en Martin-Pozas *et al.* (2020).

## Resultados

### *Características geomorfológicas e hidrológicas del sistema kárstico*

El sistema kárstico del Pindal se desarrolla en un macizo calcáreo (calizas de Barcaliente, Carbonífero) modelado en forma de terraza marina (rasa) por procesos morfogenéticos litorales (Jiménez-Sánchez *et al.*, 2008). Este nivel de terraza marina se sitúa a una cota media de 30-68 metros sobre el nivel del mar actual y constituye el área de captación preferente para las aguas de escorrentía procedentes de otro nivel de rasa superior (140-170 m) desarrollado sobre materiales cuarcíticos de muy baja permeabilidad (Cuarcita de Barrios, Ordovícico). La cueva es la principal forma endokárstica del sistema y como puede verse en el mapa geomorfológico (figura 3a), en las superficies de las rasas de 30-68 m se observan numerosas estructuras exokársticas tipo dolina y poljé, relacionadas directamente con la formación de la propia cueva.

Sobre una de las dolinas, situada casi en la vertical de la cavidad, se instaló una explotación ganadera en 1995 que ha seguido funcionando hasta 2021 (figura 3c). Uno de los principales cauces que drenan la Rasa de Pimiango desemboca de forma natural en esa dolina (figura 3a), de forma que el área de descarga de esa cuenca de drenaje se encuentra justo en la finca ganadera y dentro de los límites hidrológicos del *impluvium* de la cueva.

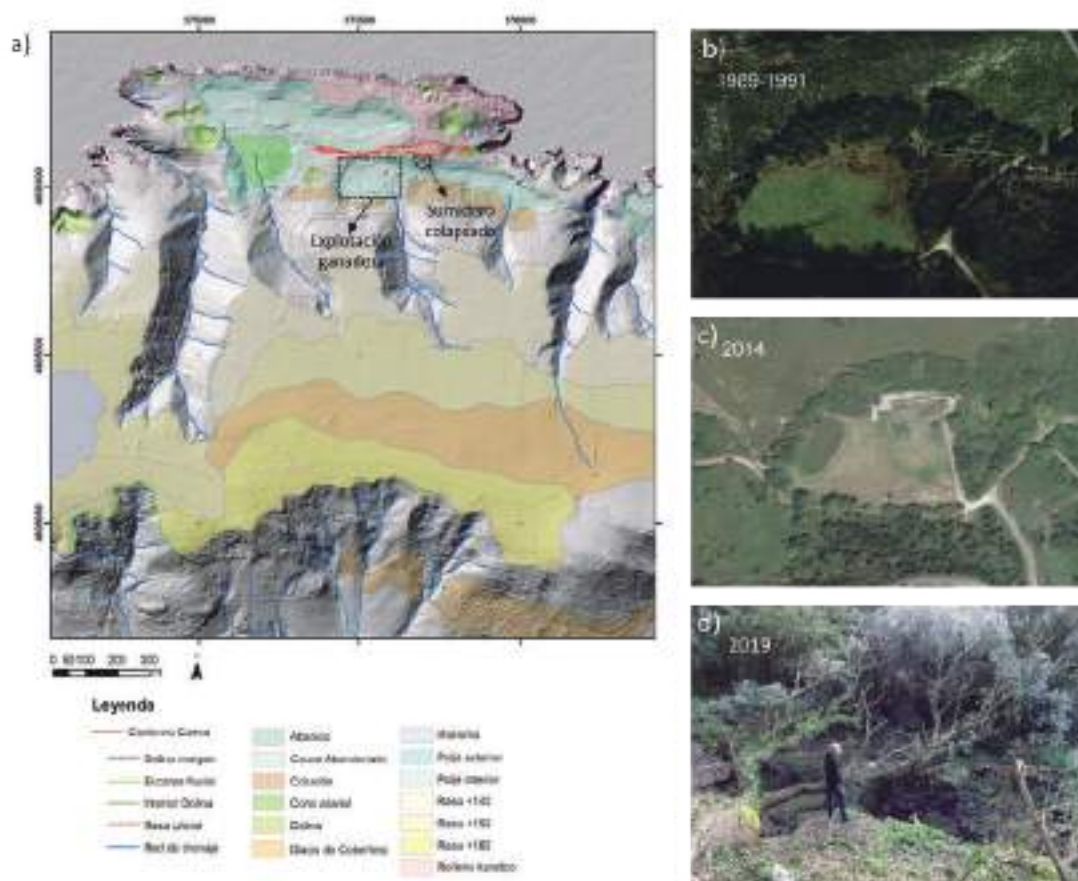


Figura 3. a) Esquema geomorfológico de la localización de la Cueva del Pindal. b-c) Fotografías aéreas de la zona de la dolina sobre la que actualmente se sitúa la explotación ganadera. d) Fotografía en superficie del colapso del sumidero natural situado al noreste de la dolina.

Los terrenos kársticos son excepcionalmente susceptibles a inundaciones debido a una combinación de características de bajo almacenamiento y alta difusividad de estos acuíferos (Parise *et al.*, 2015). En el caso de la Cueva del Pindal el agua de escorrentía circula directamente hacia la rasa del Pindal, en cauces de escaso recorrido y más o menos torrenciales en función de la intensidad de las precipitaciones. Una vez alcanza ese nivel, se acumula preferentemente en las diferentes depresiones kársticas (dolinas) y allí, se une a la caída directamente sobre la zona de *impluvium* infiltrándose en el macizo carbonatado (figura 3).

Esa infiltración se ve favorecida por el buzamiento subvertical y el alto grado de fracturación de la caliza de Barcaliente, pero de forma general, la percolación se produce de forma progresiva por el efecto filtrante que ejercen los materiales arcillosos que cubren el fondo

de las dolinas. Las intensas precipitaciones caídas durante los días previos y el propio día 23, favorecieron una importante acumulación de agua en la dolina que finalmente provocó el colapso de su sumidero natural (figura 3d). Este colapso puede aún verse en la zona externa y provocó la entrada súbita de un gran volumen de agua afectada por su mezcla con la balsa de purines y la llegada de lodos-sedimentos procedentes en gran parte de la explotación ganadera.

### Composición mineral

Los sedimentos acumulados tras la reciente inundación estaban compuestos mayoritariamente por cuarzo (SiO<sub>2</sub>) con proporciones entre el 95 y el 99% y proporciones menores de calcita y filosilicatos, de forma similar a la de los materiales ya existentes. Esta composición indica que la rasa de Pimiango, desarrollada sobre cuarcitas, es la principal y casi exclusiva área fuente de sedimentos detríticos para la superficie kárstica desarrollada en la franja litoral.

### Parámetros biogeoquímicos

Fecha	Muestra	Zona	pH	CaCO <sub>3</sub> (%)	Mat.Org (%)	N (%)	P- (mg/kg)	K-disp (mg/kg)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/kg)	Cl (mg/kg)	TOC (%)
31-oct-19	Pin 1	Bal 7	7.23	4.40	<b>6.42</b>	<b>0.26</b>	14.1	<b>153</b>	0.70	3.10	24.5	3.56
	Pin 2	Bal 7	7.83	1.10	0.34	0.02	3.0	20	0.50	0.80	11.5	0.19
	Pin 3	Bal 9	7.54	3.20	<b>6.44</b>	<b>0.30</b>	<b>22.5</b>	137	<b>5.10</b>	5.20	131.5	3.53
	Pin 4	Bal 9	7.56	3.50	<b>8.12</b>	<b>0.29</b>	<b>18.1</b>	112	<b>7.20</b>	3.60	54.5	4.34
	Pin 5	Bal 17	7.71	3.50	2.14	0.09	6.3	83	2.90	1.80	17.0	1.06
12-mar-19	9A1	Bal 9	7.34	2.30	<b>9.25</b>	0.33	<b>18.2</b>	102	<b>42.80</b>	7.20	165.5	4.73
	9A2	Bal 9	-	1.40	<b>9.94</b>	0.35	<b>20.2</b>	130	<b>46.80</b>	6.80	-	5.80
	9B1	Bal 9	7.62	1.50	<b>9.11</b>	0.33	<b>12.1</b>	100	<b>41.70</b>	7.30	148.5	4.46
	9B2	Bal 9	-	1.60	<b>10.30</b>	0.38	<b>12.7</b>	99	<b>55.20</b>	7.70	-	6.23
	9C1	Bal 9	7.64	2.40	<b>8.37</b>	0.29	<b>12.9</b>	100	<b>37.00</b>	6.70	156.0	4.32
	9C2	Bal 9	7.61	2.10	<b>10.20</b>	0.39	8.2	99	-	-	209.5	6.80
	16B1	Bal 16	7.54	0.20	4.85	0.18	16	75	4.20	6.60	39.0	2.31
	16B2	Bal 16	7.54	0.14	2.28	0.08	15	51	1.90	4.30	22.5	0.75
	16C1	Bal 16	7.50	0.17	4.97	0.18	23	91	3.10	6.00	30.5	2.57
	16C2	Bal 16	7.52	0.15	2.58	0.09	16	56	3.50	3.60	20.5	0.80

Tabla 2. Resultados de los análisis de pH, carbonato cálcico, cloruros, materia orgánica y macronutrientes (N, P, K) de las muestras de sedimentos. Datos destacados en **negrita**.



Fecha	MUESTRA	Zona	Ba	Co	Cu	Fe	Mn	Na	Ni	Pb	S	Sr	Zn
31-oct-19	Pin 1	Bal 7	<b>75</b>	<b>5.9</b>	<b>12.4</b>	<b>14594</b>	<b>667</b>	242	<b>15</b>	24	326	97	<b>55</b>
	Pin 2	Bal 7	11	1.1	1.0	1818	81	28	3	5	48	33	7
	Pin 3	Bal 9	<b>88</b>	<b>7.8</b>	<b>14.6</b>	<b>16394</b>	<b>680</b>	406	<b>17</b>	26	353	103	<b>65</b>
	Pin 4	Bal 9	<b>81</b>	<b>4.4</b>	<b>15.1</b>	<b>13601</b>	<b>279</b>	398	<b>14</b>	36	360	149	<b>70</b>
	Pin 5	Bal 17	50	4.0	6.1	8697	392	165	10	15	97	78	28
12-mar-19	9A1	Bal 9	63	3.1	11.6	12950	200	391	10	34	454	118	51
	9A2	Bal 9	77	4.1	13.9	13705	201	464	11	35	474	135	38
	9B1	Bal 9	65	3.7	12.3	14107	237	391	10	37	425	113	42
	9B2	Bal 9	63	3.6	12.3	12919	166	442	11	29	546	121	26
	9C1	Bal 9	58	3.8	12.2	13644	247	354	10	36	375	99	42
	9C2	Bal 9	51	2.9	11.3	12389	128	394	9	26	519	104	20
	16B1	Bal 16	38	3.2	9.0	8758	250	183	7	24	268	95	28
	16B2	Bal 16	30	1.5	5.2	5133	113	136	4	13	114	65	14
	16C1	Bal 16	56	5.0	10.4	10735	344	228	10	26	224	117	29
	16C2	Bal 16	35	2.1	6.6	6196	159	145	5	14	195	70	17

Tabla 3. Resultados de los análisis de elementos traza y metales de las muestras de sedimentos (concentración en ppm). Datos destacados en **negrita**.

El resultado de la caracterización biogeoquímica de los sedimentos muestreados en octubre de 2019 comparados con los realizados en muestras de marzo de 2019 en los mismos puntos de muestreo, queda reflejado en las tablas 2 y 3.

El estudio comparativo permite concluir que las muestras correspondientes a sedimentos depositados por efecto de la inundación (PIN-1, 3 y 4) presentan valores muy elevados de materia orgánica, nitrógeno en sus diversas formas, P-K disponibles y metales pesados. Esas concentraciones son muy superiores a los de las zonas más internas (Bal 17) no afectadas directamente por la inundación (PIN-2 y 5). Los datos analíticos muestran la fuerte influencia de la explotación ganadera en la composición de los sedimentos acumulados en algunas zonas del interior de la cavidad, especialmente en los contenidos de materia orgánica disponible. Las altas concentraciones de algunos micronutrientes metálicos se asocian al alto contenido en materia orgánica del agua que llega a la cavidad. La materia orgánica del suelo presenta una elevada afinidad por ciertos metales (Co, Cu, Mo, Ni, Pb y Zn) por la formación de complejos organometálicos que pueden migrar fácilmente con el agua de infiltración.

La influencia de la explotación ganadera, no sólo es reciente, sino que todo indica que ha sido prolongada en el tiempo y afectaba fundamentalmente a la zona de la Baliza 9 (y 7 en menor medida), donde el agua se remansaba fácilmente. Los sedimentos de inundación reciente de la zona de la Baliza 7 y 9 presentaron contenidos altos y diferenciados en compuestos nitrogenados orgánicos y elementos metálicos (por ejemplo Zn) similares a los previos de baliza 9. La zona de entrada del agua contaminada por la explotación ganadera debe corresponder directamente con un punto de surgencia situado en la pared Sur de la cueva a la altura de la Baliza 13. Desde ahí, su área de influencia se extiende

progresivamente hacia la pared N y hacia la salida afectando, en mayor o menor medida a gran parte de los sedimentos acumulados en el interior, desde la Baliza 6 hasta la zona de las Balizas 14-15-16. La composición de los sedimentos de la zona de la Baliza 17 indica que su procedencia es diferente y la recarga externa debe producirse hacia el NW de la explotación ganadera.

### Estudio de las comunidades microbianas antes y después de la inundación

El estudio microbiológico, centrado en bacterias, muestra una gran modificación en la composición de las comunidades microbianas entre las muestras previas y posteriores al evento del 23 de octubre, (figura 4). El cambio más notable consistió en la aparición de los filos *Firmicutes* y *Bacteroidetes*, ausentes en las muestras previas a la inundación. Asimismo, se observó un incremento importante de la proporción de *Proteobacteria* y la casi total desaparición de los filos *Rokubacteria* y *Nitrospirae* después de la inundación. A continuación, se describen los resultados obtenidos para los filos bacterianos más significativos:

*Acidobacteria*. Este grupo estuvo bien representado en las muestras de la campaña de noviembre de 2017, principalmente en los sedimentos no colonizados por el moonmilk. Sin embargo, tras el evento producido en octubre de 2019 el porcentaje de acidobacterias

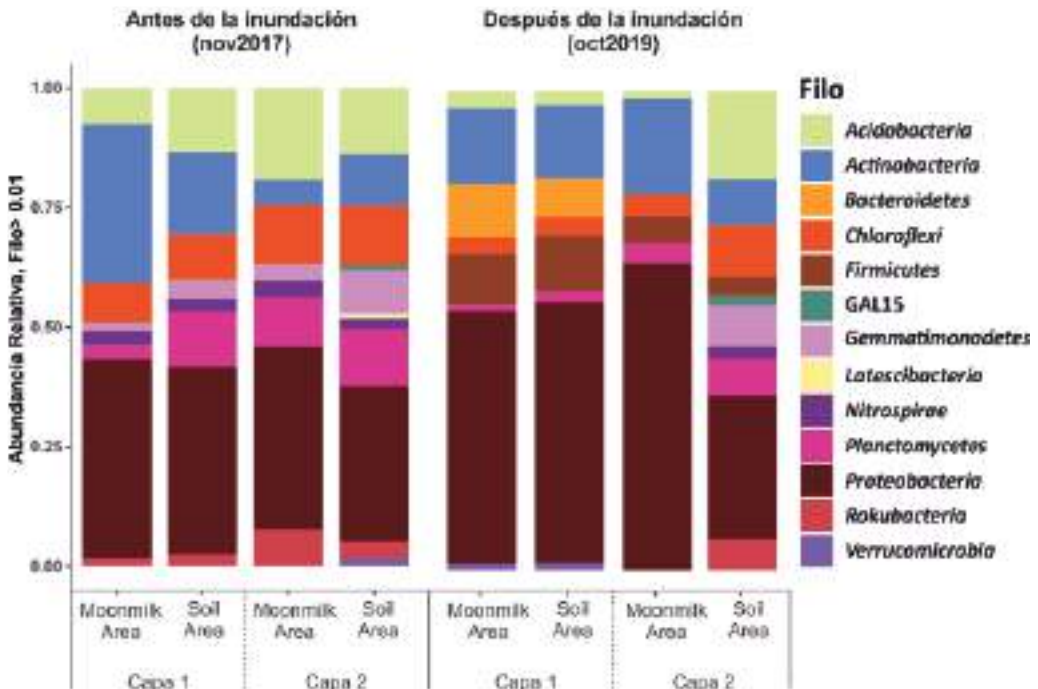


Figura 4. Abundancia relativa de los filos dominantes presentes en la Baliza 9, antes y después de la inundación. Los filos con una abundancia relativa inferior a 0.01 no aparecen representados en la gráfica.

se vio reducido sensiblemente, salvo en la muestra más profunda de *Soil Area*, la cual presentó unos porcentajes similares a la muestra más profunda de *Soil Area* de 2017 (figura 4).

*Actinobacteria*. Este filo fue tan abundante como el filo *Proteobacteria* en la muestra de *moonmilk* de 2017 pero con una reducción significativa de actinobacterias por debajo del material carbonatado. En la campaña de 2019, el porcentaje de actinobacterias disminuyó mucho en la muestra superficial de zona *Moonmilk Area* como consecuencia de la destrucción de ese depósito, pero se mantuvo con valores similares en las muestras de la zona superficial de la zona *Soil Area*, mientras que la muestra más profunda de *Moonmilk Area* mantuvo unos valores similares a los obtenidos en la capa de *moonmilk* de la campaña de 2017 (figura 4).

Antes de la inundación el género más abundante, con diferencia, fue *Crossiella*, sobre todo en las muestras de *moonmilk*. Tras el evento, en octubre de 2019, la proporción de

*Crossiella* disminuyó drásticamente, hasta prácticamente desaparecer en las muestras de la zona *Soil Area*. En su lugar, el género *Corynebacterium* aumentó mucho en las muestras superficiales. Dentro de este género, existen especies patógenas, como *Corynebacterium diphtheriae*, que se asocian a menudo al ganado vacuno.

*Bacteroidetes*. En 2017, este filo aparecía en muy bajas proporciones en todas las muestras. Sin embargo, tras la inundación, resultó ser uno de los más abundantes. Los géneros más representados en los lodos de inundación fueron *Fermentimonas*, del orden *Bacteroidales* y *Chryseobacterium*, del orden *Flavobacteriales*. En las muestras de sedimento antiguo, de la segunda capa, la representación del filo *Bacteroidetes*, fue casi nula. Los *Bacteroidetes* son una parte importante del microbioma del tracto intestinal de mamíferos. Recientemente se han hallado varias especies de la familia *Flavobacteriaceae* en muestras de estiércol procedente de granjas lecheras (Pandey *et al.*, 2018).

*Chloroflexi*. Las secuencias más abundantes se encontraron en las muestras de 2017. En octubre de 2019 el porcentaje se redujo, salvo en la muestra profunda de *Soil Area*, que mostró unos porcentajes similares a los encontrados en la muestra profunda de *Soil Area* de 2017. Las clases más abundantes fueron *Anaerolineae*, *Dehalococcoidia*, TK10, JG30-KF-CM66 y KD4-9.

*Firmicutes*. Del mismo modo que con el filo *Bacteroidetes*, el filo *Firmicutes* apenas aparecía representado por el género *Bacillus* en las muestras de 2017. Por el contrario, en las muestras de 2019 apareció como uno de los filos más abundantes en los sedimentos de inundación. Los órdenes más abundantes fueron *Clostridiales* y *Bacillales*. Dentro del orden *Clostridiales*, los grupos más representados fueron el género *Proteiniclasticum*, de la familia *Clostridiaceae*, y las familias *Christensenellaceae*, *Family X* y *Ruminococcaceae*. Todos ellos cuentan con una abundancia relativa superior al 1% en los lodos de decantación

e inferior en los sedimentos antiguos. Los miembros de la familia *Clostridiaceae* se encuentran en multitud de hábitats desde heces y estiércol, lodos de depuradoras hasta sedimentos marinos y de agua dulce (Pandey *et al.*, 2018). La familia incluye especies altamente patógenas dentro del género *Clostridium sensu stricto*, que ha sido encontrado en todas las muestras de sedimentos de decantación. La familia *Ruminococcaceae* está presente en el intestino de muchos mamíferos y en residuos procedentes de granjas bovinas (Pandey *et al.*, 2018).

*Nitrospirae*. En 2017, *Nitrospira* se encontró representado en proporciones similares y superiores al 1% en todas las muestras de 2017. El filo *Nitrospirae* está presente en multitud de hábitats: suelos, cuevas, océanos, aguas termales y plantas de tratamiento de aguas residuales. El género *Nitrospira* desempeña un papel fundamental en el ciclo del nitrógeno. Todos los miembros de este género son capaces de llevar a cabo el proceso de nitrificación. Su versatilidad metabólica permite a *Nitrospira* colonizar una amplia gama de hábitats y soportar condiciones oligotróficas y grandes cambios en las condiciones ambientales (Daims y Wagner, 2018) pero la inundación provocó que en el muestreo de 2019 la proporción de *Nitrospira* cayera por debajo del 1% en todas las muestras salvo en la muestra profunda de *Soil Area*.

*Proteobacteria*. El filo *Proteobacteria* fue el grupo más abundante en todas las muestras. En 2017 la proporción de *Alphaproteobacteria* se mantuvo constante en todas las muestras y el género más abundante en todas las muestras fue *Pedomicrobium* del orden *Rhizobiales*. En 2019 se observó un aumento de la abundancia relativa de *Alphaproteobacteria*, especialmente en la muestra profunda de *Moonmilk Area*, donde un 20% de las secuencias se correspondían con miembros sin cultivar de la familia *Beijerinckiaceae*.

En 2017, las *Deltaproteobacteria* fueron más abundantes en las muestras más profundas, lo contrario a lo que ocurría en 2019. El género NB1-j y el orden *Myxococcales* fueron los grupos de *Deltaproteobacteria* más abundantes en todas las muestras de 2017. Sin embargo, 2019 NB1-j no superaba el 1% (salvo en la muestra profunda de *Soil Area*), mientras que la presencia del orden *Myxococcales* era muy similar a la encontrada en 2017. Ambos grupos se clasifican dentro de las *Deltaproteobacteria* no reductoras de sulfato.

En 2017, la clase *Gammaproteobacteria* fue la más abundante dentro del filo *Proteobacteria*, representada en su mayor parte por un miembro no cultivado, wb1-P19, de la familia *Nitrosococcaceae* que disminuyó mucho tras la inundación, aumentando el género *Thauera* considerablemente en los sedimentos de decantación. Las especies del género *Thauera* son un grupo de bacterias heterótrofas desnitrificantes, Todos los genomas del género *Thauera* se han aislado a partir de muestras de suelos, sedimentos, lodos, estiércol y plantas de tratamiento de aguas residuales (Yokoyama *et al.*, 2016).

*Rokubacteria*. Este grupo corresponde al filo *Candidatus Rokubacteria* y apareció representado en todas las muestras de 2017, especialmente en aquellas sin presencia de *moonmilk*, con una proporción superior al 1%. Sin embargo, en 2019 su representación disminuyó en todas las muestras salvo en la capa más profunda de la zona *Moonmilk Area*. Este filo recién descrito se encuentra en diferentes hábitats como suelos y aguas y es frecuente en cuevas (De Mandal *et al.*, 2017).

## Conclusiones

Los resultados de los análisis y las observaciones de campo realizadas en la cavidad y su entorno antes y después de su inundación, permiten extraer las siguientes conclusiones:

Los **análisis biogeoquímicos** indican que los sedimentos depositados por efecto de la inundación presentan valores muy elevados de materia orgánica, nitrógeno en sus diversas formas, fósforo y potasio disponibles y metales pesados. Esas concentraciones son muy superiores a los de las zonas más internas no afectadas directamente por la inundación. Los residuos de origen animal acumulados en balsas se convierten en reservorios diversos componentes contaminantes: compuestos nitrogenados, fosfatos, potasio, sulfatos, boro, metales pesados (Fe, Cu, Zn, Mn, Cd, Pb), así como antibióticos y desinfectantes, junto a una amplia gama de poblaciones microbianas, incluidos los patógenos, que pueden causar contaminación y presentar riesgos para la salud pública.

El **estudio microbiológico** comparativo de muestras previas y posteriores al evento del 23 de octubre, ha permitido comprobar que la inundación ha provocado modificaciones muy significativas en la composición de las comunidades microbianas presentes en los sedimentos de la cueva. El cambio más notable ha consistido en la aparición de los filos *Firmicutes* y *Bacteroidetes*, ausentes en las muestras previas a la inundación. Ambos filos bacterianos son parte importante del tracto intestinal humano y de otros mamíferos y son dominantes en muestras líquidas y sólidas de estiércol procedente de granjas lecheras. Asimismo, se ha observado la casi total desaparición de los filos *Rokubacteria* y *Nitrospirae* después de la inundación.

Los datos analíticos del estudio comparativo con muestras previas a la inundación revelan que la fuerte influencia de la explotación ganadera en la composición de los sedimentos de la cavidad se viene produciendo desde hace tiempo y se traduce en contenidos muy elevados de materia orgánica disponible que favorecen el desarrollo y expansión de las poblaciones microbianas de la cueva.

## Agradecimientos

Este trabajo ha contado con la financiación de la Consejería de Cultura, Política Lingüística y Turismo del Principado de Asturias para la realización de los análisis de las muestras de octubre de 2019 y con el soporte del proyecto PID2019-110603RB-I00, MCIN/AEI/FEDER

UE/10.13039/501100011033 para el resto de la investigación. Cuenta con el apoyo de la Plataforma Temática Interdisciplinar CSIC Patrimonio Abierto: Investigación y Sociedad (PTI-PAIS).

## Referencias

- Daims, H., Wagner, M. (2018). Nitrospira. *Trends in Microbiology*, 26, 462–463. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2018.02.001>.
- De Mandal, S., Chatterjee, R., Kumar, N.S. (2017). Dominant bacterial phyla in caves and their predicted functional roles in C and N cycle. *BMC Microbiology*, 17, 90. <https://doi.org/10.1186/s12866-017-1002-x>.
- González-Pumariega, M. (2011). La cueva de El Pindal, 1911-2011. Estudio de su arte rupestre cien años después de Les Cavernes de la Région Cantabrique. Ménsula, Pola de Siero. 212 pp.
- Herlemann, D.P., Labrenz, M., Jürgens, K., et al. (2011). Transitions in bacterial communities along the 2000 km salinity gradient of the Baltic Sea. *The ISME Journal*, 5, 1571–1579. <https://doi.org/10.1038/ismej.2011.41>.
- Jiménez Sánchez, M., Moreno, A., Stoll, H., et al. (2008). Dataciones cronológicas con U-Th en la Cueva del Pindal (Asturias, N España): implicaciones geomorfológicas. In: *Trabajos de Geomorfología en España*, 2006-2008, pp. 49-52.
- Martin-Pozas, T., Sánchez-Moral, S., Fernández-Cortés, A., et al. (2020). Biologically mediated release of endogenous N<sub>2</sub>O and NO<sub>2</sub> gases in a hydrothermal, hypoxic subterranean environment. *Science of the Total Environment*, 747, 141218. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141218>.
- Martin-Pozas, T., Cuezva, S., Fernandez-Cortés, A., et al. (2022). Role of subterranean microbiota in the carbon cycle and greenhouse gas dynamics. *Science of the Total Environment*, 831, 154931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154921>.
- Pandey, P., Chiu, C., Mia, M., et al. (2018). 16S rRNA analysis of diversity of manure microbial community in dairy farm environment. *Plos ONE*, 13, e0190126. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190126>.
- Parise, M., Ravbar, N., Živanović, V., et al. (2015). Hazards in karst and managing water resources quality. In: *Stevanović, Z. (ed.) Karst Aquifers – Characterization and Engineering*. Springer, Cham, pp. 601–687.
- Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C. Soler, V. (2002). Estudio previo puntual del estado de conservación de las cuevas de Candamo, El Buxu, Tito Bustillo, El Pindal y La Loja. *Informe científico-técnico para la Dirección General de Cultura del Principado de Asturias*. 29 pp.
- Tarboton, D.G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources*, 33, 309-319. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>.
- Yokoyama, K., Yumura, M., Honda, T., et al. (2016). Characterization of denitrification and net N<sub>2</sub>O-reduction properties of novel aerobically N<sub>2</sub>O-reducing bacteria. *Soil Science and Plant Nutrition*, 62, 230–239. <https://doi.org/10.1080/00380768.2016.1178076>.

# Contribución al conocimiento de las condiciones ambientales naturales de la Gruta de las Maravillas como consecuencia de la Covid19

Wenceslao MARTÍN ROSALES <sup>(1)</sup>, Manuel LÓPEZ CHICANO <sup>(1)</sup>,  
Ana Belén TORRES ASENSIO <sup>(2)</sup>, Rosario MOYA DÍAZ <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada 18071 Granada.

wmartin@ugr.es, mlopezc@ugr.es

<sup>(2)</sup> Excmo. Ayuntamiento de Aracena, 21200 Aracena (Huelva).

ana.torres@ayto-aracena.es, oficinaturismo@ayto-aracena.es

---

## Resumen

Uno de los problemas más habituales relacionados con los estudios ambientales en cuevas habilitadas para el turismo es el desconocimiento de sus condiciones climáticas naturales, ya que habitualmente tales estudios se realizan en régimen influenciado. Para evitar este problema, se suelen analizar sectores alejados del recorrido turístico, aunque la incertidumbre asociada es elevada. Tal es el caso de la Gruta de las Maravillas, una de las primeras cavidades españolas habilitadas para el turismo. En 1993, casi 80 años después de su apertura oficial al turismo, comenzaron los primeros estudios ambientales de la cavidad, por lo que sus parámetros ambientales básicos han sido, hasta el momento, completamente desconocidos. Sin embargo, el cese de la actividad turística provocada por la pandemia Covid19, que tuvo como consecuencia el cierre de la cavidad, ha permitido conocer mejor sus condiciones en régimen no influenciado durante un periodo de más de dos meses de 2020 (desde el 15 de marzo al 29 de mayo) y casi un mes durante el invierno (10 de noviembre al 11 de diciembre). Las variables registradas corresponden a la temperatura y concentración de anhídrido carbónico en el aire. Dichas variables son muy sensibles a la entrada de visitantes, y por otro lado determinantes en la génesis y conservación de espeleotemas. El análisis de las series de datos ha confirmado el carácter extraordinariamente estable del clima interior, así como su gran inercia, con tiempos de recuperación de hasta un mes. Asimismo, se han registrado valores de temperatura por debajo de los 18°, nunca observados en el sector estudiado de la cavidad, y valores de concentración de anhídrido carbónico también muy bajos (573 ppm). Se ha confirmado además un cambio en el patrón temporal de estas variables en relación con años previos a la pandemia, lo que confirma la gran influencia ejercida por los visitantes en el clima de la cavidad.

**Palabras clave:** Covid19, clima interior, cuevas turísticas, Gruta de las Maravillas, gestión ambiental, .

## **Contribution to the knowledge of the natural environmental conditions of the Gruta de las Maravillas as a result of the Covid19**

### **Abstract**

*One of the most common problems related to environmental studies in caves enabled for tourism is the lack of knowledge of their natural climatic conditions, since such studies are usually carried out in an influenced regime. To avoid this problem, sectors far from the tourist route are usually analyzed, although the associated uncertainty is high. Such is the case of the Cave of Marvels, one of the first Spanish caves enabled for tourism. In 1993, almost 80 years after its official opening to tourism, the first environmental studies of the cave began, so its basic environmental parameters have been, until now, completely unknown. However, the cessation of tourist activity caused by the Covid19 pandemic, which resulted in the closure of the cave, has allowed us to better understand its conditions in an uninfluenced regime during a period of more than two months in 2020 (from March 15 to May 30) and almost a month during*

*the winter (November 10 to December 11). The variables recorded correspond to temperature and carbon dioxide concentration in the air. These variables are very sensitive to the entrance of visitors, and on the other hand, they are determinant in the genesis and conservation of speleothems. The analysis of the data series has confirmed the extraordinarily stable character of the interior climate, as well as its great inertia, with recovery times of up to one month. Likewise, temperature values below 18o have been recorded, never observed in the studied sector of the cavity, and carbon dioxide concentration values also very low (573 ppm). A change in the temporal pattern of these variables has also been confirmed in relation to the years prior to the pandemic, which confirms the great influence exerted by visitors on the climate of the cave.*

**Keywords:** Cave climate, cave of Marvels, Covid19, environmental management, show caves

### **Introducción**

Son bien conocidos los principales impactos ambientales derivados de la explotación turística en las cavidades de origen kárstico (Cigna, 1993, Villar et al., 1986, De Freitas y Schmekal, 2006). La temperatura del aire, la humedad relativa y la concentración de CO<sub>2</sub> son parámetros clave en procesos como la ventilación y la tasa de crecimiento de los espeleotemas y por tanto en la alteración antrópica de éstos. La condensación producida sobre la superficie de las cristalizaciones en ambientes ricos en CO<sub>2</sub> y elevado contenido en humedad puede dar lugar a la generación de anhídrido carbónico y la subsecuente disolución de los espeleotemas, que en el caso de algunas cuevas turísticas constituyen el principal reclamo para su visita. Este fenómeno de alteración se denomina corrosión por condensación, aunque no siempre es debido a las visitas turísticas, pudiéndose originar de forma natural en cavidades (Martín García et al., 2009). El resultado neto de este proceso es la pérdida de brillo de los espeleotemas, y consecuentemente, la pérdida de interés paisajístico de la cavidad. Por esta razón, las variables ambientales que son objeto



de seguimiento de forma más frecuente son la temperatura del aire y la concentración de CO<sub>2</sub> y son además las más sensibles a las visitas turísticas.

A pesar de que hoy en día existen programas de seguimiento ambiental en numerosas cuevas turísticas, uno de los grandes problemas a los que se enfrenta el estudio de los impactos ambientales es, a menudo, el desconocimiento de sus condiciones naturales o, al menos, previas a su explotación turística. Tal es el caso de la Gruta de las Maravillas, situada en pleno casco urbano de Arcena (Huelva), acondicionada al turismo desde hace casi un siglo. A partir de 1993 dieron comienzo los primeros trabajos para evaluar los impactos del acondicionamiento de la cavidad y de las visitas turísticas (Martín Rosales *et al.*, 1994), si bien no existían datos sobre sus condiciones climáticas previas al inicio de su explotación turística. De hecho, para su estudio se eligieron galerías no accesibles al público como sector de referencia no influenciado, si bien, hay que reconocer que la incertidumbre es notable. Sin embargo, la crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19, que provocó el cierre de todos los establecimientos turísticos españoles, permitió obtener valores en ausencia total de visitas durante un periodo de tiempo considerable, la primera vez en más de un siglo de explotación. Como es bien sabido, esta situación de crisis sanitaria, declarada oficialmente en España a través del Real Decreto Real Decreto 463/2020, de 14 de marzo de 2020 provocó cambios importantes en el comportamiento

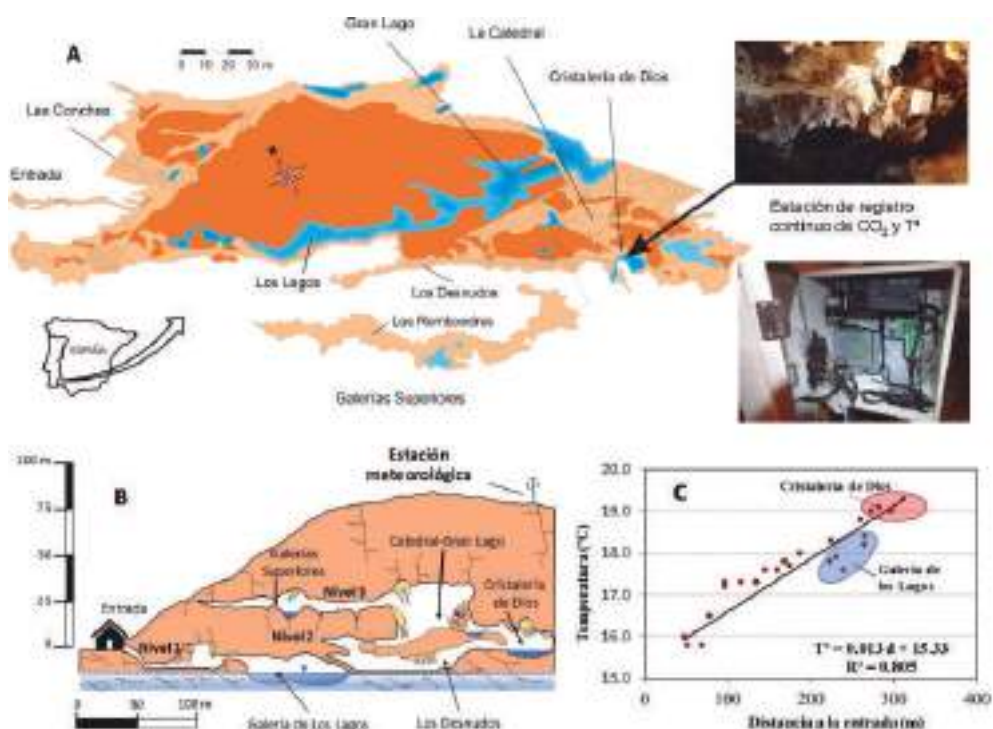


Figura 1. Planta topográfica de la Gruta de las Maravillas con indicación de la estación de medida de la temperatura del aire y la concentración de CO<sub>2</sub> (A), alzado esquemático (B) y perfil de la temperatura en función de la distancia a la entrada realizado en 2005. Baste topográfica simplificada de la original realizada por el Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga en 1985.

y hábitos de personas, empresas y entidades. La disminución de la actividad industrial, vuelos comerciales, eventos multitudinarios, etc., tuvo un efecto beneficioso en el medio ambiente, como fue la reducción de emisiones de gases contaminantes. En el caso de las cavidades turísticas el efecto ha debido ser similar, al desaparecer durante un tiempo la actividad antrópica (visitantes e iluminación). En esta comunicación se sintetizan las características de la evolución de la temperatura del aire, concentración de CO<sub>2</sub> y la presión atmosférica en la Gruta de las Maravillas durante un periodo de casi tres meses del año 2020 en régimen natural.

## **Breve descripción de la cavidad y metodología de estudio**

La Gruta de las Maravillas se ha desarrollado en un pequeño afloramiento de mármoles de apenas 600 m de largo por 150 de ancho, confinado entre gneises al norte y granitos al sur. El desarrollo de la cueva es sobre todo horizontal, con más de 2.000 m de galerías dispuestas en tres niveles de cota diferente. En el nivel de karstificación más bajo, jalonado por un rosario de lagos y galerías inundadas (figura 1), aflora el nivel freático del acuífero asociado (Martín Rosales *et al.*, 2000).

En los mármoles existen elevados contenidos de pirita, que podrían haber contribuido a la corrosión de la roca de caja como consecuencia de la generación de ácido sulfúrico (Martín Rosales *et al.*, 1995, Martínez Moreno *et al.*, 2016).

La temperatura del aire en la Gruta aumenta con la distancia a la entrada según un patrón casi lineal (figura 1), en un rango comprendido entre poco menos de 16 °C en el sector próximo a la entrada, y más de 19 °C en las partes más distales, concretamente en la sala denominada *Cristalería de Dios*. No obstante, este último valor apenas se ha vuelto a registrar desde que se sustituyó el sistema de iluminación por el actual, formado por lámparas LED (Navarrete Martín *et al.*, 2018). La mencionada sala posee un volumen muy reducido, baja tasa de ventilación y una extraordinaria abundancia y variedad de espeleotemas, convirtiéndola en uno de los grandes atractivos de la cavidad. En ellos se han detectado, mediante técnicas de microscopía electrónica, evidencias de corrosión en espeleotemas (Pulido Bosch *et al.*, 1997). Además de alcanzarse en dicha sala los máximos valores de temperatura del aire, también se han observado los mayores contenidos de CO<sub>2</sub> y de gas radón en aire, razón por la cual se instaló en ella la estación de seguimiento continuo de variables ambientales (figura 1).

Los registros analizados en el presente trabajo están referidos fundamentalmente a la temperatura del aire y a la concentración de CO<sub>2</sub> también en aire, así como la presión atmosférica en el interior de la cavidad. Cubren el periodo comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2021, centrándose de forma especial en los intervalos de tiempo durante los cuales la cavidad estuvo totalmente cerrada al público como consecuencia de la Covid-19, y que son concretamente, los comprendidos entre el 15 de marzo y 29 de mayo de 2020, así como entre el 10 de noviembre y 11 de diciembre del mismo año. Los datos ambientales se registran en dos estaciones de medida, ambas de la firma Campbell Scientific, instaladas en 2016 en la *Cristalería de Dios* y en el exterior de la cavidad (figura

1). En la primera de ellas se registran datos de temperatura del aire, concentración de CO<sub>2</sub> y presión atmosférica. En la exterior se registra, además de las variables reseñadas, la precipitación. La frecuencia de medida de las variables registradas es 10 minutos.

Los registros de visitantes, cuya frecuencia de entrada está comprendida entre 15 y 30 minutos, han sido suministrados por el personal adscrito al ayuntamiento de Aracena, entidad gestora de la cavidad.

Las series de datos fueron sometidas al correspondiente tratamiento preliminar de corrección de errores y completado, afortunadamente en casos muy puntuales. Posteriormente se calcularon los promedios diarios y mensuales, así como el resto de las características estadísticas.

## Análisis de la temperatura del aire

La temperatura media diaria del aire en la cavidad durante los años 2017 a 2021 fue 18,32 °C, oscilando entre 18,14 °C en 2021 y 18,45 °C en 2017 (tabla 1, figura 2), mientras que los valores medios del exterior de la cavidad han estado comprendidos entre 14,7 °C en 2018 y 16,9 °C en 2017. Se observa en ambas series (exterior e interior) una tendencia general descendente clara desde el año 2017 que fue el año más cálido durante el periodo 1965-2017 (AEMET, 2017), coincidiendo además con el de mayor afluencia de visitantes, superando los 170.000. Los últimos meses de dicho año fueron, sin embargo, especialmente fríos, sobre todo en Aracena, seguido de un año en donde la temperatura se aproximó a la media interanual, evaluada en 14,6 °C.

La temperatura máxima instantánea registrada en la cavidad superó el valor de 19 °C en los dos primeros años y casi lo alcanza en 2019, tal y como se puede observar en la tabla 1. Estos valores coinciden a su vez con los años de mayor afluencia de visitantes, y

VARIABLE	AÑO				
	2017	2018	2019	2020	2021
<b>Tª Interior (°C)</b>					
Media diaria	18.45	18.41	18.37	18.19	18.14
Mediana (diaria)	18.45	18.40	18.37	18.20	18.10
Máxima instantánea	19.36	19.14	18.99	18.93	18.79
Mínima instantánea	18.23	18.23	18.18	18.02	17.96
Coef. Variación	0.004	0.003	0.003	0.005	0.007
<b>Evolución nº visitantes</b>					
Nº total visitantes	172534	165578	165190	78374	100671
Media diaria	473	454	453	215	273
Máximo diario	1369	1255	1381	1370	855
Nº días > 1000 visitantes	22	7	19	0	0
Nº días sin visitantes	1	2	5	113	24

Tabla 1: Variables estadísticas básicas de la temperatura del aire en la cavidad y afluencia de visitantes durante los años 2017 a 2021 en la Gruta de las Maravillas.

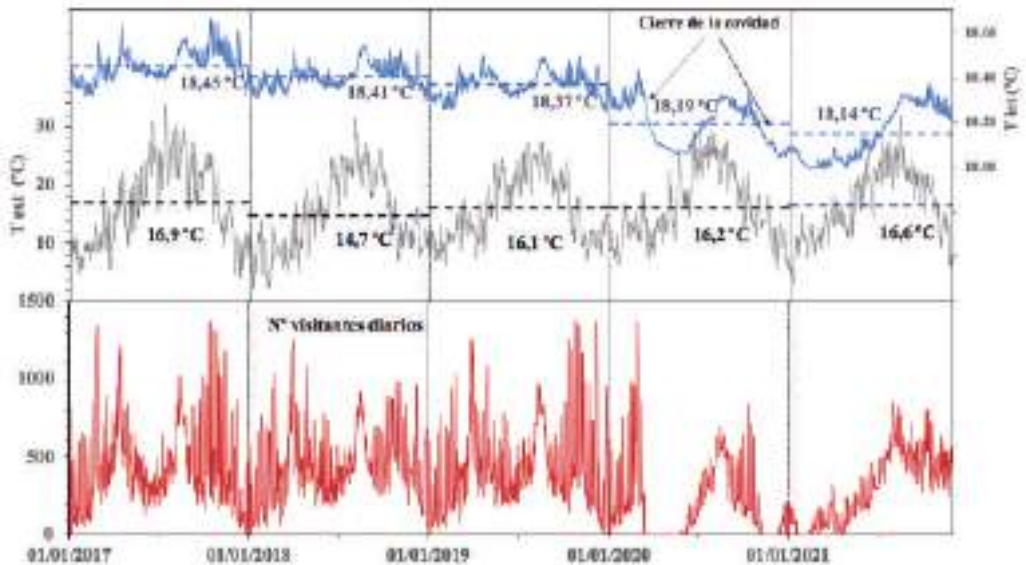


Figura 2. Temperatura media diaria registrada en el interior de la cavidad (parte superior, en azul), en el exterior (centro, en negro), y evolución diaria del número de visitantes (inferior), durante los años 2017 a 2021, con indicación de los periodos de cierre durante la pandemia Covid19.

también los que registraron días con visitas superiores a las 1000 personas. Los valores máximos de temperatura se correlacionan muy bien con los días de mayor afluencia de visitantes.

La respuesta de la temperatura del aire al cierre de la cavidad el día 14 de marzo de 2020, como consecuencia de la Covid19, es evidente, tal y como se muestra en la Figura 3, donde se recogen los datos de temperatura del aire medidos cada 10 minutos. Desde que se produjo el cierre definitivo el día 15 de marzo, la temperatura descendió de forma continuada, siguiendo un patrón casi exponencial hasta el 9 de abril, con una tasa de  $7 \times 10^{-3}$  °C/día. Le siguió un periodo de casi un mes (hasta el 9 de mayo), en el que la tasa de descenso se redujo a  $1 \times 10^{-3}$  °C/día, para finalizar en un periodo de estabilización, alcanzando el mínimo de 18,05 °C.

El segundo periodo de cierre, representado en la figura 4, correspondió a los meses de noviembre y diciembre de 2020, también como consecuencia de las medidas sanitarias adoptadas como consecuencia de la Covid19, que en este caso supuso un total de 31 días sin visitantes. Los meses comprendidos entre noviembre y febrero suelen coincidir con los de menor temperatura registrada cada año en la Gruta, y suele ser, además, el periodo con menor entrada de visitantes, especialmente enero y febrero. Como se puede observar en la figura, la estabilización de la temperatura es sensiblemente más rápida que durante el periodo anteriormente analizado (primavera). El cierre se produjo entre los días 10 de noviembre y 11 de diciembre. Se pueden apreciar dos periodos diferenciados en la evolución de la temperatura. Durante el primero de ellos, desde el día 10 de noviembre

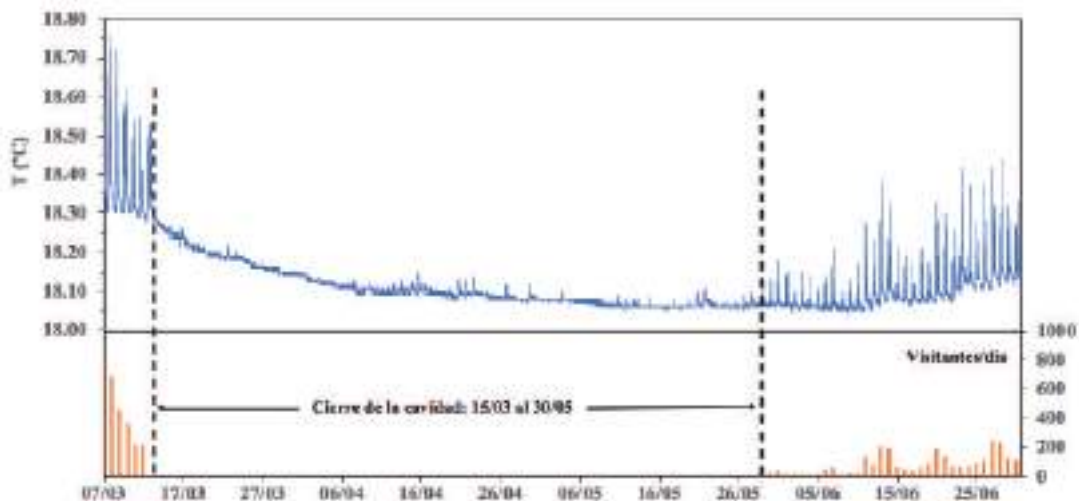


Figura 3. Temperatura del aire registrada en el interior de la cavidad (parte superior, en azul), y evolución diaria del número de visitantes (inferior), durante la primavera de 2020, con indicación del periodo de cierre como consecuencia de la pandemia Covid19.

hasta el 1 de diciembre, la temperatura se mantiene casi invariable y en torno a 18,08 °C, para continuar descendiendo hasta 18,03 °C, valor muy similar al mínimo registrado durante la primavera. En enero de 2021 se produjo un nuevo cierre de la cavidad, esta vez durante muy pocos días, y se llegaron a registrar 17,96 °C, el valor mínimo de temperatura medido en la Cristalería de Dios, al menos desde que se dispone de registros. De cualquier modo, hay que indicar que, si bien es posible que no se haya alcanzado el valor mínimo

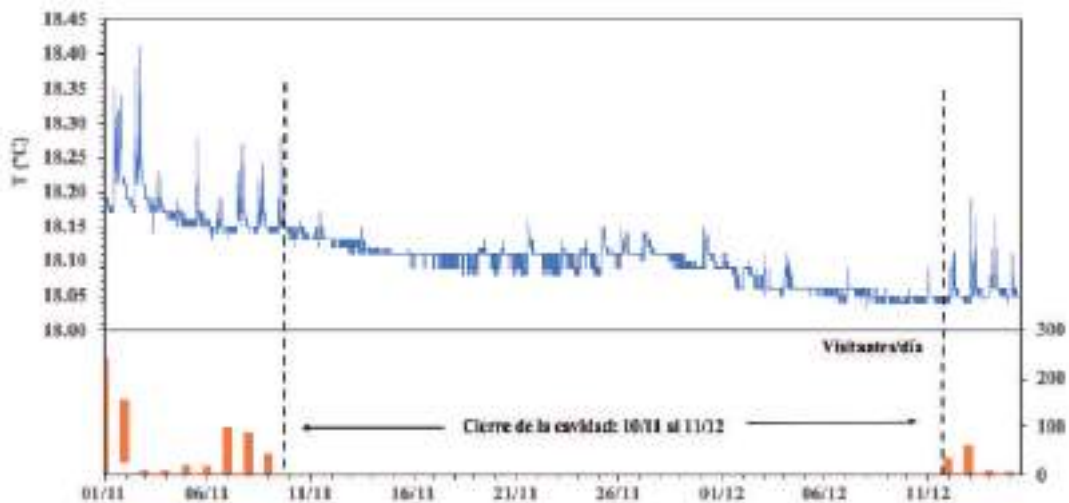


Figura 4. Temperatura del aire registrada en el interior de la cavidad (parte superior, en azul), y evolución diaria del número de visitantes (inferior), durante los meses de noviembre y diciembre de 2020, con indicación del periodo de cierre como consecuencia de la pandemia Covid19.

real, estos valores son sensiblemente superiores a la temperatura media del aire en el exterior, del orden de 14,6 °C y también superiores a la temperatura del agua de la zona saturada del acuífero, estimada en 17,1 °C (López Chicano *et al.*, 2010). En este sentido, conviene indicar que Gázquez *et al.* (2018) corroboraron la existencia de espeleotemas originados a temperaturas más elevadas que la actualidad, sugiriendo la posibilidad de que la cueva se haya visto afectada por calor residual de etapas espeleogenéticas previas durante las cuales las temperaturas fueron más elevadas que en la actualidad.

## **Análisis de la concentración de CO<sub>2</sub>**

Los valores de concentración de anhídrido carbónico en aire en la Gruta de las Maravillas son muy variables, tal y como se puede apreciar en los datos recogidos en la tabla 2 y evidentemente están siempre muy relacionados con la presencia de visitantes en la cavidad. Los valores promedio oscilan entre 1364,1 ppm correspondientes al año 2020 y 1953,6 ppm registrados en 2019. Los valores máximos instantáneos son relativamente elevados, y suelen registrarse en periodos de visitas masivas y en los que la temperatura exterior es elevada (agosto, fundamentalmente). Durante el otoño de 2017 se llegó a superar en un día 5000 ppm, cifra inusual y coincidiendo con un periodo de elevadas temperaturas y gran afluencia de visitas. Precisamente el valor límite de exposición para 8 h en la Unión Europea es de 5.000 ppm (equivalente a un 0,5%).

Los valores mínimos registrados durante el periodo 2017-2021 corresponden precisamente al periodo de cierre de la cavidad en 2020. Independientemente de los posibles problemas para la salud, los valores muy elevados de anhídrido carbónico pueden conllevar corrosión de espeleotemas por condensación. Algunos autores han llegado a sugerir valores límite de concentración de CO<sub>2</sub> en aire a partir de los cuales existe el riesgo de corrosión por condensación (McCabe, 1977 y Kermode, 1974).

La respuesta de la concentración de anhídrido carbónico en aire frente a la ausencia de visitantes es prácticamente inmediata, tal y como se aprecia en la figura 5. Desde que se produce el cierre, la concentración disminuyó desde valores próximos a 1800 ppm hasta los 662 ppm registrados el 22 de marzo, es decir, 7 días desde que se materializó el cierre

CO <sub>2</sub> (ppm)	AÑO				
	2017	2018	2019	2020	2021
Media diaria	1945.6	1839.1	1953.6	1364.1	1641.6
Mediana (diaria)	1800.0	1580.2	1842.1	1016.5	1245.6
Máxima instantánea	5383.0	4470.0	4379.5	3587.1	4105.1
Mínima Instantánea	674.0	650.0	681.5	573.1	574.8
Coef. Variación	0.476	0.491	0.431	0.558	0.579

Tabla 2: Resumen estadístico del contenido de CO<sub>2</sub> en aire en la Gruta de las Maravillas durante el periodo comprendido entre 2017 y 2021.

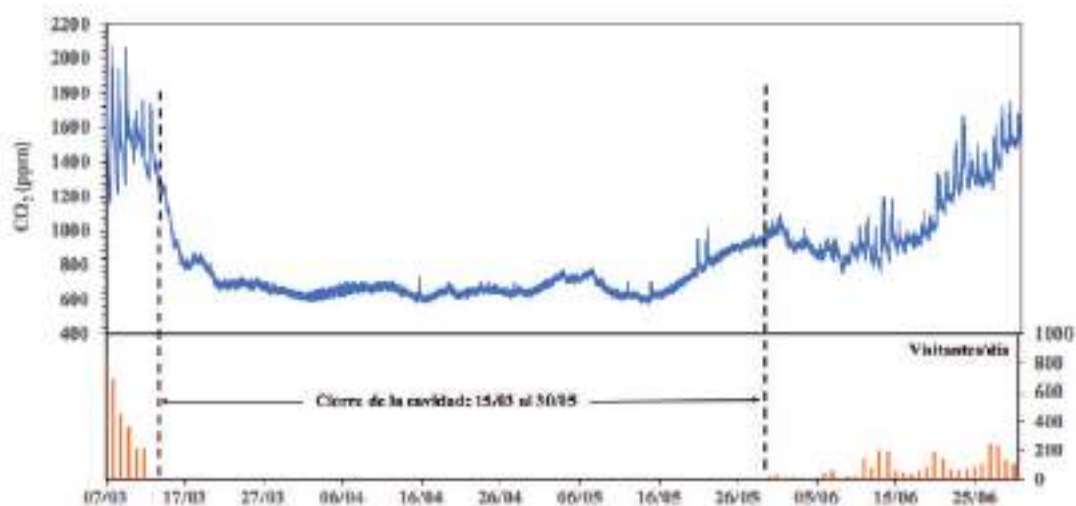


Figura 5. Concentración de anhídrido carbónico en aire (parte superior, en azul), y evolución diaria del número de visitantes (inferior), durante la primavera de 2020, con indicación del periodo de cierre como consecuencia de la pandemia Covid19.

de la cueva. A partir de entonces se mantuvo más o menos constante en el intervalo comprendido entre 770 y 573 ppm, siendo este último valor el mínimo registrado. Sin embargo, a partir del 15 de mayo, la tendencia se modificó, produciéndose un aumento continuado de la concentración de anhídrido carbónico, circunstancia no atribuible a las visitas, ya que la cavidad estaba aún cerrada al público.

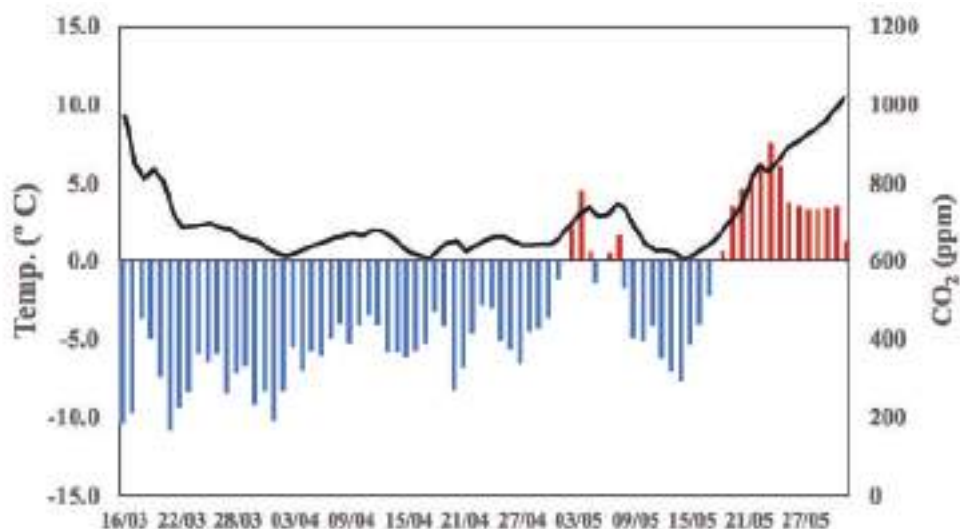


Figura 6: Evolución diaria de la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire de la Gruta de las Maravillas y de la diferencia entre la temperatura del aire exterior e interior, durante el periodo de cierre de la cavidad como consecuencia de la Covid19.

Martin Rosales *et al.* (2010), justifican este fenómeno por las diferencias de temperatura entre el exterior y el interior de la cavidad, determinantes de la capacidad de ventilación de la cueva. Sin embargo, su análisis se realizó en régimen influenciado, por lo que las visitas masivas durante los meses de verano enmascaraban el posible efecto de la inversión térmica. Es precisamente durante la primavera, a finales de mayo, cuando se produce dicha inversión térmica (temperatura exterior superior a la del interior), impidiendo la renovación de aire y provocando un aumento progresivo del contenido en anhídrido carbónico tal y como se observa claramente en la figura 6. Esta circunstancia explicaría asimismo por qué el tiempo de estabilización de la temperatura es sensiblemente mayor durante la primavera que durante los meses de invierno.

## Conclusiones

El cierre de la cavidad a las visitas turísticas debido a la Covid19 ha constituido una oportunidad para conocer mejor las condiciones ambientales de la cavidad, esta vez en régimen no influenciado por las visitas. Se han analizado registros continuos de datos medidos cada 10 minutos. Ello ha permitido conocer los tiempos de estabilización de los parámetros ambientales básicos, desde el momento del cierre de la cavidad. En el caso de la temperatura, la tasa de disminución de la temperatura es extraordinariamente baja, del orden de una milésima de grado por día, y el tiempo de estabilización es del orden de casi dos meses durante la primavera. Durante el mes de diciembre la estabilización se alcanza más rápidamente (menos de un mes), y los valores finales de la temperatura del aire son similares a los registrados durante la primavera (18,05 °C).

Los valores de concentración de anhídrido carbónico en aire alcanzan valores estables de forma más rápida que la temperatura desde el momento del cierre, aproximadamente 7 días, habiéndose registrado mínimos comprendidos entre 500 y 600 ppm. Otro aspecto interesante del funcionamiento del microclima de la cavidad es la constatación de la inversión térmica como responsable del incremento paulatino de la concentración de CO<sub>2</sub> a partir de la primavera, lo que explica los elevados valores que se mantienen incluso hasta bien entrado el otoño. Estos patrones de ventilación de la cavidad deberán tenerse en cuenta en la gestión de las visitas, especialmente durante las épocas en las que la temperatura del exterior es sensiblemente superior a la del interior, ya que pueden suponer elevados valores de CO<sub>2</sub> (e incluso de gas radón) en determinados momentos. La monitorización de estas variables es esencial para garantizar una adecuada gestión de las visitas.

## Referencias

- AEMET (2017). Resumen anual meteorológico. Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, 11 p.
- Cigna, A. (1993). Environmental management of tourist caves: the examples of Grotta di Castellana and Grotta Grande del Vento, Italy. *Environmental Geology*, 21:173-180.
- De Freitas, CR y Schmekal, A. (2006). Studies of condensation/evaporation processes in the Glowworm Cave, New Zealand. *International Journal of Speleology*, 35(2): 75- 81.



- Gázquez, F., Calaforra, J.M., Martín Rosales, W. y López Chicano, M. (2018). Hidrotermalismo de baja temperatura durante la formación de espeleotemas subacuáticos en la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva). En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 69-78.
- Kermode, L.O. (1974). Glowworm Cave Waitomo: conservation study. *New Zealand Speleological Bulletin*, 5, 329-344.
- López Chicano, M., Martín Rosales, W. y Vadillo, I. (2010). Caracterización hidrogeoquímica de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva, España). En: J.J. Durán y F. Carrasco (Eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*, pp. 143-158. Madrid. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.
- Martín García, R., Alonso Zarza, A.M. and Martín Pérez, A. (2009). Loss of primary texture and geochemical signatures in speleothems due to diagenesis: Evidences from Castañar Cave, Spain. *Sedimentary Geology*, 221: 141-149.
- Martín Rosales, W., Rodríguez, C.M., López Chicano, M., Pulido Bosch, A. y Vallejos, A. (1994). Análisis de la influencia antrópica sobre la Gruta de las Maravillas, Aracena, España. Resultados preliminares. En J.R. Fagundo, A. Pulido Bosch, J.E. Rodríguez e I. Morell, (Eds.): *El karst y los acuíferos kársticos. Ejemplos y métodos de estudio*, pp. 279-290.
- Martín Rosales, W., López Chicano, M., Rodríguez, C.M. y Pulido Bosch, A. (1995). Morfología, Espeleotemas y Climatología de la "Gruta de las Maravillas" (Aracena, Huelva). *Espeleotemas*, 5, 51-62.
- Martín Rosales, W., López Chicano, M. y Cerón, J.C. (2002). Experiencias de conservación en la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva). En F. Carrasco, J.J. Durán y B. Andreo, (Eds.): *Karst and Environment*, pp. 539-545.
- Martín Rosales, W., López Chicano, M. y Caballero, V. (2010). Variación temporal de la concentración de anhídrido carbónico en la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva, España). En: J. J. Durán y F. Carrasco (Eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*. Madrid. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. pp. 159-168
- Martínez Moreno, F.J, Pedrera, A., Galindo Zaldívar, J., López Chicano, M., Azor, A., Martín Rosales, W., Ruano, P., Calaforra, J.M., y Hódar Pérez, A. (2016). The Gruta de las Maravillas (Aracena, South-West Iberia): Setting and origin of a cave in marbles from dissolution of pyrite. *Geomorphology*, 253:239-250
- Navarrete Martín, E., Martín Rosales, W., Rabaza, O., Romero Bomba, E., López Chicano, M., Moya Díaz, R., Torres Asensio, A.B. y Guerra González, M. (2018). Eficiencia energética del sistema de iluminación de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva): un paso más hacia un turismo sostenible. En P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 435-444
- McCabe, B. (1977). *The Geochemistry of Ground Water Solutions Entering Limestone Caverns*. MSc dissertation. University of Waikato, 145 p.
- Pulido Bosch, A., Martín Rosales, W., López Chicano, M., Rodríguez Navarro, C.M. y Vallejos, A. (1997). Human impacts in a tourist karstic cave (Aracena, Spain). *Environmental Geology*, 31:142-149.
- Villar, E., Fernández, P.L., Gutiérrez, I., Quindós, L.S. and Soto, J. (1986). Influence of visitors on carbon concentrations in Altamira Cave. *Cave Sci.*, 13 (1): 21-23.



# **Aplicación de técnicas de teledetección en el estudio de la generación de dolinas: Camargo (Cantabria)**

Raquel MARTÍNEZ ÁLVAREZ <sup>(1)</sup>, Mónica MELÉNDEZ ASENSIO <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad de Oviedo. raquelmartinezalvarez97@gmail.com

<sup>(2)</sup> CN Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/Matemático Pedrayes, 25. 3305 Oviedo. m.melendez@igme.es

---

## **Resumen**

La karstificación es un fenómeno que genera relieves de gran belleza, si bien también se puede considerar en determinadas circunstancias como un peligro. Cuando a este peligro se le suma vulnerabilidad y exposición, se convierte en riesgo de origen natural, aunque en ocasiones puede ser inducido por la actividad humana. Ejemplo de ello es Camargo, un municipio localizado al oeste de Santander, donde la aparición de dolinas en superficie desde hace más de cien años evidencia la intensidad de los procesos kársticos. Debido a las características litológicas y geomorfológicas, el desarrollo de dichas formas en superficie se considera un proceso natural. No obstante, el bombeo de agua subterránea desde finales del siglo XIX y hasta la primera década del XXI, con fines industriales y de abastecimiento a la población, ocasionó una intensificación en la aparición de dolinas debido a las oscilaciones piezométricas. Informes previos realizados en el municipio refuerzan esta teoría, de manera que el objetivo actual se centra en la implementación de nuevas tecnologías que aporten una nueva visión de la problemática. En este caso, se han utilizado técnicas de teledetección que permiten analizar la vegetación del entorno, con el fin de conocer su idoneidad como posible indicador del fenómeno. Concretamente, se realiza una correlación entre el índice de vegetación NDVI, medidor de la salud vegetal y las oscilaciones piezométricas registradas, como posible factor más influyente en la generación de dolinas, en el periodo 1984-2020. Se pretende conocer el posible impacto del nivel piezométrico sobre la vegetación de la zona de estudio y, como consecuencia, en el desarrollo de hundimientos. Los resultados obtenidos son optimistas, aunque no concluyentes, al ser necesario realizar un estudio más completo. Por ello se continuará la investigación en esta línea para determinar la idoneidad del índice de vegetación NDVI, y otras técnicas de teledetección, como indicador del desarrollo de dolinas.

**Palabras clave:** Cantabria, dolinas, karstificación, riesgo geológico, teledetección,

## ***Application of remote sensing techniques in the study of doline generation: Camargo (Cantabria)***

### ***Abstract***

*Karstification is a phenomenon that generates reliefs of great beauty, although it can also be in certain circumstances as a danger. When we add vulnerability and exposure to*

*this hazard, it becomes a risk of natural origin, although human activity can sometimes induce the process. An example of this is Camargo, a municipality located to the west of Santander, where the appearance of sinkholes on the surface for more than a hundred years shows the intensity of the karstic processes. Due to the lithological and geomorphological characteristics, the development of these forms on the surface is a natural process. However, the pumping of underground water from the end of the 19th century to the first decade of the 21st, for industrial purposes and for supplying the population, caused an intensification in the appearance of sinkholes due to piezometric oscillations. Previous reports made in the municipality reinforce this theory, so that the current objective focus on the implementation of new technologies that provide a new vision of the problem. In this case, we have used remote sensing techniques to analyze the surrounding vegetation, in order to determine its suitability as a possible indicator of the phenomenon. Specifically, we research the correlation between the NDVI vegetation index, a measure of plant health, and the registered piezometric oscillations, as the possible most influential factor in the generation of sinkholes, in the period 1984-2020. The main goal is to know the possible impact of the piezometric level on the vegetation of the study area and, as a consequence, on the development of subsidence. The results obtained are optimistic, although not conclusive as it is necessary to carry out a more complete study. For this reason, research will continue in this line to determine the suitability of the NDVI vegetation index, and other remote sensing techniques, as an indicator of the development of sinkholes.*

**Keywords:** Cantabria, geological risk, karstification, remote sensing, sinkholes.

## Introducción

Una de las consecuencias de la karstificación es la generación de depresiones cerradas en superficie con forma circular o elipsoidal de diámetro inferior a un kilómetro, conocidas como dolinas (figura 1). Se pueden distinguir dos categorías principales de dolinas (Gutiérrez



Figura 1. Dolina generada en el año 2006 en el cementerio de Muriedas.

et al., 2008): las dolinas de disolución, fruto de la disolución desde la superficie del suelo y las creadas a partir de la erosión interna y de los procesos de karstificación del subsuelo. Este segundo grupo es el de mayor interés en lo que respecta a afección a obra civil y edificaciones. Se pueden diferenciar cuatro tipos diferentes, en función del tipo de material afectado por el movimiento gravitacional descendente (roca firme, *caprock* y cubierta no consolidada) y del mecanismo de subsidencia (colapso o sufusión).



Figura 2. Dolinas relacionadas con la explotación de agua subterránea (Waltham, et al., 2005).

La aparición de dolinas se puede vincular a causas naturales: derivadas de la propia naturaleza soluble de las rocas, ocasionados tras periodos de sequía seguidos de intensas precipitaciones o como consecuencia de factores estructurales. Por otra parte, un porcentaje considerable de las dolinas que más daños materiales causan están relacionadas con la extracción de agua subterránea y el consiguiente descenso del nivel piezométrico (Xiao et al., 2020).

En España, hay múltiples ejemplos de generación de dolinas relacionadas con litologías de rocas solubles (Gil y Mateos, 2008; López y Muñoz, 2005; Bórnez Mejías et al., 2017). Uno de ellos, con más de cien años de vigencia se ubica en Cantabria, en el término municipal de Camargo. Aunque el entorno de Camargo constituye un espacio favorable para el desarrollo de dolinas de forma natural, la extracción de agua subterránea mediante bombeos ha sido considerada el factor determinante en este proceso. Las actividades de bombeo relacionadas con la actividad minera de los siglos XIX y XX ocasionaron la aparición de "soplaos" (término usado localmente para la denominación de dolinas) y condujeron a la paralización de la actividad (<http://soplaos-camargo.blogspot.com/>).

Posteriormente, para paliar periodos de sequía se perforaron de pozos para extracción de agua subterránea. Las variaciones en el nivel piezométrico tuvieron como consecuencia una reactivación del proceso en los años 80 y posteriormente a principios del siglo XXI, ocasionando importantes daños en las viviendas y edificaciones. La posición y oscilaciones del nivel piezométrico, por tanto, son factores relacionados con el desarrollo de dolinas. Cuando el nivel de agua se encuentra próximo a la superficie ejerce de sostén del suelo. Si éste asciende, la cobertera se deforma y agrieta, perdiendo resistencia y permitiendo una mayor infiltración del agua de lluvia. El colapso se desencadena cuando el nivel desciende y, debido a la pérdida de resistencia de la cobertera, se produce un arrastre del material hacia abajo, originando la dolina. Las dolinas originadas en el municipio de Camargo son consideradas de tipo colapso y, en algunos casos, de tipo sufusión.

## Marco geográfico y geológico

El municipio de Camargo se localiza al norte de la comunidad autónoma de Cantabria, distando unos 12 kilómetros de su capital, Santander. Limita al norte con los municipios Santa Cruz de Bezana y Santander; al este con El Astillero y la Bahía de Santander; y al oeste y sur con el municipio de Piélagos (figura 3). Tiene una superficie de aproximadamente 36,58 km<sup>2</sup>, se encuentra a una altura de unos 35 metros sobre el nivel del mar.

## Historia de los colapsos y sus desencadenantes

Durante parte del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX, en Camargo se produjo la explotación a cielo abierto para la extracción de hierro en las formaciones calcáreas. Esta actividad fue llevada a cabo por diversas empresas, siendo una de las más longevas la escocesa Bairds Mining Co. (Gómez-Tielve, 2017). Para satisfacer las necesidades industriales se comenzó a extraer agua subterránea a través de pozos, con el desencadenamiento de dolinas en la zona (localmente conocidos como "soplaos").

En los años 80 del siglo XX, la previsión de escasez de agua junto con que los manantiales captados proporcionaban un caudal que escasamente cubría la demanda, se procedió a la construcción de sondeos mecánicos destinados a conocer las características del acuífero de Camargo y sus posibilidades para satisfacer el abastecimiento con agua potable a la ciudad de Santander y alrededores (SGOPU-DGOH. MOPU, 1982, 1987, 1990). Si bien estos sondeos resultaron productivos, no se pusieron en funcionamiento hasta 1985, año en el que fue preciso reforzar el suministro, debido a una fuerte sequía. En total se utilizaron tres sondeos: San Miguel-La Bolera, en primer lugar y El Carmen e Instituto Formación Profesional, poco tiempo más tarde. La aparición de dolinas en zonas próximas a uno de los sondeos indujo a paralizar la extracción de agua y al estudio y conclusión de la relación directa entre este fenómeno y la explotación de los sondeos (SGOPU DGOH, 1992). La solución consistió en la suspensión de todos los bombeos de agua subterránea. Sin embargo, tiempo después, las acusadas sequías condujeron a la puesta en funcionamiento de los sondeos progresivamente.

Este continuo inicio y cese de la explotación de los sondeos en función de las necesidades durante los años siguientes, reactivó y favoreció la aparición de más subsidencias en el terreno. Para intentar paliar esta afección, se intentó alcanzar un equilibrio entre la extracción del agua subterránea y la estabilidad del terreno mediante periodos de suspensión de la actividad de algunos sondeos y regulando el caudal bombeado en todos ellos, mediante el establecimiento de limitaciones por parte de las autoridades competentes. Nuevamente, los problemas de escasez de agua condujeron a que, a partir el año 2000, se volviera a incrementar los caudales de explotación de los sondeos, hecho que derivó en la aparición de nuevas dolinas. Para el análisis de la problemática y la búsqueda de medias correctoras, realizaron estudios geotécnicos y geofísicos (TRIAX, S.A., 2003, 2004; IGME, 2006, 2007). Aunque en las consideraciones finales se recomendó el cese de las extracciones de agua subterránea o la explotación de sondeos alejados de las viviendas, los bombeos continuaron. Las consecuencias no tardaron en llegar y en el

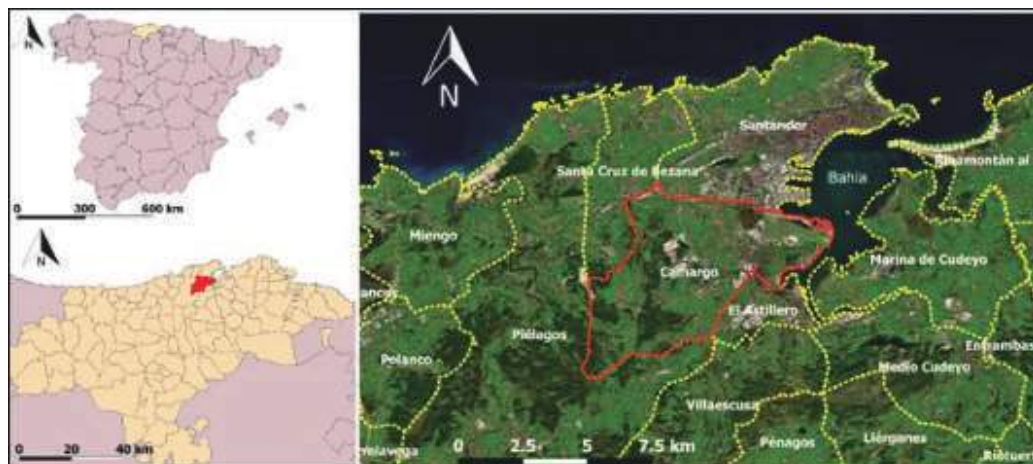


Figura 3. Situación del municipio de Camargo, perteneciente a la Comunidad Autónoma de Cantabria.

verano de 2006, las múltiples dolinas generadas llegaron a forzar el desalojo de dos casas y a un gran derrumbe en el cementerio de Muriedas (TRIAx, 2006, 2007). Los problemas ocasionados junto con la imposibilidad del cumplimiento de las normas fijadas por las autoridades competentes derivaron en la suspensión de los bombeos entre 2007 y 2010. Sin embargo, aún sin extracciones, las oscilaciones del nivel piezométrico por variaciones en el régimen pluviométrico prosiguen, por lo que este fenómeno ha prevalecido en el tiempo.

## Objetivo



Figura 4. Imágenes de los desperfectos del año 2006: arriba viviendas, abajo el cementerio de Muriedas.

En el presente trabajo se analizará la posible relación de la aparición de dolinas con indicadores externos como la vegetación de la zona. Para ello se aplicarán técnicas de teledetección que permitan conocer la evolución de la vegetación y su posible intervención en el fenómeno. Se analizará, además, si la calidad de la relación entre los factores analizados permite que sean considerarlos influyentes en el proceso de desarrollo de dolinas en Camargo. Y por último, se determinará si el índice de vegetación NDVI resulta un buen indicador del fenómeno.

## **Marco geológico e hidrogeológico: acuífero de Camargo**

El acuífero de Camargo (figura 4) está constituido, por calizas y dolomías cretácicas muy karstificadas, de elevada permeabilidad. Los límites del acuífero están bien definidos y coinciden con los contactos con materiales arenosos, limosos y arcillosos de nula o muy baja permeabilidad de edad Bedouliense superior y Cenomaciense inferior. Cabe destacar, en su zona N-NO, la presencia de un conjunto de fallas inversas que podrían inducir una circulación hídrica con los materiales colindantes. La recarga se produce por la infiltración directa del agua de lluvia que incide sobre los afloramientos permeables. La existencia de una divisoria de aguas subterráneas de dirección aproximada N-S (a la altura de Peñas Negras) hace que la descarga se produzca tanto al oeste como al este. El flujo de agua subterránea, por tanto, presenta dos direcciones principales, en el sector oeste, se dirige hacia el río Pas y el manantial de Velo, constituyendo las principales descargas de este sector. Mientras que, hacia el este la descarga tiene lugar al mar Cantábrico a través de una ría que penetra en el acuífero y a través de los manantiales El Collado y Las Ranas, éste último, en ocasiones afectado por el efecto de grandes mareas. Antiguamente, también se producía una descarga artificial derivada de la explotación por bombeo del agua subterránea destinada al abastecimiento industrial y urbano.

## **Metodología**

### *Estimación del índice de vegetación NDVI*

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es el indicador de la salud de la vegetación, basado en la cantidad de luz que ésta puede reflejar y absorber. (Li *et al.*, 2019). La clorofila de la vegetación absorbe la luz visible, mientras que la estructura celular de las hojas refleja la luz infrarroja cercana. Cuando una planta enferma o se deshidrata, absorbe mayor cantidad de luz infrarroja cercana que la que refleja. Por ello, la variación del infrarrojo cercano y de la luz visible es un buen indicador del desarrollo, la cantidad y la calidad de la vegetación de una zona. El índice NDVI se calcula mediante la relación:  $(NIR - RED)/(NIR + RED)$ ; donde NIR se refiere a la espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano y RED a la espectroscopía de reflectancia de la parte roja visible.

Los resultados de esta ecuación se comprenden entre -1 y 1, de tal forma que, cifras de -1 a 0,2, aproximadamente, se corresponden con elementos como agua, nieve, nubes, estructuras artificiales y/o suelo desnudo. Por encima de ese intervalo se encuentra la vegetación y, cuanto más próximo estuviese el valor resultado a 1, se considera un mejor



	NIR	RED
Landsat 5	Banda 4	Banda 3
Landsat 7	Banda 4	Banda 3
Landsat 8	Banda 5	Banda 4

Tabla 1. Bandas utilizadas para el cálculo de NDVI.

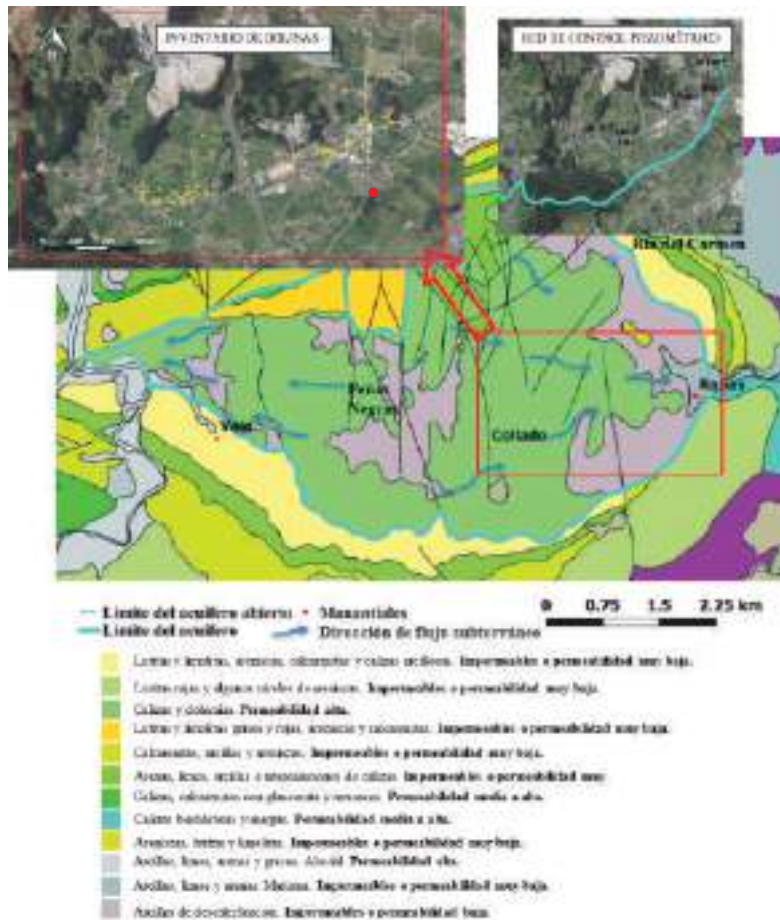


Figura 5. Acuífero de Camargo. En la imagen superior izquierda se muestran las dolinas inventariadas (círculos amarillos) y los manantiales (círculos rojos) en la superior derecha, la red de control piezométrica.

desarrollo de la misma. No obstante, es necesario interpretar el valor del NDVI con precaución, ya que la estación del año, el tipo de planta y las características de la región que se esté estudiando pueden influir, en gran medida, en el resultado del cálculo.

Para conocer la variación del NDVI en la zona a lo largo del tiempo se han utilizado las imágenes Landsat 5 (1984-2013), Landsat 7 (1999-2020) y Landstat 8 (2013-2020). Las bandas utilizadas se reflejan en la tabla 1.

A través de la aplicación Google Earth Engine, se ha observado la variación del índice NDVI, durante el periodo de tiempo 1984-2020, mediante la ejecución de *scripts* de



Figura 6. Polígono superior: zona afectada por dolinas; polígono inferior: zona sin evidencias de hundimientos

programación en Java. Con esto, se busca conocer la posible relación entre el desarrollo de hundimientos en el terreno, causados en gran parte por la extracción de agua subterránea, y la vegetación presente en la zona de estudio. Se ha delimitado un polígono que contiene, con la mejor precisión, el área afectada por dolinas. Además, se han comparado el NDVI obtenido en este polígono con una zona próxima en la que no hay constancia de presencia de dolinas, con características geológicas y de vegetación similares (figura 6).

Además, se ha analizado si la evolución de los niveles piezométricos puede ser relacionada con la variación del índice de vegetación NDVI. Se han utilizado correlaciones entre la evolución del NDVI, tanto en la zona afectada por dolinas como en la libre de hundimientos, y los niveles piezométricos.

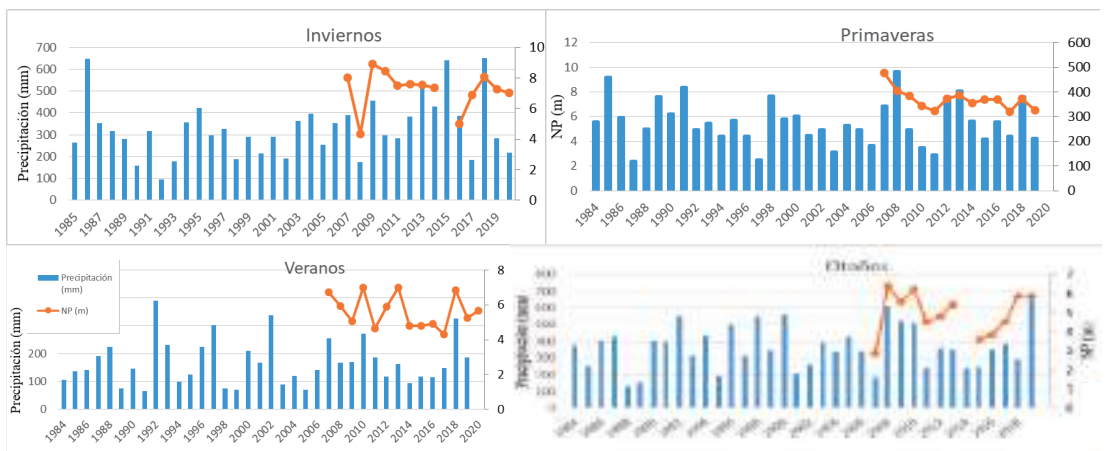


Figura 7. Comparativa precipitaciones/niveles piezométricos medios estacionales.

## Resultados

En primer lugar se establecieron las variaciones en los niveles piezométricos (figura 7), en función de las precipitaciones. Los datos obtenidos muestran que las oscilaciones de los niveles en los sondeos pueden llegar al orden de la decena de metros. Estas variaciones están influenciadas tanto por el régimen de precipitaciones registrado en la zona, como por el volumen de caudal extraído mediante bombeo.

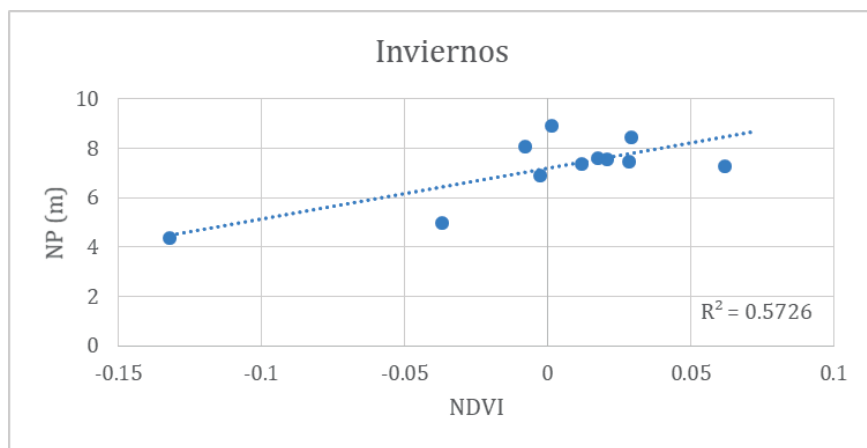


Figura 8. Diferencia del NDVI en ambas zonas y el nivel piezométrico durante los inviernos.

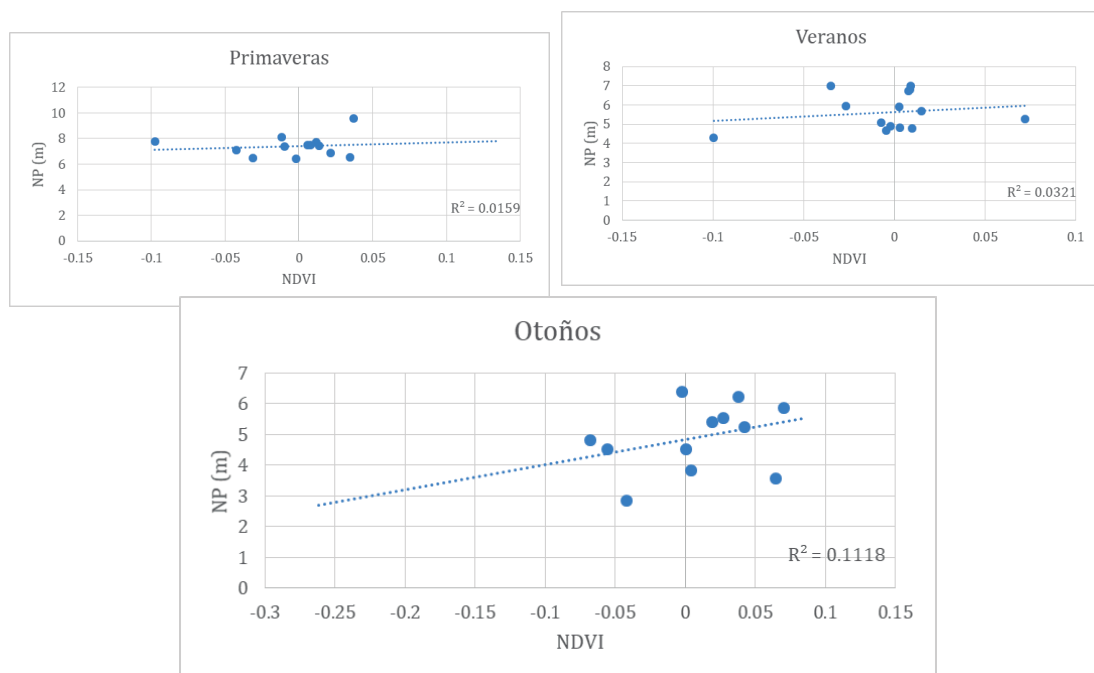


Figura 9. Diferencia del NDVI en ambas zonas y el nivel piezométrico durante veranos, primaveras y otoños.

La diferencia entre el NDVI de la zona afectada por dolinas y el NDVI de la zona vecina, en la que no existen evidencias de hundimientos del terreno permite evitar la posible interferencia en el resultado de las variaciones climáticas. Y la correlación de este parámetro con el nivel piezométrico medio estacional tuvo como resultado que la mejor correlación entre ambos elementos se observa durante los periodos invernales (figura 8), pudiendo sugerir que el nivel piezométrico presenta un alto impacto sobre el estado de la vegetación durante los inviernos. Por el contrario, la correlación en el resto de las estaciones no parece mostrar una relación clara entre la vegetación y el nivel piezométrico (figura 9).

## Conclusiones

Debido a la naturaleza kárstica del entorno de la zona de estudio, el desarrollo de dolinas se considera de origen natural. Sin embargo, actividades antrópicas derivadas del bombeo de agua subterránea han acelerado el proceso. La historia de la aparición de múltiples dolinas durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 2000 y 2006, coincidentes en tiempo con mayores extracciones y periodos de no bombeo, corroboran esta hipótesis.

Actualmente, el abastecimiento urbano a través del agua subterránea se limita al aprovechamiento de dos manantiales, consecuentemente, la aparición de dolinas se ha reducido en frecuencia y su localización es más dispersa.

La variabilidad del régimen de precipitaciones, en una litología con un gran desarrollo kárstico, constituye un factor influyente en el desarrollo de dolinas. De forma general, los inviernos y las primaveras registran la mayor parte del volumen de precipitaciones anual, mientras que resultan frecuentes las sequías durante los veranos y otoños. Las fuertes oscilaciones de los niveles piezométricos, que han llegado a alcanzar variaciones de una decena de metros, constituyen el desencadenante de inestabilidades en el terreno al aumentar los procesos de disolución en las rocas y provocar el lavado de los materiales finos que rellenan huecos (dolinas de colapso y sufusión).

No ha sido posible determinar la idoneidad del índice de vegetación NDVI como indicador del desarrollo de dolinas. Si bien, sí se ha obtenido una buena correlación entre los niveles piezométricos y el desarrollo de la vegetación durante las épocas invernales, por lo que se considera una línea de trabajo interesante; sin embargo, resulta necesario un mayor volumen de datos y ensayos en distintas zonas para probar la idoneidad del método.

## Referencias

- Bórnez Mejías, K., Mejías Moreno, M., Camuñas Palencia, C., Del Pozo Tejado, J., Del Moral Fernández del Rincón, A. (2017). Inventario, clasificación y génesis de los colapsos del terreno en la Masa de Agua Subterránea Mancha Occidental I. *Boletín Geológico y Minero*, 128(1), 43–68. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.128.1.003>
- Gil, R., Mateos, R.M. (2008). Colapsos kársticos en el acuífero de Crestatx (Mallorca). *Geo-Temas*, 2008.
- Gómez-Tielve (2017). *Minería y desarrollo económico en la Bahía de Santander, 1837-1936*. Informe inédito. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Cantabria.

- Gutiérrez, F., Guerrero, J., Lucha, P. (2008). A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain. *Environmental Geology*, 53(5), 993–1006. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0727-5>
- IGME (2006).- Informe sobre las afecciones y daños ocasionados en el término municipal de Camargo (Cantabria). Aspectos Hidrogeológicos y Geotécnicos. Informe inédito. Fondo documental del IGME
- IGME (2007). *Informe sobre las afecciones y daños ocasionados en el Término Municipal de Camargo (Cantabria). Aspectos Hidrogeológicos y Geotécnicos*. Informe inédito. Fondo documental del IGME.
- Li, C., H. Li, J. Li, Y. Lei, C. Li, K. Manevski, and Y. Shen (2019).- Using NDVI percentiles to monitor realtime crop growth. *Computers & Electronics in Agri.*, 162:357-363.
- López, P., Muñoz, A. (2005). *Dolinas de subsidencia y de colapso en el karst carbonatado- aluvial de Grávalos (La Rioja): origen y evolución*. Zubía. ISSN 0213-4306, 23-24, 2005-2006, 59-78.
- Servicio Geológico. D.G.O.H. M.O.P.U. (1982). *Sobre la posibilidad de complementar el abastecimiento a Santander con aguas de los acuíferos del Pas y de Camargo*. Informe inédito. Ref. 11/82
- Servicio Geológico. D.G.O.H. M.O.P.U. (1987). *Sobre las actuaciones realizadas para complementar el abastecimiento a Santander con aguas subterráneas*. Informe inédito. Ref. 02/87.
- Servicio Geológico. D.G.O.H. M.O.P.U. (1990). *Posibilidades de utilización de aguas subterráneas para el abastecimiento de Santander*. Informe inédito. Ref. 03/90.
- Servicio Geológico. D.G.O.H. M.O.P.T. (1992). *Estudio de los hundimientos del terreno productivo en Revilla de Camargo*. Informe inédito. Ref. 5/92.
- TRIAX (2003). *Estudio Geofísico para la localización de huecos en varias parcelas del barrio de Ladredo en Camargo (Cantabria)*. Informe inédito
- TRIAX (2004). *Informe Geotécnico: Causas de los colapsos observados en el área de influencia de la carretera Revilla–Puente Arte a su paso por la localidad de Camargo (Cantabria)*. Informe inédito.
- TRIAX (2006). *Informe Geotécnico: Causas del hundimiento observado en el Cementerio de Muriedas, Ayuntamiento de Camargo (Cantabria), y propuestas de estabilización*. Informe inédito.
- TRIAX (2007). *Informe sobre supervisión de reclamaciones presentadas en relación con posibles daños motivados por subsidencias del terreno en varios barrios de Camargo*. Informe inédito.
- Waltham, T., Bell, F., & Culshaw, M. (2005). Rocks, dissolution and karst. In: *Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*, Springer (ed.), 1– 23. [https://doi.org/10.1007/3-540-26953-3\\_1](https://doi.org/10.1007/3-540-26953-3_1)
- Xiao, X., Gutiérrez, F., Guerrero, J. (2020). The impact of groundwater drawdown and vacuum pressure on sinkhole development. Physical laboratory models. *Engineering Geology*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105894>



# **Cómo la apertura de la Mina Rica y la Geoda de Pulpí ha cambiado la industria del turismo en este municipio**

Laura MARTÍNEZ HARO <sup>(1)</sup>, Cristina MEDINA BERMEJO <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Geoda de Pulpí. Empresa Municipal del Suelo. Ayuntamiento de Pulpí.  
lamartin@pulpi.es, isladeterreros@gmail.com

---

## **Resumen**

El turismo es una industria muy versátil, cualquier elemento ya sea natural o construido por el hombre es susceptible de ser explotado turísticamente hablando. Sin ir más lejos, en España durante la Guerra Civil, grupos de visitantes pagaban a los diferentes bandos para observar el conflicto desde una zona segura. Otro punto a tener en cuenta es el rápido cambio de gustos que experimentan los turistas. Hace unos 30 años el turismo en nuestro país era predominantemente de sol y playa. El sector al completo estaba compuesto por empresas dedicadas a aportar servicios a este tipo de turismo. A finales de los años ochenta y principios de los noventa nos encontramos con cambios tanto sociales como económicos; aumento del poder adquisitivo, aumento de la población con estudios superiores, aparición de nuevas tecnologías, entrada de España en la Unión Europea. Las administraciones públicas se dieron cuenta de la importancia del sector dentro del PIB del país, e iniciaron planes y proyectos para dar a conocer las distintas marcas dentro del territorio español tanto a nivel nacional como internacional. Estos cambios fueron los precursores de la aparición de otros tipos de turismo aprovechando los elementos que cada municipio, provincia o comunidad posea. Las visitas a cuevas y minas turísticas se pueden englobar dentro del turismo de naturaleza, aventura, cultural o científico. Estamos convencidos de que sería positivo para los asistentes a Cuevatour 2022 conocer de primera mano cómo puede llegar a influir en un municipio la apertura de una empresa como La Geoda de Pulpí, tanto al tejido empresarial turístico de un núcleo considerado como maduro y al tejido empresarial en general. Las cifras de los tres últimos años son espectaculares, aún con la pandemia, podemos decir que sin duda La Geoda ha marcado un antes y un después en la economía del pueblo.

**Palabras clave:** estacionalidad, núcleo turístico maduro, tejido industrial turístico, tipos de turismo

## ***How the opening of Mina Rica and the Geode of Pulpí changed the industry of tourism in this village***

### **Abstract**

*The tourism is a very versatile industry, every element, natural o made by the humans could be part of this industry. In fact, during the spanish civil war groups of tourists paid*

*to the different factions for watching the conflict from a safe area. Another important point in tourism is the quick change in customer tastes. 30 years ago the tourism in our country was mainly sun and beach tourism. The entire sector was made up of companies dedicated to providing services to this type of tourism. At the end of the eighties and beginning of the nineties there were social and economic changes, an increase in the population with higher education, the appearance of new technologies, and Spain's entry into the European Union. The public administrations realized the importance of the sector in the country's GDP, and initiated plans and projects to publicize the different brands in Spain territory both nationally and internationally. These changes were the precursors of the appearance of other types of tourism, taking advantage of the elements that each municipality, province or community possessed. We are convinced that it would be positive for those attending Cuevatur 2022 to know first hand how the opening of a company such as La Geoda de Pulpí can influence a municipality, both the tourist industry of a nucleus considered as mature and the economy in general. The figures of the last three years are spectacular, even with the pandemic we can say that undoubtedly La Geoda has marked a before and after in the economy of the town.*

**Keywords:** *mature tourist nucleus, tourist industrial fabric, types of tourism, seasonality.*

## **Introducción**

Desde la apertura de la Mina Rica y Geoda de Pulpí se ha producido un cambio en el tejido empresarial turístico de la zona que, para entenderlo realmente, es necesario conocer primero el tipo de turismo de la zona y ciertos conceptos que nos ayudarán a comprender este fenómeno.

### *Descubrir Pulpí y sus pedanías*

Tenemos 5 pedanías que dependen del núcleo central. La pedanía más importante desde el punto de vista de la industria que nos ocupa es San Juan de los Terreros, con más de 10 kilómetros de costa, 13 playas y calas. Tradicionalmente las familias del interior y de pueblos cercanos iban a Terreros en verano a pasar unos días, en las fechas más señaladas, se quedaban en las cuevas de las calas o en chabolas que ellos mismos hacían.

Posteriormente, sus descendientes ya con mayor poder adquisitivo, empezaron a construir casas y pisos, poco a poco esta zona evolucionó con multitud de segundas residencias y negocios de hostelería pero muy pocas o ninguna empresa de actividades de ocio.

A este tipo de núcleo lo denominamos núcleo turístico maduro, turismo fuertemente estacional y de segundas residencias, poco dinámico y adaptable.

La definición de turismo ha variado bastante con el paso del tiempo, hoy en día podemos decir que el turismo son las actividades que realizamos durante nuestros viajes y estancias en lugares distintos a nuestro entorno habitual durante un tiempo inferior a un año y superior a 24 horas, ya sea con fines de ocio, negocios u otros. Existen multitud de



tipos de turismo; las visitas a minas y cuevas turísticas se pueden englobar dentro del turismo activo, deportivo, científico, de aventura... Quizá demasiados tipos distintos para categorizar estas visitas, esto es solo una estrategia de marketing para hacerse con un nicho de mercado muy pequeño marcado por una sola característica, que en realidad no nos beneficia, ya que disminuye el número de posibles visitantes. Esto está muy bien para poner *hashtags* en las redes, pero debemos utilizar los tipos de turismo como una herramienta más de marketing para nada inamovible: adaptarse es la mejor forma de sobrevivir. La Geoda de Pulpí abrió sus puertas al público el 5 de agosto de 2019, y pocos meses después llegó la pandemia, por lo tanto, no pudimos trabajar a pleno rendimiento, tal como lo estamos haciendo ahora. Recibimos una media de 60.000 personas al año, grandes grupos de multitud de agencias de viajes, visitantes individuales, familias, parejas, pequeños grupos de amigos... Para entender verdaderamente qué ha significado este incremento de personas visitando nuestra zona primero debemos conocer la industria antes de la apertura de la Geoda. En 2018, un año antes de su apertura, ya se hacía un esfuerzo mayúsculo por parte del Ayuntamiento de Pulpí y la Asociación de Turismo Isla de Terreros para intentar mejorar el estado de esta industria. El objetivo principal era intentar disminuir la estacionalidad y aumentar el número de empresas de actividades de ocio. Ese mismo año el Ayuntamiento de Pulpí comenzó las obras de rehabilitación y acondicionamiento de la Mina Rica para poder abrirla al público.

Para analizar el estado de la industria del turismo tanto antes como después de la apertura de la Geoda debemos tener en cuenta 3 factores:

### 1. Empresas hosteleras y hoteleras y cierres en temporada baja

Analizar cuántas empresas de hostelería y hotelería existían antes de abrir la Geoda y después, y como han evolucionado sus cierres de temporada baja.

### 2. Empresas de actividades de ocio, deportivas o culturales.

Saber si han aumentado o no las empresas de ocio, deportivas o culturales que proporcionan al visitante oferta turística en sus estancias nos proporciona una idea de si realmente el turista que viene a visitar la Geoda interactúa de otra forma con el tejido empresarial turístico.

### 3. Datos del Castillo de San Juan de los Terreros, como centro de información turística abierto durante todo el año.

El Castillo en San Juan de los Terreros es un centro de interpretación del litoral andaluz con dos salas de exposiciones, una de minerales y otra de esparto. Además en sus instalaciones se ubica la visita virtual a la Mina Rica y Geoda de Pulpí.

Realiza durante todo el año las funciones de centro de información turística. De este centro hemos analizado los datos de enero de 2018 hasta diciembre 2018 (antes de la apertura) y de junio de 2021 hasta junio de 2022. No hemos podido

utilizar los datos del año 2021 completo ya que a principios de ese año el Castillo pasó por una fase de rehabilitación.

Estos datos recogen los visitantes al centro siendo un fiel reflejo de la afluencia de personas al núcleo, en general, por motivos lúdicos.

## **Datos antes de la apertura de la Geoda de Pulpí**

En el año 2018 existían en San Juan de los Terreros unos 25 establecimientos hosteleros, entre bares, cafeterías, restaurantes y chiringuitos, y solo dos establecimientos hoteleros y tres empresas certificadas como alquileres vacacionales. Los chiringuitos sin excepción cerraban todos desde octubre hasta como muy pronto Semana Santa del año siguiente o el puente de uno de mayo.

Bares, cafeterías y restaurantes solían cerrar tres meses al año como mínimo, normalmente los meses de invierno. Solo dos bares situados en el centro de la población cerraban durante un mes al año por vacaciones.

Las empresas hoteleras también cerraban en temporada baja, unos 6 meses al año. Las empresas de alquileres vacacionales cambiaban su actividad principal a venta y alquiler de inmuebles.

Las empresas de actividades de ocio, deportivas o culturales en el año 2018 eran muy escasas: buceo, *paddle surf* y Oleo-Almanzora. El buceo y el *paddle surf* tienen un fuerte componente estacional, ya que son actividades al aire libre en el Mar y están sujetas al tiempo atmosférico; aun así, la empresa de buceo suele trabajar todo el año si el mar se lo permite. Oleo-Almanzora trabaja todo el año mediante reserva.

Estas tres empresas conjugan muy pocas actividades para un núcleo con tantos visitantes, como veremos en los datos del siguiente punto. Existen otras actividades de índole lúdica y de ocio que se realizaban, y se siguen realizando, desde las administraciones públicas y la Asociación de Turismo Isla de Terreros, aunque no podemos analizarlas en este momento, debemos al menos saber que existen y que la labor de todas las personas que trabajan por ellas es indispensable.

Respecto a las vistas al Castillo de San Juan de los Terreros (figura 1) se observa que los meses de verano son los más concurridos, con un máximo de 3.491 visitantes durante el mes de agosto, y los meses con menos visitantes se corresponden a los de invierno con menos de 400 visitantes diciembre, enero y febrero. La estacionalidad es muy fuerte variando en 3.100 visitantes del mes de febrero (342) al mes de agosto (3.491)

## **Datos después de la apertura de la Geoda de Pulpí**

Tras la apertura de la Geoda, al analizar los establecimiento hosteleros tal y como hemos visto, se observa que permanecen estables, su número no ha variado, pero si es muy

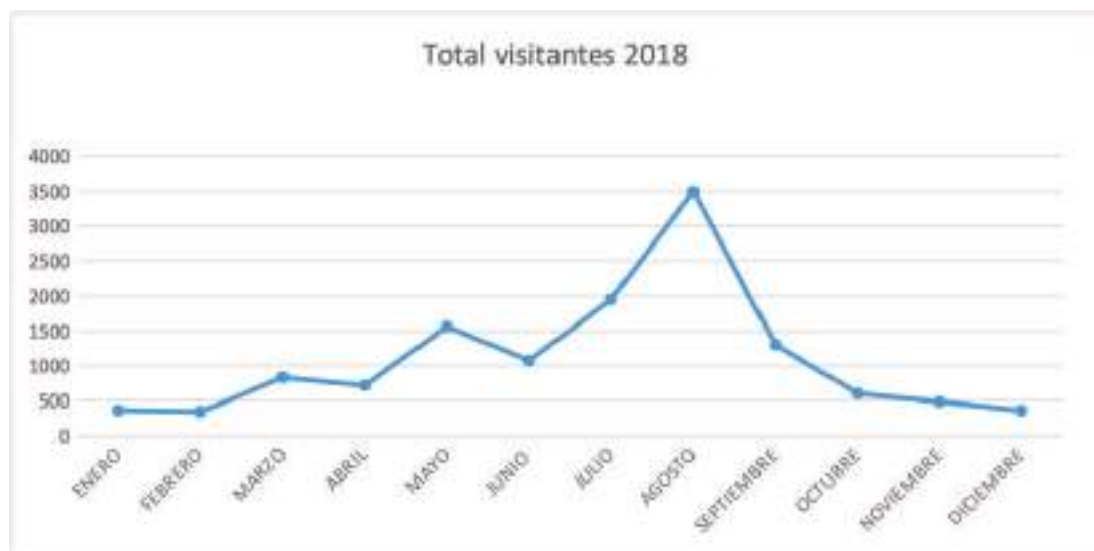


Figura 1. Visitantes al Castillo de San Juan de los Terreros en 2018.

significativo que hayan reducido considerablemente el tramo de cierre, ajustándolo a periodos más cortos.

En este cambio ha tenido mucho que ver la Geoda, ya que la visitan alrededor de unas 60.000 personas al año. Este número aumentará en los próximos años ya que hemos estado muy limitados por la situación, la pandemia y todas las restricciones derivadas de la misma. Estas personas suelen venir en grupo a través de agencias o bien realizan su reserva individualmente. Sea como fuere, esas personas suelen acudir a los restaurantes, lo que ha supuesto para los mismos una gran demanda de grupos de unas 45 a 60 personas al día han hecho que sea rentable permanecer abiertos durante más tiempo en al año, aunque solo sea hasta la tarde y de cara al fin de semana, jueves, viernes, sábado y domingo.

En cuanto a las empresas de alojamiento, al hablar con las inmobiliarias y empresas con alquileres vacacionales o turísticos nos queda claro que la demanda ha aumentado sobre todo fuera de la temporada alta, sobre todo en puentes y fiestas, los meses de noviembre, diciembre y enero siguen siendo los más bajos.

El aumento de empresas privadas y autónomos que proporcionan actividades de ocio y lúdicas es cuanto menos significativo. Hay bastantes empresas y autónomos nuevos, rutas en bicicleta, paseos en barco con o sin patrón, actividades deportivas, kayak, snorkel que, sumados al buceo, paddle surf y Oleo- Almazora, han aumentado la oferta de actividades de ocio, aun con el clima económico y social que hemos vivido.

Respecto a los datos de visitantes al Castillo de San Juan de los Terreros durante los años 2021 y 2022 (figura 2), los meses de verano siguen siendo los más concurridos con un



Figura 2. Visitantes al Castillo de San Juan de los Terreros de junio 2021 hasta junio 2022

máximo de 4.442 personas en agosto. Enero es el mes con el menor número de visitantes con 1.432 personas, la estacionalidad sigue siendo alta si comparamos el número de visitantes de cada mes, aunque se observan ya cambios muy interesantes entre los diferentes años que se discuten a continuación.

## Conclusiones

Como conclusión compararemos ambas gráficas de los distintos años (figuras 1 y 2) para ver realmente la evolución tras la apertura de la Mina Rica y Geoda Pulpí de la industria del turismo en nuestro municipio.

Se observa una similitud muy clara en ambos gráficos, la estacionalidad sigue existiendo y es claramente alta, la afluencia es muy superior en los meses estivales que en los meses restantes, pero si comparamos las cifras de los mismos meses de cada gráfica vemos que existe una diferencia de al menos 1.000 personas más por mes tras la apertura de la Geoda.

También se aprecia una subida muy significativa los meses de temporada baja en los que existen festividades, como pueden ser Semana Santa, puente de mayo o puente de noviembre.

Nos sentimos en la obligación de aclarar que acabar totalmente con la estacionalidad es una utopía, una guerra perdida, ya que las vacaciones escolares y la mayoría de vacaciones en empresas coinciden con los meses de verano. Para un núcleo turístico en el

que domina el turismo de sol y playa debemos ser conscientes de que aunque se mejore, siempre va a existir esta situación.

Tras los datos analizados anteriormente y los datos proporcionados por la Asociación de turismo Isla de Terreros sobre encuestas realizadas a los hosteleros y empresarios turísticos de la zona, podemos decir sin lugar a dudas que el impacto de la apertura de la Mina Rica y Geoda de Pulpí en el tejido empresarial turístico del núcleo ha sido excelente, ha disminuido la estacionalidad, ha aumentado el número de visitantes al mes que recibe el municipio en al menos 1.000 visitantes más en todos los meses del año, dando lugar a la apertura de más empresas durante más tiempo en el año, aumento de empresas de ocio y lúdicas siendo la oferta turística muy superior a la de años anteriores, somos punto de interés para programas televisivos, radios, revistas especializadas, creadores de contenido, agencias de viajes mayoristas y minoristas, asociaciones, instituciones de enseñanza...

Además que la Mina Rica y Geoda Pulpí nos ha dado la oportunidad a muchas personas de trabajar y desarrollarnos en una industria cargada de posibilidades.

## **Agradecimientos**

Queremos dar las gracias a las siguientes instituciones y personas por su colaboración para la realización de este artículo, sin ellas no habría sido posible su realización para CUEVATUR 2022 al Excelentísimo Ayuntamiento de Pulpí por facilitarnos datos y por la confianza depositada en nosotras para gestionar actividades turísticas, a la Asociación de Turismo Isla de Terreros y sus integrantes por su enorme trabajo y dedicación en ofrecer actividades turísticas y a la Excelentísima Diputación de Almería por su aportación y por apoyar siempre los proyectos que desde Pulpí se llevan a cabo para dinamizar el turismo del levante almeriense.



## **Minas, aguas y lumbreras: una asociación de interés geoquímico**

Salvadora MARTÍNEZ LÓPEZ <sup>(1)</sup>, Carmen HERNÁNDEZ PÉREZ <sup>(1)</sup>,

María José MARTÍNEZ SÁNCHEZ <sup>(1)</sup>, Ascensión BANEGAS GARCÍA <sup>(1)</sup>,

Imad EL JAMAQUI <sup>(1)</sup>, Luis ARRUFAT MILÁN <sup>(1)</sup>, Lucía Belén MARTÍNEZ MARTÍNEZ <sup>(1)</sup>,  
Pedro ANDREO MARTÍNEZ <sup>(1)</sup>, Carmen PÉREZ SIRVENT <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Departamento de Química Agrícola, Geología y Edafología.

Universidad de Murcia. Campus Mare Nostrum, 30100 Murcia, Spain

salvadora.martinez@um.es, carmen.hdz.perez@gmail.com, mjose@um.es, ascenbanegas@gmail.com

imad.es@um.es, larrufat@um.es, lbmm@um.es, pam11@um.es, melita@um.es

---

### **Resumen**

En este trabajo se estudia la relevancia que tiene las eflorescencias dentro de mineralogía supergénica relacionada con la minería polimetálica. Por un lado, se discute el origen, las condiciones de formación y el quimismo que las envuelve, por otro lado, se dan los resultados de algunas muestras como ejemplos correspondientes a muestreos realizados en bocaminas de la zona de la Unión (Murcia). Se estudia la mineralogía, composición química y su morfología mediante SEM-EDX.

**Palabras clave:** bocamina, eflorescencia, mina, mineralogía, SEM-EDX

## ***Mines, waters and lenses: an association of geochemical interest***

### ***Abstract***

*This paper studies the relevance of efflorescences in supergene mineralogy related to polymetallic mining. On the one hand, the origin, the conditions of formation and the chemism that surrounds them are discussed, and on the other hand, the results of some samples are given as an example, corresponding to samples taken in mine shafts in the area of La Union (Murcia). Mineralogy, chemical composition and morphology are studied by SEM-EDX.*

**Keywords:** *bocamine, efflorescence, mine, mineralogy, SEM-EDX*

## **Introducción**

La necesidad de comunicar es un hecho global que se ha impuesto como un deber social y atañe a todos los aspectos de que rodean a la persona. Esto afecta también a

emplazamientos, paisajes y ruinas que forman parte del patrimonio cultural (geológico, industrial, minero ...) que necesita ser incorporado a los posibles objetivos científicos, culturales y lúdicos y, por tanto, constituyen un aumento de las responsabilidades de las que la sociedad no puede evadir.

La capa incluida en la biosfera definida por una interrelación inseparable suelo-sedimento-agua y que es el sustento de los ecosistemas y de los ciclos biogeoquímicos, se la conoce como zona crítica. La zona crítica incluye edafosfera, aguas superficiales, zona vadosa y aguas subterráneas, siendo un sistema heterogéneo, que es la base de la alteración supergénica producida por los factores clima, topografía, litología, tiempo y biología. Estos factores, a su vez están regulados por los equilibrios biogeoquímicos que controlan los flujos de contaminantes bien sean orgánicos, metales y radionucleidos (Brantley *et al.*, 2006).

Los procesos desarrollados son a nano escala de respuestas globales, por ello, los impactos recibidos en zonas críticas sean por causas naturales (liberación de energía interna de la tierra o cambio climático) o por causas derivadas de la actividad humana, causan graves daños que se manifiestan a toda la zona de influencia, atmosfera, sostenibilidad del suelo, dinámica de nutrientes, calidad del agua y en definitiva, al ecosistema.

Una zona crítica, si está afectada por actividades mineras, tanto actuales como pasadas, reúne unas circunstancias muy particulares que obligan a realizar una evaluación de riesgos. La justificación de este requisito se basa en diferentes consideraciones, implicaciones de la actividad, características geoquímicas y periodo observado. El ciclo de vida minero comprende distintas etapas y escenarios: exploración y construcción, explotación, cierre y restauración, con una duración comprendida entre los 40 y 60 años caracterizado por la agresividad de las labores mineras para el paisaje y medio natural, que ocasionan transformaciones muy graves con la apertura de cortas, desmontes, escombreras... y una alteración de la geoquímica del entorno. Estos hechos justifican la necesidad de programas de monitorización sin fecha de caducidad (Galán Huertos, 2003).

En la actualidad, las exigencias medioambientales no son compatibles con las actividades mineras desarrolladas en el siglo pasado, y solo en contados casos, persisten algunas explotaciones, estando la mayoría clausuradas y también abandonadas, ocasionando una problemática ambiental muy particular y diferente según el emplazamiento minero que se considere. Estas zonas mineras o cotos mineros (correspondientes a diferentes demarcaciones o concesiones) constituyen las llamadas zonas críticas mineras abandonadas (ZCMA) y son muy numerosas en el SE de España, señalando ejemplos como Sierra Minera de La Unión- Cartagena, Mazarrón, Sierra de Almagrera, Barranco del Jaroso, Águilas, Pulpi, y un largo etc.

Un factor de máxima importancia en la actividad minera es el agua, que afecta de diferente manera dependiendo de la etapa de explotación considerada. En las fases preliminares de exploración y construcción, los problemas potenciales de la actividad del agua están relacionados con la erosión y arrastre de material particulado por aguas superficiales, junto a escapes esporádicos de contaminantes industriales. Durante la



explotación, pueden tener lugar la contaminación química de aguas superficiales y subterráneas, impactos tóxicos a organismos, alteraciones en el paisaje, incrementos en la erosión y pérdida de los recursos hidrológico (Chorover, 2006). Estos procesos se acentúan en la etapa de abandono con el drenaje ácido de mina (DAM) relacionado con el proceso de oxidación de la pirita, mineral omnipresente en minas metálicas, en el que intervienen metabolismos bacterianos.

En estas ZCMAs es frecuente encontrar estructuras como brechas, agujeros, galerías, pozos etc., que son restos de actividades mineras y conocidos como bocamina o entrada a la mina. Pero también reciben a veces otro nombre que es el de lumbrera.

Este término está relacionado con la palabra alumbrar "dar luz con una antorcha o linterna" y se aplica a los pozos de ventilación abiertos a lo largo de las conducciones de agua conocidas con el nombre de "mina" (la palabra mina ha significado unidad de peso de materiales valiosos y, ¿qué es más valioso que el agua?).

Si nos referiremos a aspectos hidráulicos, las lumbreras solían presentarse al exterior bajo la forma de pozos de cuello circular o cuadrado, edificado en mampostería o ladrillo. Estas construcciones se levantan con una doble finalidad práctica y técnica; servían para la iluminación interna del recorrido, para acceder a efectuar las oportunas labores de limpieza de toba, azolves o desprendimientos, para tomar agua de la superficie a manera de pozos y, sobre todo, para romper la presión interna de las galerías ante una eventual crecida de caudal.

Sin embargo, en parajes mineros, y concretamente en ZCMAs, las lumbreras son los sitios que alumbran las galerías y que, en numerosos casos, cuando se sitúan a la entrada o coincidiendo con grietas o hendiduras, coinciden con manantiales de agua que dependiendo de las condiciones redox, puede ser agua ácida (DAM). Por tanto, la palabra lumbrera y mina están muy relacionadas a través del agua, es un hecho común que una reclame a la otra.

Otro aspecto derivado de esta asociación es el término alumbre, que está referido a un sulfato hidratado de aluminio y potasio, de alto valor estratégico, usándose como mordiente en textiles y para curtir pieles. A partir de la época medieval, se utilizó en medicina como astringente para heridas y cortes menores y desinfectante. Esta sal es parte de las conocidas eflorescencias de mina que se forman en los lugares en donde se produce la evaporación de las aguas ácidas, o sea, en las inmediaciones de las lumbreras.

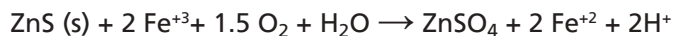
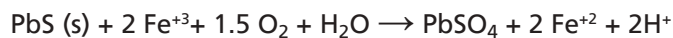
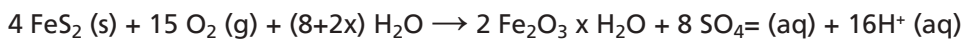
En química, la eflorescencia (resultado de florecer) es la migración de una sal a la superficie de un material poroso, donde forma una capa frágil al evaporarse el agua, de muy variable composición con un hábito cristalino similar a una agrupación floral, reclamando el nombre de flor química o minera, según el proceso sea natural o desarrollado en el laboratorio.

En la figura 1 se muestra una eflorescencia de halotrichita que se forma por el lixiviado de las rocas que ha sufrido alteración argílica y que contienen sulfuro de hierro y alunita.



Figura 1. Eflorescencia de halotriquita  $FeAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$  (minas de Rodalquilar-Cabo de Gata, Almería).  
(foto: Luis Arrufat)

Procesos: las más importantes reacciones de oxidación para la formación de DAM son las que envuelven a la pirita, galena y blenda:



Las consecuencias implican una elevada alteración supergénica, acidificación, aumento de la movilidad catiónica y formación de fases solubles de diferente grado de hidratación, que cuando cristalizan dan lugar a eflorescencias, minerales constituidos por sulfatos hidratados de solubilidad máxima (Pérez-Sirvent *et al.*, 2016).

La figura 2 muestra las distintas etapas que tienen lugar en la producción de DAM, siendo el pH de medio el factor limitante del proceso y en la Figura 3 se muestran las fotografías que exponen distintas panorámicas con aguas ácidas.

El  $Fe(OH)_3$  es un eslabón para la formación de jarosita en el mecanismo propuesto:  $3 Fe(OH)_3 \text{ amorf.} + 4H^+ + 2 SO_4^{2-} \rightarrow H_3OFe_3(SO_4)_2 (OH)_6 + 2H_2O$ , con inclusión de Na, K y Al en la fórmula  $(Na,K,X)_3 (Fe,Al)_3 (SO_4)_2 (OH)_6$ , siendo  $X = Ca, Pb, Ag$ . El metal pesado entra

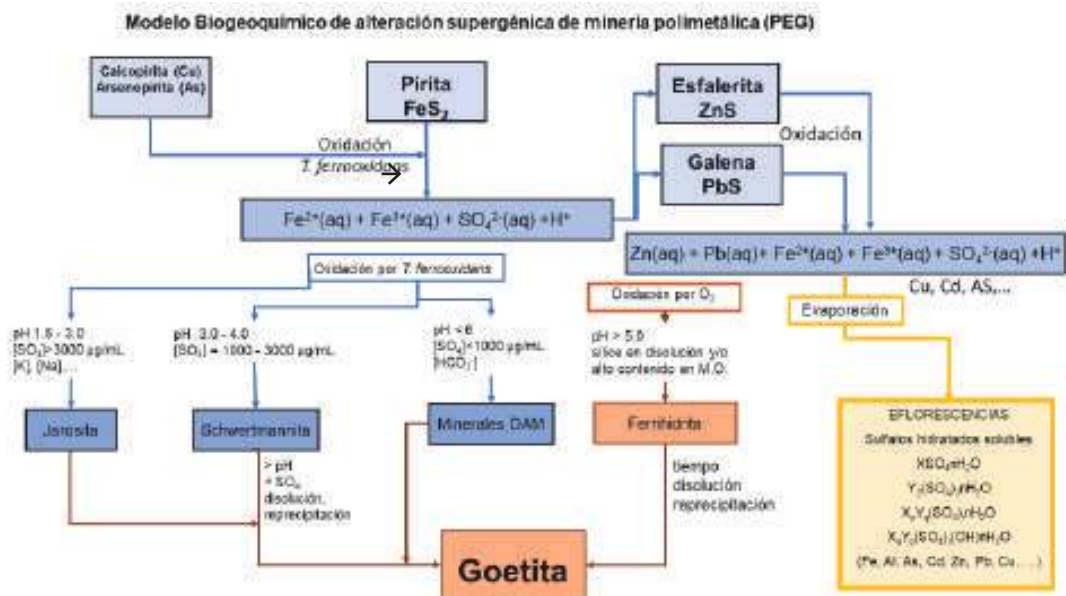


Figura 2. Distintas etapas que tienen lugar en la producción de DAM.

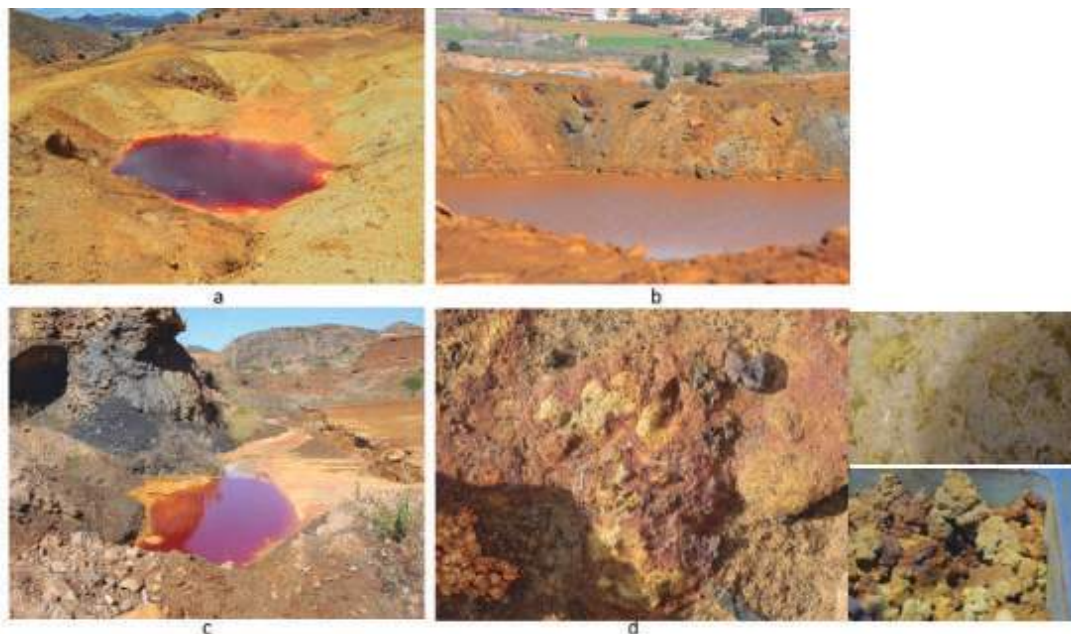
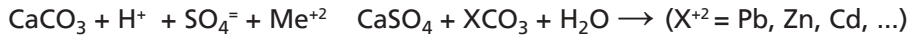


Figura 3. Fotografías de distintas panorámicas con aguas ácidas. a) Mazarrón, Cerro San Cristobal, b) La Unión. c) Barranco Rambla del Gorguel. d) Eflorescencias (fotos: Carmen Pérez Sirvent).

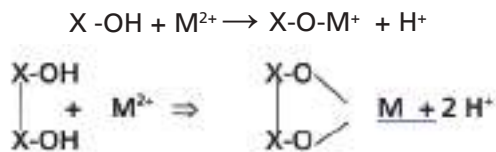
en la red del sulfato, bien porque se encuentre retenido por adsorción en el  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , o aportado a la reacción como metal soluble (en caso del Pb, plumbojarosita).

Las aguas ácidas reaccionan con los carbonatos, produciéndose una neutralización del pH y una precipitación de los hidróxidos de Fe y Al que pueden reaccionar con los iones sulfato, formándose jarosita y yeso. Por esto, los materiales que forman el cauce de la rambla en esta zona pueden tener un pH en agua de 3, y una C.E. de 24 ms/cm.



Dentro de los procesos de adsorción que tiene lugar en la etapa de sedimentación, juegan un papel importante los minerales de la arcilla del suelo, actuando como posibles adsorbentes de Pb de diferente origen: 1) Metal soluble en las aguas de lixiviación, 2) Metal liberado in situ por oxidación del sulfuro particulado, y 3) Metal liberado en un proceso de desorción de los óxidos/hidróxidos de Fe y Mn particulados, provocado por una disminución de pH al contacto con aguas ácidas.

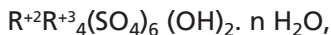
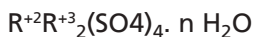
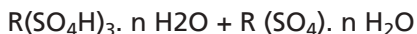
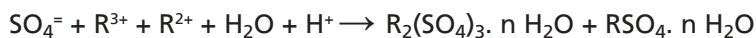
El mecanismo que regula estos procesos puede explicarse por complejación. La superficie de los óxidos e hidróxidos pueden adsorber metal formando complejos, o quelatos:



El pH juega un papel importante en estas reacciones y también es frecuente que se produzcan cambios en el grado de hidratación de estos compuestos de una manera espontánea y ligada a las condiciones atmosféricas presentes, lo que contribuye a aumentar la complejidad de la identificación de fases presentes.

Las fases solubles presentan una mineralogía que guarda una estrecha relación con la composición química global de las muestras. Se diferencian los siguientes grupos: a) sulfatos de Al (alunógeno) o de Fe(III) (coquimbita y paracoquimbita); b) sulfatos correspondientes a la serie isomorfa entre Zn, Fe(II) y Mg (bianchita), y c) sulfatos dobles hidratados de metal trivalente (Fe, Al), con metal divalente (Mg, Fe, Zn), con una relación molar S(III)/S(II) de 4 en el grupo de la copiapita y de 2 en el de la halotrichita y d) sulfatos dobles hidratados de metal trivalente (Fe, Al), con catión monovalente (H, Na, K), romboclasa y alumbres.

El modelo simplificado aplicable a este proceso debe tener en consideración, al menos, tres factores diferentes: a) solubilidad de las fases cristalizadas; b) relaciones estequiométricas de los sulfatos y c) concentraciones relativas de los elementos mayoritarios deducidas a partir del número de moles. Las fases que pueden formarse en un medio confinado a partir de soluciones ácidas naturales pueden ser las siguientes (García Rizo *et al.*, 1999):



donde los principales elementos son  $\text{R}^{+3} = \text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$  y  $\text{R}^{+2} = \text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Cu}$ , incorporando pequeñas cantidades de  $\text{Pb}$ ,  $\text{Ge}$ ,  $\text{Sn}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Cr}$  ....

En relación con el primer factor, los sulfatos que aparecen en primer lugar son los de los elementos divalentes ( $\text{R}^{+2}$ ), debido a que su producto de solubilidad es más bajo. La consecuencia de este hecho es la formación de  $\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (melanterita), que sólo es estable a pH muy ácidos. La importancia de esta fase se debe a que los sulfatos de  $\text{Fe}^{2+}$  son precursores de la génesis de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

El amplio intervalo de los reemplazamientos isomórficos que se pueden presentar y la considerable variabilidad en el contenido de agua, son las características más significativas de un grupo complejo de minerales, que aparecen generalmente asociados con otras muchas especies de alteración (melanterita, alunógeno, fibroferita, halotrichita, butlerita, etc.) en la zona superior de oxidación en menas de piritita y otros sulfuros. Su entorno natural y paragénesis está relacionado con los procesos finales de la alteración supergénica de sulfuros (López-Aguayo y Arana, 1992). Estos sulfatos básicos complejos, con un alto grado de hidratación, tienen como principales características de ordenamiento atómico las siguientes: a) cadenas formadas por tetraedros  $\text{SO}_4$  y octaedros  $\text{Fe}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_2\text{O}_3$ ; b) octaedros aislados en el origen de la celdilla y c) moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$  no unidas directamente a los cationes y que contribuyen a un sistema complejo de enlace por puentes de hidrógeno.

La composición química de los minerales del grupo de la copiapita se puede expresar como  $\text{A}(\text{XO}_4)\text{Z}_q \cdot x\text{H}_2\text{O}$ , o más específicamente mediante la fórmula desarrollada  $(\text{A}^{2+}_{1-3x}\text{B}^{3+}_{2x})\text{Fe}^{3+}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , en donde B representa un catión trivalente (Fe,Al), con  $x=1/3$ ; A un catión divalente ( $\text{Fe}^{2+}$ , Mg, Zn, Cu, Ca), con  $x=0-2/3$  y  $n=20$ , aunque puede variar entre 14 y 35, según los términos. Existe una serie completa por reemplazamiento de  $\text{Fe}^{2+}$ , Mg, Zn y Cu en la posición A, dando lugar a copiapita ( $\text{Fe}^{2+} > [\text{Mg}, \text{Cu}, \text{Zn}]$ ), magnesiocopiapita ( $\text{Mg} > [\text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zn}]$ ), cuprocopiapita ( $\text{Cu} > [\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Zn}]$ ) y zincocopiapita ( $\text{Zn} > [\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Cu}]$ ). También pueden existir pequeñas cantidades de  $\text{Mn}^{2+}$ , Ca, Ni y alcalinos en la posición A y algo de  $\text{Fe}^{2+}$  se puede oxidar a  $\text{Fe}^{3+}$ . Asimismo, parte del  $\text{Fe}^{3+}$  en la posición B puede ser sustituido por Al con una relación Al: $\text{Fe}^{3+}$  alrededor de 1:4. Los términos más comunes de este grupo son la copiapita y la magnesiocopiapita.

Las figuras 4 y 5 ilustran y resumen la terminología sistemática de las principales especies minerales, descritas en la zona de estudio, de sulfatos hidratados e hidroxisulfatados respectivamente. No se trata de una recopilación exclusiva, ya que estos minerales pueden tener una variabilidad grandísima dependiendo de la composición de las aguas de origen y de las condiciones fisicoquímicas del medio existiendo un número de especies mucho mayor.

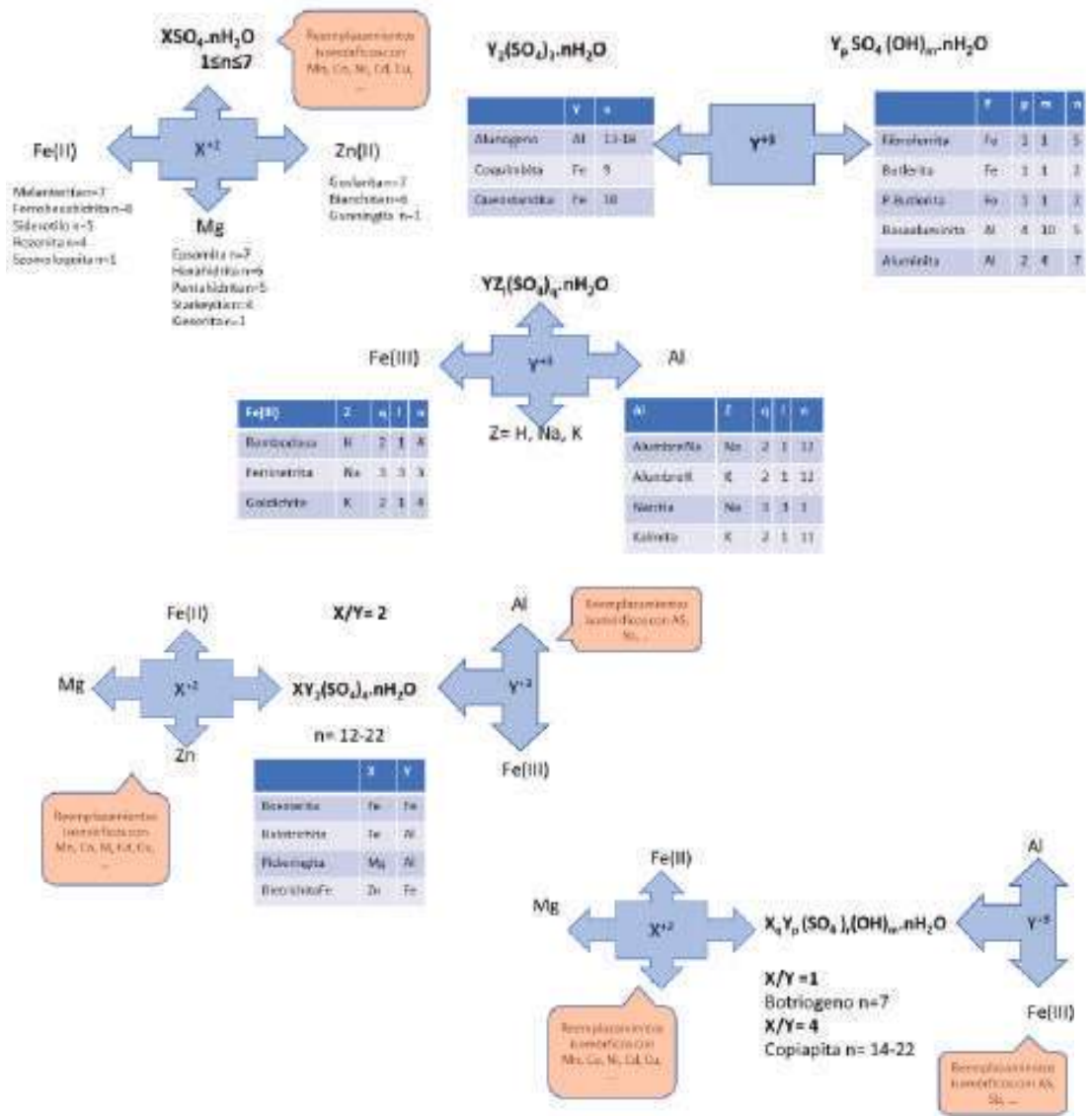


Figura 4.- Ilustración y resumen de la terminología sistemática de especies minerales sulfatos hidratados.

## Zona de estudio

La Sierra de Cartagena-La Unión y su zona de influencia minera, se sitúan en el extremo sur oriental de la Región de Murcia entre Cabo de Palos y Cartagena (Figura 6).

La Sierra Minera de Cartagena-La Unión, constituye el extremo suroriental de la Cordillera Bética y uno de los distritos mineros más importantes de España y de la Región de Murcia



Figura 5.- Ilustración y resumen de la terminología sistemática de especies minerales hidroxisulfatadas

por sus yacimientos minerales de Fe-Pb y Zn (López, 1992; Manteca y Ovejero, 1992). Las actividades extractivas se iniciaron hace 2.500 años. Tuvieron su época de esplendor durante los siglos XIX y XX, y fueron generando crecientes cantidades de estériles que están sometidas a los procesos naturales de meteorización, erosión y a una escorrentía superficial en aumento (Benedicto, J., et al., 2009).

## Material y métodos

Para el estudio desarrollado en este trabajo se tomaron 6 eflorescencias de algunas bocaminas localizadas en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Murcia, Sureste de España). El muestreo se realizó con todos los criterios de calidad para la toma y transporte de muestras.



Figura 6.- Localización de la zona de estudio.

### *Procedimientos para la digestión/extracción de metales pesados y elementos traza en eflorescencias*

Se determinaron los contenidos totales en las eflorescencias estudiadas. Para la determinación del contenido total de elementos de las eflorescencias, se realizó una digestión previa de las muestras en microondas Milestone ETHOS PLUS a alta presión. En la determinación del contenido total de elementos traza se siguieron los procedimientos QA/QC (Quevauviller, 2002), empleando distintos materiales de referencia: NIST SRM 2711 Montana Soil, NIST SRM 2709 San Joaquin Soil, NCS DC 73319, NCS DC 73320, NCS DC 73321, NCS DC 73323, NCS DC 73324 y NCS DC 73325.

### *Condiciones experimentales e instrumentación utilizada para la determinación de Zn, Fe, Cd, Pb y Cu*

Para determinar los contenidos de cinc, hierro, manganeso, cadmio, plomo y cobre, se emplearon las técnicas Espectrometría de Absorción Atómica en llama (FAAS) y Espectrometría de Absorción Atómica en horno de grafito (ETAAS) utilizando un Espectrómetro de Absorción Atómica HR-CS AAS ContrAA® 700. La técnica de grafito se usó cuando el analito se encontraba a nivel de traza, ya que emplea un sistema de atomización más eficaz.

Es un espectrómetro de absorción atómica alta resolución-fuente continua para la tecnología de llama y en tubo de grafito. Se basa en la absorción de una radiación primaria a través de los átomos en estado base. Dispone de una lámpara de xenón de arco corto como emisor continuo. La corrección de fondo automática y simultánea con integración de pixel de corrección permite corregir inmediatamente la desviación de la lámpara y todos los efectos banda ancha en los espectros.

### *Condiciones experimentales e instrumentación utilizada para la determinación de As.*

Los contenidos de arsénico fueron determinados mediante Espectrometría de Fluorescencia Atómica con Generación de Hidruros (GH-AFS) empleando un equipo PSA Millenium Excalibur 10055 (Martínez-López, S., 2010). En la determinación se siguieron los procedimientos QA/QC (Quevauviller 2002), empleando distintos materiales de referencia: NIST SRM 2711 Montana Soil, NIST SRM 2709 San Joaquin Soil, NCS DC 73319, NCS DC 73320, NCS DC 73321, NCS DC 73323, NCS DC 73324, NCS DC 73325.

El control de calidad seguido; cada 10 muestras se realizó una medida de suelo de referencia. Determinación de la composición mineralógica de las muestras de eflorescencias por Difracción de Rayos X (DRX). Las muestras fueron molidas y tamizadas a 50 micras, en un mortero de ágata para su estudio de la composición mineralógica por DRX.

Se utilizó un espectrómetro Philips Difractómetro de RX Philips PW3040 con rendija de ventana 1°, contador proporcional y filtro de níquel. La interpretación de los diagramas se realizó mediante el software X Powder 2004.04.04 PRO (Martín 2004) vinculado a la



Muestra	As (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (%)	Zn (mg/kg)
Eflorecencia 1	17	523	12	95	16	6299
Eflorecencia 2	19	556	32	85	8	18181
Eflorecencia 3	470	138	9	81	31	3884
Eflorecencia 4	200	1250	2	63	40	3362
Eflorecencia 5	232	947	3	68	26	2066
Eflorecencia 6	79	1171	2	76	30	1082

Tabla 1. Resultados de las Eflorescencias de la zona de estudio

Muestra	Na	Ye	Co	Al	Ap	Fi	St	Pa	Di	Ro	Ph	Pa	Ci	A
Ef 1			22	4				7	36	5				26
Ef 2					37		14	3	24					22
Ef 3			55			30								15
Ef4			18			70								12
Ef 5	27	6	10								19	21		17
Ef6	34	19									9	19	4	15

Na= natrojarosita; Ye=yeso; Co=copiapita; Al=alunogeno; Ap=apiopita; Fi=fibroferrita;  
 St= starkeyita; Pa=paracoquimbita; Di=dietrichita; Ro=rozenita; Ph=phologopita;  
 Pa=parabutlerita; Ci=clinocloro; A=amorfos

Tabla 2. Composición mineralógica de las Eflorescencias de la zona de estudio

base de datos cristalográfica PDF-2 (ICDD®), comparando los picos del diagrama con los del mineral de interés en la base de datos del programa, teniendo en cuenta que la determinación de minerales de suelos usando este procedimiento no es preciso por debajo de un 5% del peso total de una muestra. Ocasionalmente también se han usado los datos recogidos en las fichas informatizadas del JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard 1980).

A partir de los difractogramas interpretados se ha llevado a cabo una estimación semicuantitativa de la composición de la composición mineralógica de las muestras por DRX utilizando el mismo software X Powder (Martin, 2004).

### Microscopía Electrónica de Barrido

La muestra se colocó sobre una superficie adhesiva y se metalizó con carbón. El microscopio electrónico de barrido se utilizó para comparar las morfologías de las sales que forman la muestra estudiada.

Se utilizó un microscopio electrónico de scanning JEOL 6100, equipado con analizador EDX, Link Isis Oxford, con detector Si-Li y trabajando a 39 mm de altura y 20 kV.

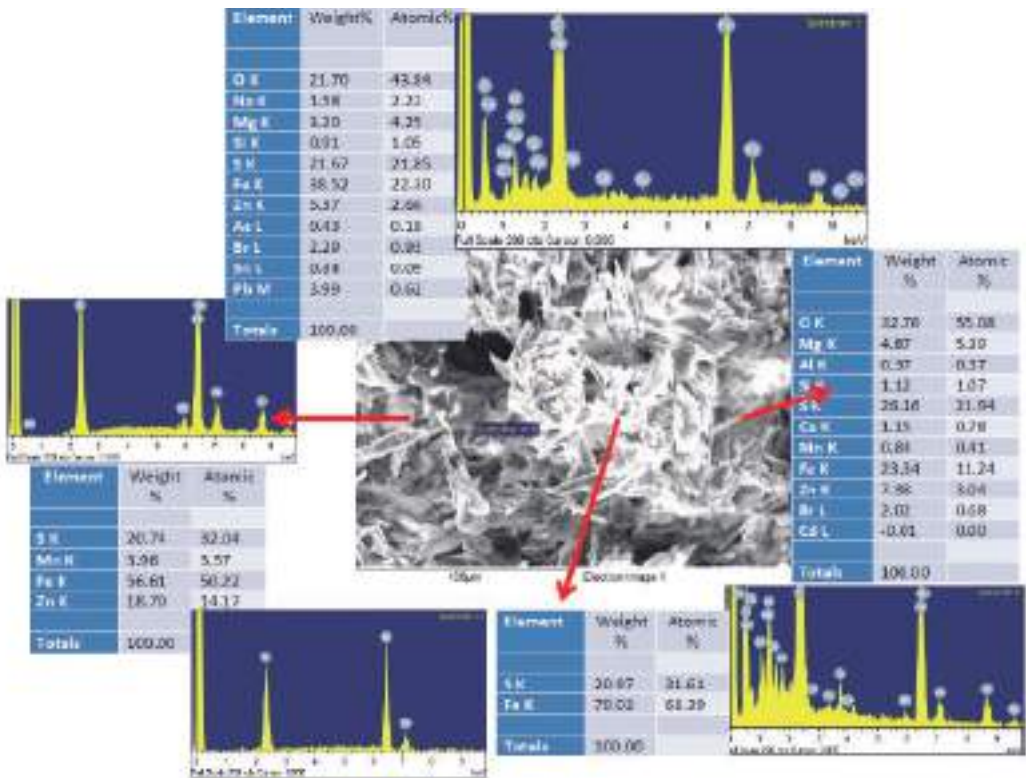


Figura 7. Resultados de Microscopía electrónica de barrido (SEM) y sonda de energía dispersiva de rayos X (EDX) Eflorescencia 2

## Resultados y discusión

### Caracterización geoquímica y mineralógica de las eflorescencias.

En los trabajos realizado por García Lorenzo, *et al.*, (2014, 2018); Hernández Pérez, (2017); Martínez López, (2015); Martínez Sánchez, *et al.*, (2008); Pérez Sirvent, *et al.*, (2014, 2016, 2017b); se estudió la relevancia ambiental de las eflorescencias, la capa superior del suelo y las aguas superficiales de la zona minera abandonada de la Sierra de Cartagena-La Unión. Los resultados concluyen elevadas concentraciones de As, Cd, Cu, Fe, Pb y Zn en todas las muestras.

En la zona mineralizada las etapas finales del proceso de alteración supergénica conducen a un gran número de sulfatos con diferente grado de hidratación, que aparecen como eflorescencias salinas y que pueden retener metales liberados durante el proceso de oxidación (Hernández Pérez, 2014). En este trabajo se analizaron 6 muestras de eflorescencias. Las eflorescencias muestran un contenido elevado en metales pesados y elementos traza como el arsénico. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

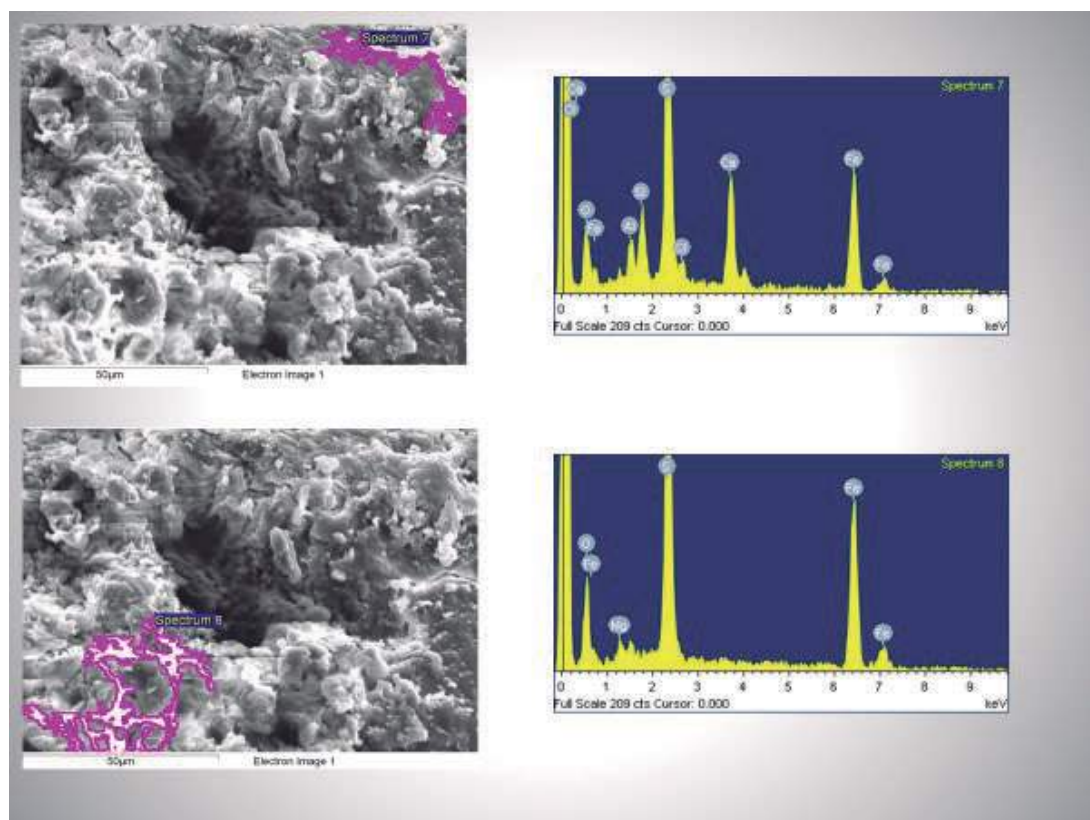


Figura 8. Resultados de Microscopía electrónica de barrido (SEM) y sonda de energía dispersiva de rayos X (EDX) Eflorescencia 3.

### *Caracterización mineralógica de las Eflorescencias.*

Las eflorescencias estudiadas presentan una composición mineralógica muy variada (Tabla 2), dominando la presencia de copiaditas y de sulfatos de Fe y Mg. Las muestras 5 y 6 no son exactamente eflorescencias solubles ya que tienen jarositas, micas y minerales secundarios heredados de la roca madre.

Se realizó un estudio de detalle con Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y sonda de energía dispersiva de rayos X (EDX). Los resultados obtenidos de este estudio se muestran resumidos en la figura 7 (Eflorescencia 2) y figura 8 (Eflorescencia 3). Los resultados de SEM para la eflorescencia estudiada, mostraron fibras y crecimientos complejos e irregulares de copiapita, junto a formas más esferoidales y simétricas de alunógeno. Se han identificado morfologías diferentes que corresponden a composiciones estequiométricas semejantes a dietrichita y paracoquimbita. El porcentaje de amorfos es alto, lo que confirma la gran alteración de estos elementos. También se incluye un barrido general de la muestra.

## Conclusiones

- Las eflorescencias tienen una capacidad superior para generar riesgo que los sedimentos, pese a tener contenidos inferiores de ETPs.
- Los materiales que se han formado en el proceso de alteración supergénica, sulfatos no solubles (anglesita, jarosita, alunita, etc.), óxidos y oxihidróxidos y, minerales de la arcilla como caolinita y clorita, son transportados a la vez que las formas solubles. Además, se incorporan a esta fase materiales que no han sufrido alteración, como fragmentos de la roca inalterada, minerales resistentes de ésta y sulfuros.
- La DRX y la microscopía electrónica constituyen herramientas fundamentales para el estudio y diagnóstico de las eflorescencias.

## Referencias

- Arana Castillo, R., López Aguayo, F. (1992). *Las etapas finales de la alteración supergénica de sulfuros*. ISBN 84-00-07263-4, 1277-1305
- Benedicto Albadalejo, J, Marín-Guirao, L., Guerrero Pérez, J. (2009). *El Mar Menor. Estado actual del conocimiento científico. Capítulo: XI; Contaminación por metales y compuestos órgano-estánicos en el Mar Menor*. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua. 1ª Edición, 540 p.
- Brantley, S., White, T.S., White, A.F., Sparks, D., Richter, D., Pregitzer, K., Derry, L., Chorover, J., Chadwick, O., April, R., Anderson, S., Amundson, R. (2006). *Frontiers in Exploration of the Critical Zone*. Report of a workshop sponsored by the National Science Foundation (NSF). Newark, DE, 30 p.
- Chorover, J., Mueller, K.T., O'Day, P., Jeff Serne, R., (2006). *Caustic Waste-Soil Weathering Reactions and Their Impacts on Trace Contaminant Migration and Sequestration*. Univ. of Arizona, Tucson, AZ (United States).
- Galán Huertos, E., (2003). Contaminación Por Metales Pesados en Suelos y Sedimentos. Pag. 93-96. En: *Curso "Ciencia y Tecnología de Arcillas"*. Ciudad Real. Universidad Castilla la Mancha.
- García-Lorenzo, M.L., Martínez-Sánchez, M.J., Pérez-Sirvent, C., Agudo, I., Recio, C. (2014). Isotope geochemistry of waters affected by mining activities in Sierra Minera and Portman Bay (SE, Spain). *Applied Geochemistry*, 51, 139-147.
- García-Lorenzo, M. L., Perez-Sirvent, C., Martinez-Sanchez, M. J., Bech, J. (2015). Geochemical study of stream waters affected by mining activities in the SE Spain. In: *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 14613).
- García-Lorenzo, M.L., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M.J., Molina-Ruiz, J., Martínez, S., Arroyo, X., Martínez-Martínez, L.B., Bech, J. (2018). Potential bioavailability assessment and distribution of heavy metal(oids) in cores from Portman Bay (SE, Spain). *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 19 (2): 193–200. <https://doi.org/10.1144/geochem2018-054>
- García-Rizo, C., Martínez-Sánchez, M.J. and Pérez-Sirvent, C. (1999). Environmental transfer of zinc in calcareous soils in zones near old mining sites with semi-aridic climate. *Chemosphere*, 39, 2, 209-227.
- Hernández Pérez, C. (2014). Evaluación de riesgos planteados por eflorescencias supergénicas en la minería polimetálica. TFM.
- Hernández Pérez, C. (2017). *Trazabilidad de elementos potencialmente peligrosos en humedales con influencia minera*. Tesis Doctoral.
- López García, J. A. (1992). Alteración supergénica de yacimientos de sulfuros. En: *Recursos Minerales de España*. Eds. García Guinea, J., Martínez Frías, J. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. 1448 pp.
- Manteca, J. I., Ovejero, G. (1992). Los yacimientos de Zn, Pb, Ag-Fe del distrito minero La Unión-Cartagena. En: *Recursos Minerales de España*. Eds. García Guinea, J. y Martínez Frías, J. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. 1448 pp.

- Martín, D. (2004). Qualitative, Quantitative and Microtextural Powder X-ray Diffraction Analysis. Disponible en: <http://www.xpowder.com/>. (accedido el: 3 de abril de 2014).
- Martínez López, S. (2010). *El Arsénico en suelos con influencia minera en ambientes semiáridos*. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- Martínez López, S. (2015). *Técnicas de estudio en la transferencia de Arsénico del suelo a la población y al ecosistema. Innovación en la gestión e Investigación Ambiental*. Ed. Salvadora Martínez López. ISBN:978-84-16296-15-6.
- Martínez López, S. (2019). *Estudio del estado del arte de las investigaciones, estudios, publicaciones y líneas de investigación iniciadas de las diferentes administraciones, universidades y otros organismos científicos sobre las explotaciones mineras de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión y sus efectos en el Mar Menor*. Informe Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (inédito).
- Martínez López, S., Martínez Sánchez, M.J., Gómez Martínez, M.C., Pérez Sirvent, C. (2020). Arsenic zoning in a coastal area of the Mediterranean Sea as a base for management and recovery of areas contaminated by old mining activities. *Applied Clay Science*, 199, 105881.
- Martínez Sánchez, M.J., Navarro, M.C., Pérez-Sirvent, C., Marimón, J., Vidal, J., García-Lorenzo, M.L., Bech, J. (2008). Assessment of the mobility of metals in a mining-impacted coastal area (Spain, Western Mediterranean). *Journal of Geochemical Exploration*, 96(2-3), 171-182.
- Pérez Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M.J., García-Lorenzo, M.L., Hernández-Córdoba, M., Molina, J., Martínez, S., González, E., Pérez Espinosa, V. (2014). A Preliminary Zonation to Support the Remediation and the Risk Assessment of an Area Contaminated by Potentially Toxic Elements in Murcia Region (SE, Spain). *Procedia Earth and Planetary Science*, 10, 388-391.
- Pérez Sirvent, C., Hernández Pérez, C., Martínez Sánchez, M.J., García Lorenzo, M.L., Bech, J. (2016). Geochemical characterisation of surface waters, topsoils and efflorescences in a historic metal-mining area in Spain. *Journal of Soils and Sediments*, 16:1238-1252.
- Pérez Sirvent, C., García-Lorenzo, M.L., Hernández-Pérez, C., Martínez-Sánchez, M.J. (2017b). Assessment of potentially toxic element contamination in soils from Portman Bay (SE, Spain). *Journal of Soils and Sediments* 18(6), 2248-2258.
- Sastre, J., Sahuquillo, A., Vidal, M., Rauret. (2002). Determination of Cd, Cu, Pb and Zn in environmental samples: microwave-assisted total digestion versus aqua regia and nitric acid extraction. *Analytica Chimica Acta*, 462: 59-72.



## Caracterización de pátinas de color sobre espeleotemas en la Cueva de Don Juan (Jalance, Valencia)

Andrea MOLERO MONSONÍS <sup>(1,2)</sup>, María Belén MUÑOZ GARCÍA <sup>(1)</sup>,  
Javier MARTÍN CHIVELET <sup>(1,2)</sup>, María Jesús TURRERO JIMÉNEZ <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. C/ José Antonio Novais 12, 28040 Madrid. [anmolero@ucm.es](mailto:anmolero@ucm.es), [mbmunoz@geo.ucm.es](mailto:mbmunoz@geo.ucm.es), [j.m.chivelet@geo.ucm.es](mailto:j.m.chivelet@geo.ucm.es)

<sup>(2)</sup> Instituto de Geociencias (UCM-CSIC), C/ Severo Ochoa 7, Ciudad Universitaria, 28040. Madrid.

<sup>(3)</sup> Unidad de Hidrogeociencias Ambientales, Dpto. de Medioambiente, CIEMAT, Av. Complutense 40, 28040 Madrid. [mj.turrero@ciemat.es](mailto:mj.turrero@ciemat.es)

---

### Resumen

Los espeleotemas pueden presentar distintas coloraciones superficiales atribuibles a una notable diversidad de procesos fisicoquímicos, biológicos y/o humanos. Entender estos procesos, a veces muy complejos, es clave no solo para caracterizar la geodiversidad en cada cueva, sino también para ayudar en su protección y gestión. Pese a la relevancia de estas pátinas, existen pocos estudios de detalle encaminados a su caracterización. En este trabajo se estudian las pátinas de color desarrolladas sobre algunos espeleotemas de la Cueva de Don Juan (Jalance, Valencia), una cavidad desarrollada sobre brechas carbonáticas neógenas en la que estamos desarrollando un proyecto más amplio de investigación geoambiental y paleoclimática. Se trata de una cueva turística con un número de visitas moderado y muy estacional. Presenta notable valor patrimonial por su excepcional ornamentación de espeleotemas y por la existencia de grabados prehistóricos. En la cavidad diferenciamos 3 zonas microclimáticas: una con influencia del exterior que presenta goteo estacional, y dos zonas más aisladas del exterior, una caracterizada por una humedad relativa más baja y la ausencia de goteo (zona seca) y otra (zona húmeda) que presenta goteo durante todo el año. En cada una de estas zonas se pueden observar distintos tipos de pátinas con coloraciones diferentes: negro, negro-rojizo, gris y blanquecino. Se han estudiado estas pátinas con microscopía de luz transmitida, microscopía de fluorescencia, microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X y espectroscopía infrarroja. Se identifican en las pátinas proporciones variables de calcita, hidroxiapatito, materia orgánica, arcillas, yeso, óxidos de hierro y restos de microorganismos. La presencia de fosfatos y yeso en la mayoría de las pátinas sugiere un origen relacionado con guano de murciélagos. Los resultados parecen indicar que ninguna de las pátinas estudiadas tiene relación directa con las actividades humanas, tanto pasadas como actuales.

**Palabras clave:** costras, estalagmitas, guano, microorganismos, paleoclima.

## **Characterisation of speleothem-coloured patinas in Cueva de Don Juan (Jalance, Valencia)**

### **Abstract**

*Cave speleothems can present different surficial colorations that can be attributable to different physicochemical, biological and/or human processes. Understanding these processes which sometimes can be very complex is key not just to characterise the cave geodiversity but also for helping to protect the cave and implementing management plans. We characterise surficial coloured patinas developed over speleothems from Cueva de Don Juan (Jalance, Valencia), a cave developed in a Neogene carbonate breccia unit. Don Juan Cave receives a moderate number of tourists seasonally distributed along the year. It also presents high patrimonial value because of its ornamented speleothems and prehistoric engravings. Inside the cavity we differentiate 3 microclimatic zones: an area with external influence and seasonal dripping, and two zones that are more isolated from the exterior, one of them (dry zone) presents low values of relative humidity and no dripping, while the other one (humid zone) presents permanent dripping throughout the year. In each area, different patinas are observed, which are characterised by their colour: black, reddish-black, grey and whitish. These patinas have been studied under transmitted light and fluorescence microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffraction and infrared spectroscopy. The results obtained allow us to identify variable amounts of calcite, hydroxyapatite, organic matter, clays, gypsum, iron oxides, and microorganisms. The presence of phosphates and gypsum in most of the patinas suggests an origin related to bat guano. These results seem to indicate that none of the patinas is directly related with human activities, either past or present.*

**Keywords:** *crust, guano, microorganisms, paleoclimate, stalagmite.*

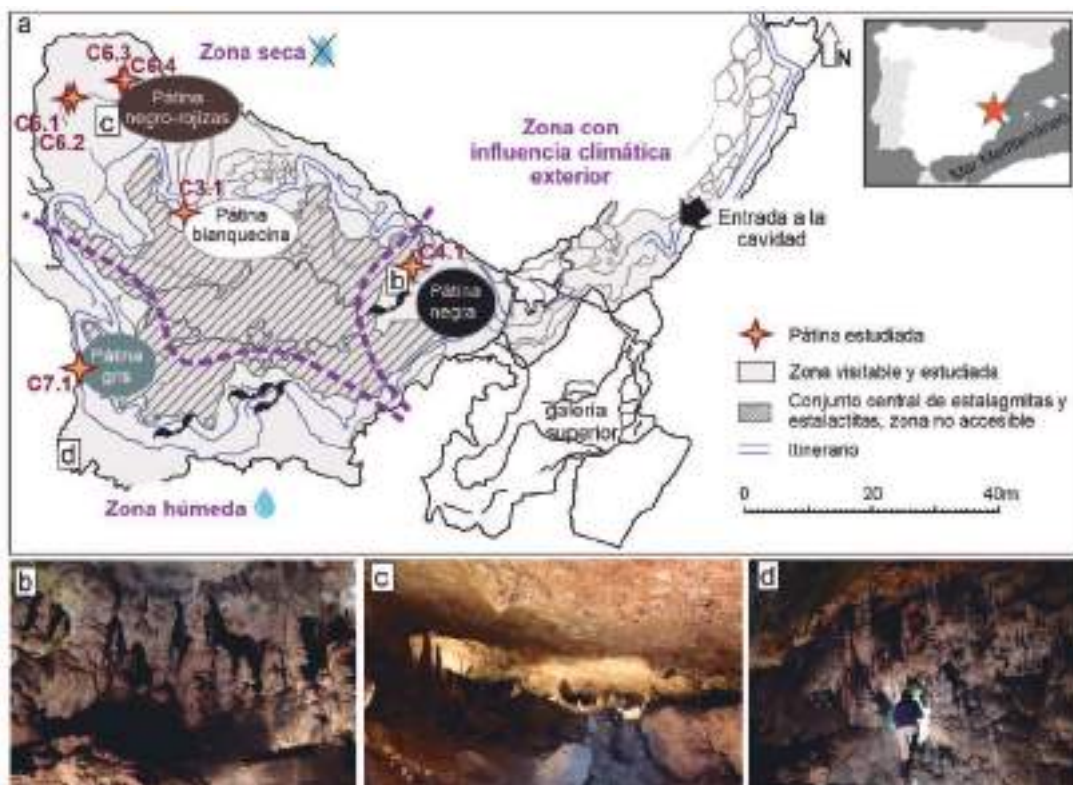
## **Introducción**

Los espeleotemas son uno de los principales atractivos turísticos de las cuevas kársticas. En algunas ocasiones aparecen recubiertos por pátinas de distintos colores que pueden restarles brillo y belleza, lo que puede suponer un problema para su explotación turística. El origen de estas coloraciones puede ser muy diverso: precipitados minerales inducidos por las condiciones ambientales (Hill y Forti, 1997), materia orgánica (Audra *et al.*, 2021), presencia de microorganismos fotosintéticos o no (Lavioe *et al.*, 2010; Carmichael y Bräuer, 2015) o inducidos por la actividad humana de diversas maneras (Del Rosal Padial, 2016; Cuezva *et al.*, 2015). En la Cueva de Don Juan se observan pátinas de distintos colores recubriendo algunos espeleotemas. Se sabe muy poco sobre estos recubrimientos, por lo que el objetivo de este trabajo es caracterizar las pátinas más comunes y discutir su origen.

La cueva se localiza en el municipio de Jalance, en el interior de la provincia de Valencia. Se trata de una cueva desarrollada sobre un abanico aluvial neógeno (Santisteban *et*



al., 2016) formado por brechas carbonáticas con abundante matriz rica en carbonato, filossilicatos, cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa. La cueva se abrió al turismo en los años 80, en la actualidad presenta un régimen de visitas moderado y asociado a los periodos vacacionales. Los estudios microclimáticos nos han permitido diferenciar 3 zonas en el interior de la cueva (figura 1a). La primera presenta influencia del exterior (figura 1a,b), tiene una gran variabilidad térmica estacional en el área más cercana a la entrada de la cavidad (entre 12-23 °C) y que se reduce notablemente en la parte más alejada de la entrada. Esta zona presenta goteo estacional en algunas fracturas asociado a las precipitaciones exteriores. La segunda y tercera presentan escasa variabilidad térmica en torno a 14,5 °C. La segunda es más seca, no presenta goteo en ninguna época del año y la humedad relativa es baja (figura 1a,c). Por último, en la parte más aislada de la cueva, la tercera zona es húmeda (HR ~ 99%) (figura 1a,d) con goteo todo el año. El CO<sub>2</sub> presenta variaciones anuales entre los 400 y 600 ppm en todas las zonas de la cueva.



## Materiales y métodos

En este trabajo se han diferenciado cuatro tipos de pátinas en función de su color y aspecto de visu en el interior de la Cueva de Don Juan (figura 1a). Se han denominado: negra, negro-rojiza, gris y blanquecina. Para caracterizar estos cuatro tipos de pátina, se han escogido 7 muestras en total (figura 1a). La pátina negra es abundante en las salas con presencia actual de murciélagos, especialmente en la zona con ligera influencia del exterior. Hemos escogido una muestra de esta zona (C4.1; figura 1). Las pátinas negro-rojizas y la blanquecina se encuentran en la zona seca y presentan más variabilidad, por lo que hemos escogido varias muestras para su caracterización: C6.1 a C6.4 para las negro-rojizas y muestra C3.1 para la blanquecina (figura 1). Por último, la pátina gris es más abundante en la zona húmeda (muestra C7.1; figura 1).

Se ha definido el color real de las muestras con la "Rock-Color Chart with genuine Munsell color chips" (The Rock Color Chart Committee, 1995) y se ha estudiado su composición y textura con diferentes técnicas. La microscopía de luz transmitida, reflejada y de fluorescencia se realizó con un microscopio Nikon Eclipse E400 POL, en el último caso con un sistema de epi-fluorescencia Y-FL con filtro UV 2A incorporado (lámpara de mercurio de muy alta presión Nikon C-SHG1, 100W). Las láminas delgadas se realizaron con las muestras previamente embutidas en resina, a 400µm de espesor y pulidas. La Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) se realizó sobre láminas delgadas y fracturas frescas con recubrimiento de oro en un microscopio con detector de energía dispersiva (SEM-EDX) JEOL JSM 820. El estudio mineralógico se llevó a cabo con una combinación de difracción de rayos X (método polvo en un difractómetro Bruker D8 Advance y análisis semicuantitativo según Chung (1975) con software EVA de Bruker) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (espectrómetro Thermo Nicolet Nexus, en el rango espectral de 400-4000 cm<sup>-1</sup>).

## Resultados

**Pátina negra.** La pátina negra es muy común en distintos puntos de la cueva. Suele aparecer asociada a zonas con presencia actual de murciélagos. Es una pátina discontinua que recubre las superficies horizontales de estalagmitas y coladas pero no las paredes verticales. La muestra C4.1 se recoge de la zona con ligera influencia del exterior, en una sala con grabados del Paleolítico Superior (García-Patón *et al.*, 2012). Presenta un color "olive grey 5Y 4/1" aunque en superficie se aprecian unos agregados minerales de colores amarillentos y blanquecinos (figura 2b). Su espesor es menor de un milímetro y presenta una estructura laminada típica de las biopelículas. Sólo la mitad más superficial es de color oscuro (figura 2c,d). La variación de colores se puede relacionar con cambios composicionales de las sucesivas láminas (fosfato y arcillas) aunque no se ha encontrado una correspondencia clara entre la composición mineral y los colores naturales y de fluorescencia (figura 2e). En superficie presenta múltiples microorganismos filamentosos de tamaños y morfologías variables sobre un agregado mineral de hidroxapatito y filosilicatos (figura 2f). Los resultados combinados de SEM-EDX, DRX y espectroscopía

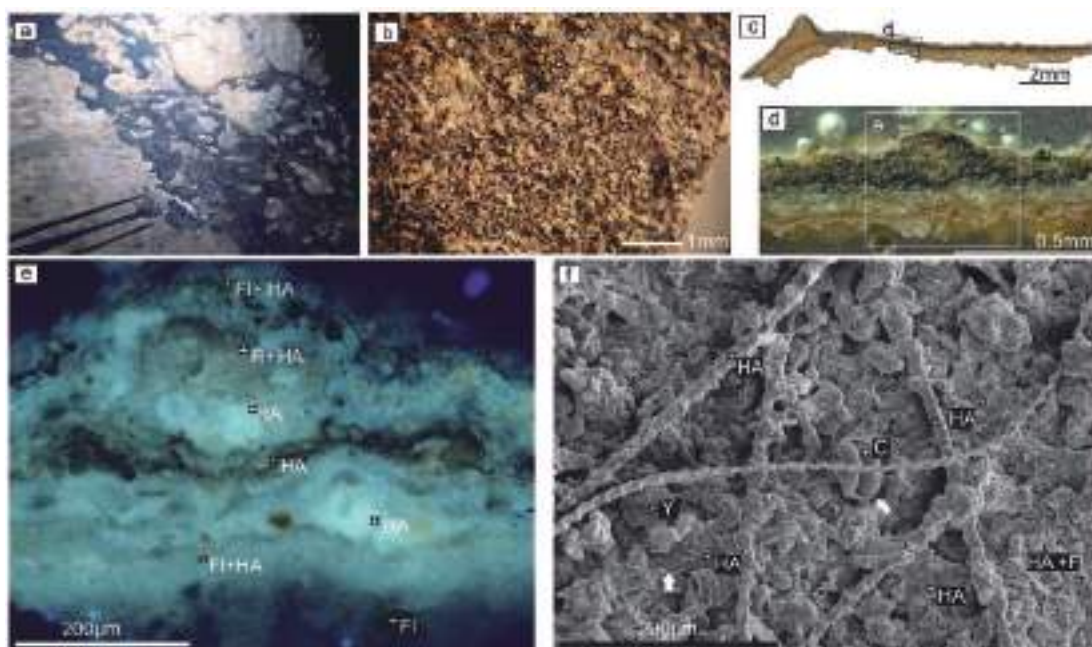


Figura 2. Pátina negra, muestra C4.1. a) Aspecto general de la pátina en el interior de la cueva. Se observa la punta de unas pinzas como escala. b) Agregados minerales de colores claros en la superficie de la muestra. c y d) Corte de la pátina desvelando una estructura laminada típica de una biopelícula. e) Análisis de EDX superpuestos a la imagen obtenida en el microscopio de fluorescencia para la misma lámina delgada de las figuras c) y d). Se puede observar que las variaciones composicionales no guardan una relación clara con el color de las láminas. f) Textura general de la superficie de la pátina-biopelícula. Se observan varios filamentos de distintos tamaños y morfologías sobre un sustrato de hidroxiapatito, filossilicatos y cristales limpios de yesos. FI: filossilicatos, HA: hidroxiapatito, Y: yeso, C: carbono.

infrarroja han permitido identificar además cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, calcita, yeso, nitratos, materia orgánica y algún óxido de hierro.

**Pátina blanquecina.** Este tipo de pátina clara recubre algunos de los espeleotemas y coladas en la zona seca. Presenta un aspecto blanquecino y pulverulento (figura 3a). En concreto, la muestra C3.1 presenta un color superficial "very light gray N8" sobre una base marrón anaranjada "moderate yellowish brown 10YR 5/4" (figura 3a,b). El color marrón de la pátina se concentra en la parte más superficial de la muestra y su espesor es de pocas micras (figura 3c). El microscopio electrónico permite definir la pátina como un agregado de unas 500  $\mu\text{m}$  de espesor de calcita y arcillas con algo de hidroxiapatito en la parte más superficial (figura 3d,e). En menor cantidad aparece algo de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, óxidos de manganeso, hematites y yeso. Aunque son muy poco comunes, también se ha podido encontrar algún microorganismo filamentosos con alto contenido en carbono.

**Pátinas negro-rojizas.** La mayoría de los espeleotemas de la zona seca presentan recubrimientos de colores negro-rojizos con un aspecto pulverulento similar al de la pátina blanquecina (figura 4a,b). Dado que esta pátina presenta más variabilidad, se han

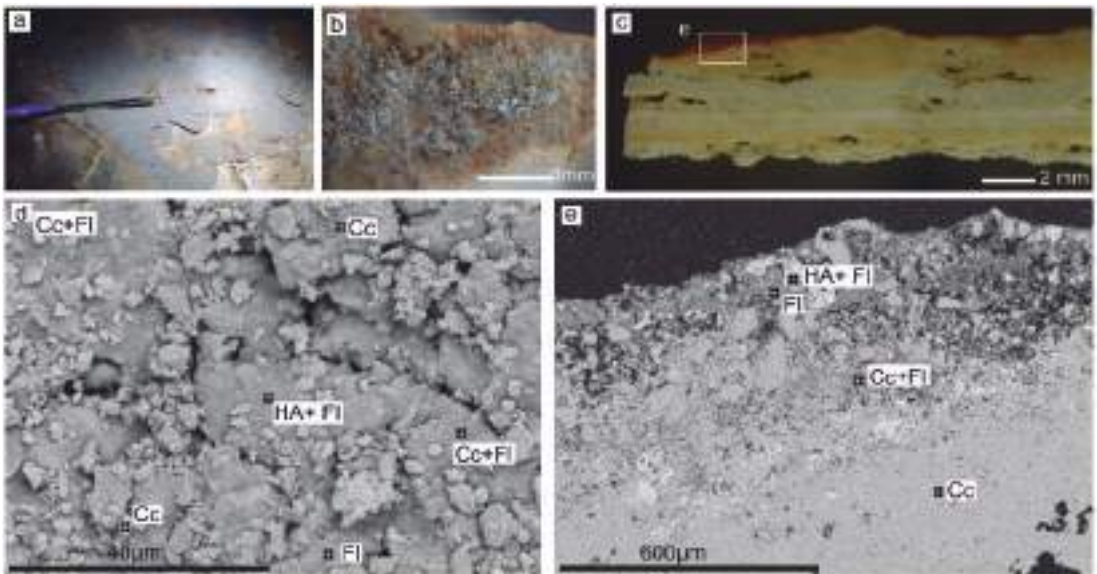


Figura 3. Pátina blanquecina, muestra C3.1. a) Aspecto de la pátina blanquecina en el interior de la cueva. b) Aspecto pulverulento de la superficie de la pátina blanquecina sobre una base de color marrón-anaranjado. c) El corte transversal de la pátina blanquecina desvela el escaso grosor de la zona coloreada. d) Aspecto general de la superficie de la muestra. Se observan unos agregados de calcita sobre una base de aspecto más homogéneo que corresponde a una mezcla de calcita, filosilicatos e hidroxiapatito. e) Corte transversal de la pátina blanquecina. Corresponde a una masa de aspecto granular con calcita, filosilicatos e hidroxiapatito restringido a la zona más superficial. Cc: calcita, HA: hidroxiapatito, Fl: filosilicatos.

estudiado 4 muestras. Las muestras C6.1 y C6.2 proceden de la superficie de la misma estalagmita (figura 4a) y se describirán conjuntamente. Las muestras C6.3 y C6.4 proceden de trozos de espeleotemas caídos en un gour seco.

**Muestra C6.1 y C6.2.** La superficie de esta pátina presenta un color “dark yellowish brown 10YR 4/2” y una textura granulada (figura 4b). Esta pátina es fina, presenta un espesor menor de 0,5 mm y una estructura interna laminada, típica de una biopelícula, en la que sólo la parte superior es oscura (figura 4c). La superficie de la pátina contiene un entramado de filamentos sobre una base de aspecto homogéneo que contiene hidroxiapatito como constituyente principal junto con filosilicato (figura 4d). La combinación de SEM-EDX, DRX y espectroscopía infrarroja han permitido identificar además cuarzo, feldespato potásico (figura 4e), plagioclasa, calcita, nitratos, yeso y algún óxido de hierro (figura 4f). Se caracteriza por presentar abundantes restos de microorganismos variados (figura 4e,g,h).

**Muestra C6.3.** Esta muestra corresponde a un fragmento de bandera recubierto por una pátina pulverulenta de color negro-rojizo (figura 5a,b) que, igual que las muestras C6.1 y C6.2, corresponde a “dark yellowish brown 10YR 4/2”. Esta pátina no contiene laminación interna sino que presenta una estructura vertical y discontinua que penetra hacia el centro del espeleotema siguiendo un frente de corrosión sobre la calcita transparente,

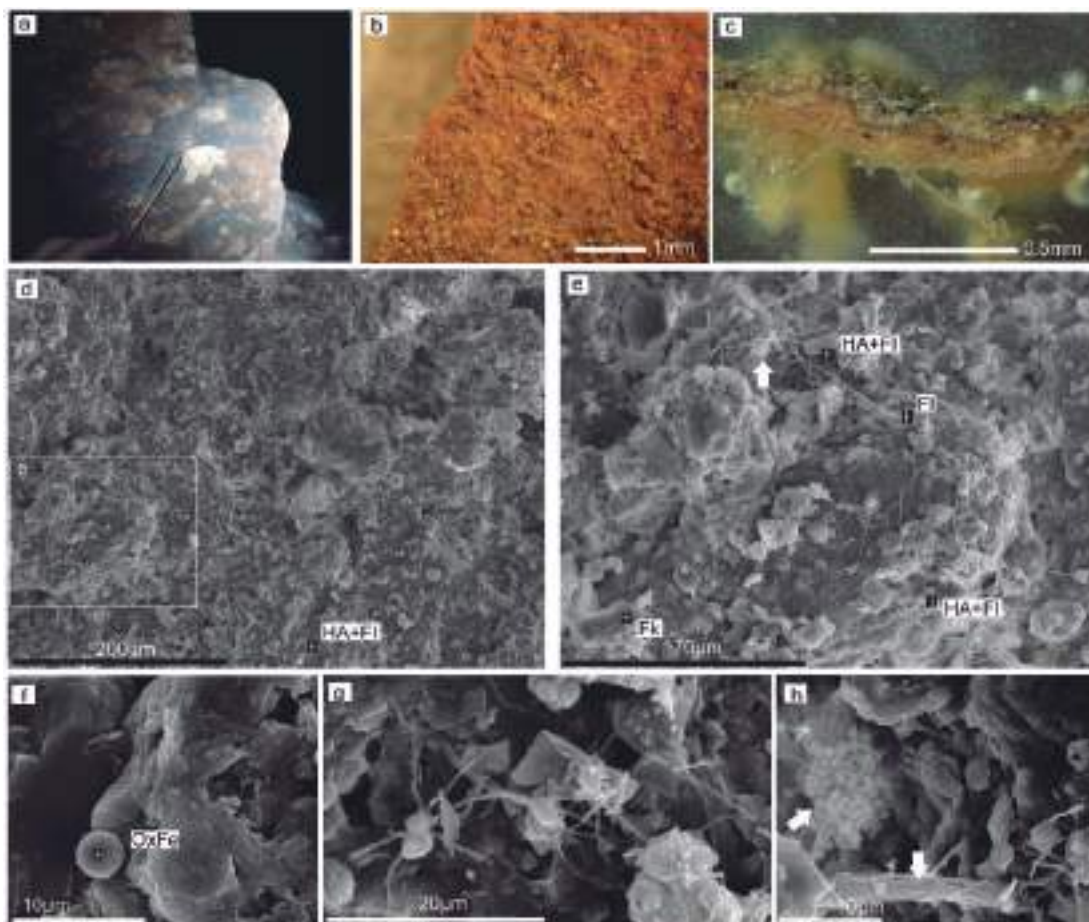


Figura 4. a) Pátina negro-rojiza sobre una estalagmita de la zona seca (Muestras C6.1 y C6.2). b) Textura granulada de la superficie de la pátina. c) Corte de la pátina desvelando una estructura laminada típica de una biopelícula con el color oscuro concentrado en la zona superficial. d) Vista en superficie de las muestras C6.1 y C6.2. Se puede apreciar un aspecto granulado sobre un agregado mineral homogéneo de hidroxiapatito y filosilicatos. e) Aspecto de detalle de la superficie de la pátina-biopelícula con abundantes filamentos y sustancias poliméricas extracelulares mineralizadas (hidroxiapatito, filosilicatos, feldespato potásico). f) Microesfera de óxido de hierro. g) Probables actinobacterias. h) Posibles mixomicetos y otros organismos. HA: hidroxiapatito, Fl: filosilicatos, Fk: feldespato potásico, OxFe: óxido de hierro

especialmente en los espacios intercrystalinos (figura 5c,d,e). La corrosión es evidente en la superficie de la muestra (figura 5d,e), que está recubierta por una mezcla de filosilicatos y calcita. Los microorganismos no tienen una amplia distribución en esta pátina pero sí se han encontrado estructuras de resistencia a la sequía (probables quistes de protistas) en la superficie de los cristales y en algunos espacios intercrystalinos (figura 5e,f). La calcita es mayoritaria y está acompañada por filosilicatos que, junto con trazas de magnetita, podrían explicar el color de esta pátina (figura 5d). Los análisis mineralógicos indican que esta muestra también contiene cuarzo, plagioclasa, aragonito, feldespato potásico, hidroxiapatito, dolomita y posibles trazas de yeso. Los minerales fosfáticos quedan

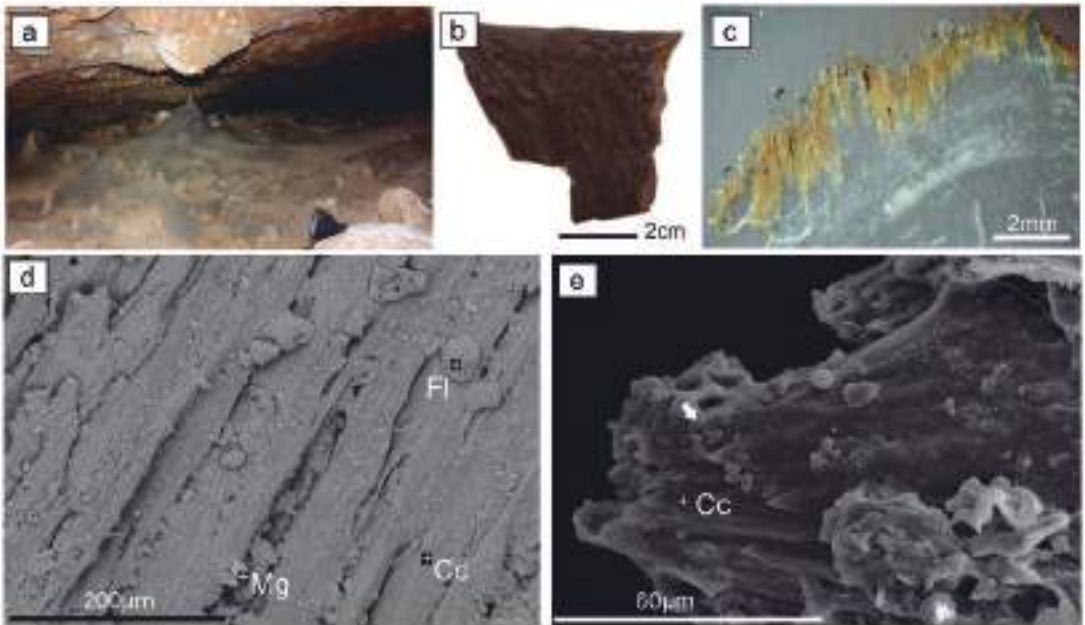


Figura 5. a) Espeleotemas de la zona seca con recubrimientos de colores negro-rojizos, b) Muestra C6.3. Fragmento de espeleotema caído en un antiguo gour de la zona derecha de la Fig. 5a. c) Estructura interna de la pátina de esta muestra. Se aprecia una capa discontinua de color amarillento recubriendo calcita transparente con signos de corrosión. d, e) Aspecto general de la superficie de la pátina. Los agregados de filossilicatos y algunos óxidos de hierro se apoyan sobre una base calcítica con signos de corrosión. En algunos lugares (e) se pueden ver estructuras de resistencia a la sequía marcados con una flecha, probablemente quistes de protistas con distinta ornamentación. Cc: calcita, Mg: magnetita, Fl: filossilicatos.

restringidos a las zonas más internas de esta muestra, rellenando espacios intercrystalinos y poros agrandados por corrosión.

**Muestra C6.4** Esta muestra corresponde a un fragmento de espeleotema (figura 6a) procedente de la misma zona que C6.3 (figura 5a). Presenta un pátina negro-rojiza similar a las anteriores en muestra de mano aunque en detalle se pueden diferenciar dos tonalidades: una más rojiza, "light brown 5YR 5/6" y otra más oscura, "dark yellowish brown 10YR4/2" (figura 6a). Esta base oscura está cubierta además por unos agregados amarillentos (figura 6b). La pátina es discontinua en corte transversal y parece rellenar especialmente los espacios intercrystalinos y la superficie corroída de la estalactita calcítica (figura 6c), aunque el contacto con la calcita transparente es muy neto (figura 6d). La pátina está compuesta por un agregado de cristales de calcita y filossilicatos. Los resultados mineralógicos indican que esta pátina también contiene cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, goetita y posibles trazas de yeso. Aunque los microorganismos son poco comunes en esta pátina, en algunos puntos es posible encontrar filamentos (figura 6e) y probables esporas de actinobacterias (figura 6f).

**Pátina gris.** Esta pátina es muy característica de la zona húmeda. La muestra C7.1 es un espeleotema de tipo coraloide que presenta un color externo gris definido como "medium

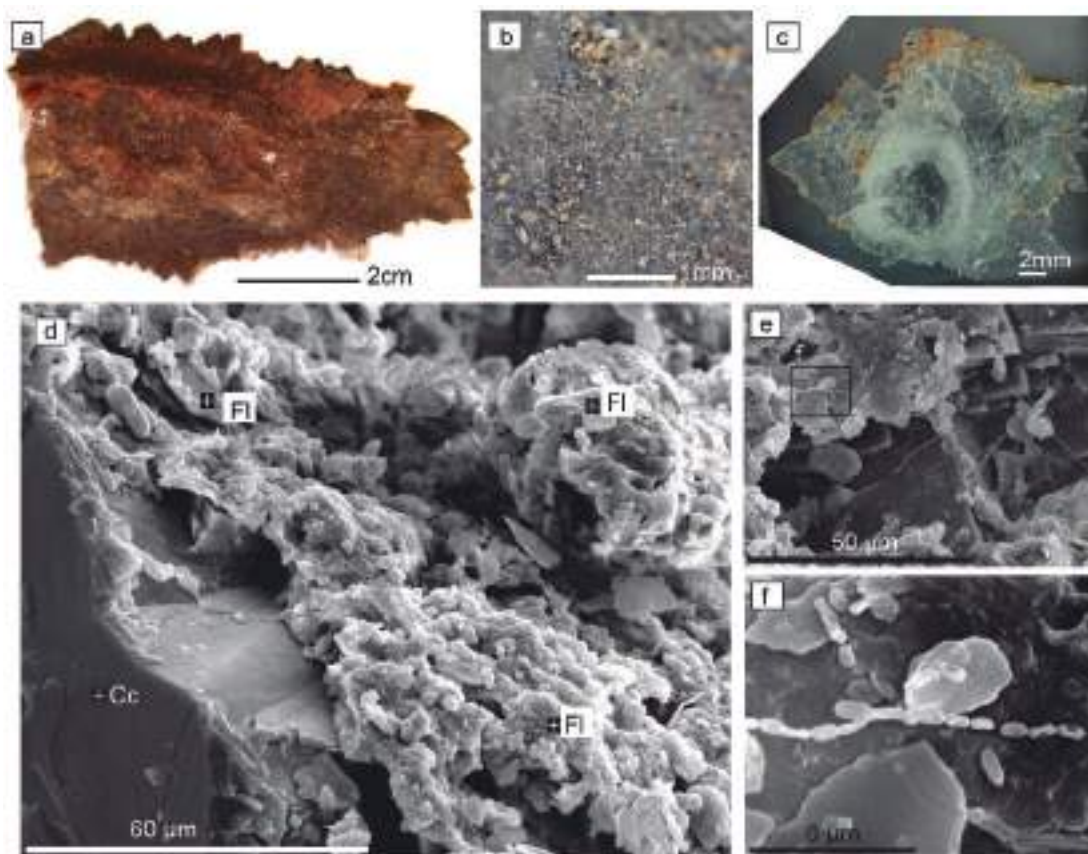


Figura 6. a) Muestra C6.4. Espeleotema recubierto por una pátina con tonos rojizos. b) En el microscopio de luz reflejada se observa una base más oscura con agregados amarillentos y blancos por encima, c) Estructura discontinua de la pátina rojiza sobre el espeleotema. d) Contacto neto entre la calcita transparente del espeleotema y el agregado de arcillas de la pátina. e) Microorganismos filamentosos sobre los cristales de calcita. f) Probables esporas de actinobacterias. Cc: calcita y Fl: filosilicatos.

light gray N6" y que está cubierto por una capa discontinua y no homogénea de color blanco "very ligh gray N8" (figura 7b). El corte transversal del espeleotema revela una sucesión de varios milímetros de capas de calcita blanca y transparente sobre una base amarillenta que incluye arcillas junto al carbonato (figura 7c). La pátina gris corresponde sólo a la superficie. Los distintos análisis mineralógicos indican que la superficie de la pátina es mayoritariamente de calcita, y que aparecen en menor proporción plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, aragonito, hidroxiapatito y óxidos de hierro (figura 7d,e). Los microorganismos filamentosos son muy escasos.

## Discusión y conclusiones

En este trabajo se han descrito 4 pátinas diferentes según su color y aspecto en la cueva: negra, negro-rojiza, blanquecina y gris. A pesar de sus diferencias de visu, comparten

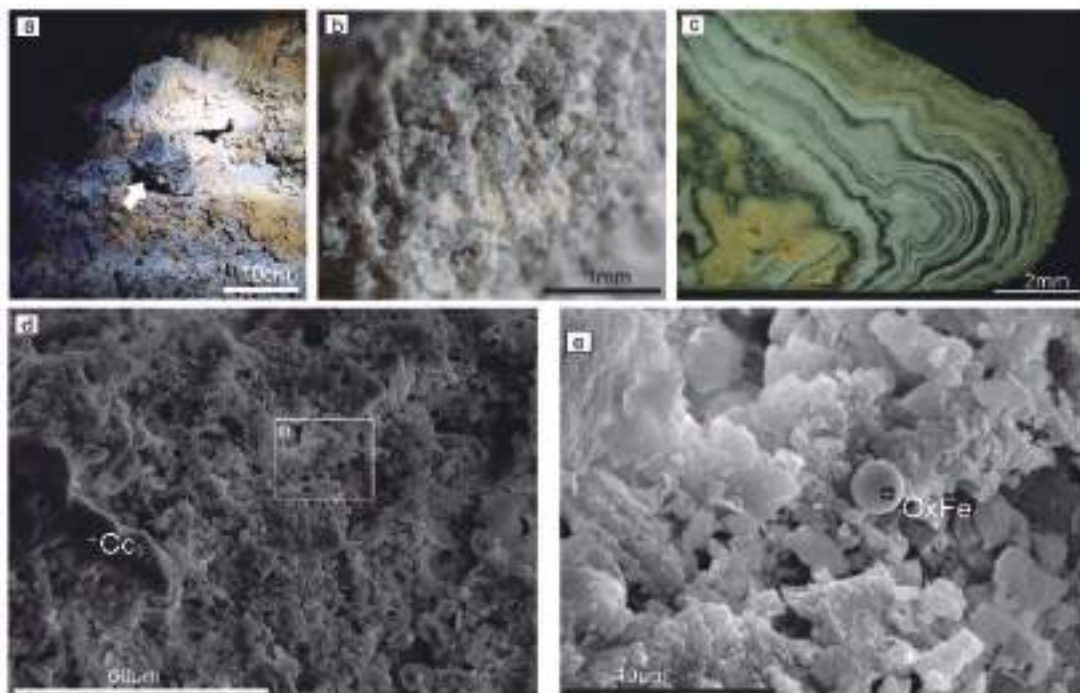


Figura 7. a) Espeleotemas coraloideos recubiertos de la pátina gris en la zona húmeda. La flecha blanca señala la muestra C7.1. b) Superficie de la muestra gris con un agregado más claro relleno los poros. c) Estructura interna laminada del espeleotema coraloide de calcita. El color gris de la pátina corresponde sólo a la capa más externa y no se ve en corte. d) Aspecto general y textura de la superficie calcítica de la pátina en el SEM. Se observa un agregado de minerales caótico con algún óxido de hierro (e) sobre cristales de calcita. e) Detalle de d) con microesfera de óxidos de hierro. Cc: calcita, OxFe: óxido de hierro.

algunas características mineralógicas: la presencia de hidroxiapatito en todas las muestras sugiere que su origen esté relacionado con la presencia de guano de murciélago (Hill y Forti, 1997). Otros indicios que apoyan este origen son los nitratos y los abundantes microorganismos asociados a materia orgánica que aparecen en las muestras más oscuras. Por sus características mineralógicas y texturales las pátinas estudiadas se podrían clasificar en tres tipos (figura 8):

1. Las ricas en hidroxiapatito (pátina negra y negro-rojizas C6.1 y C6.2) que contienen también abundantes filosilicatos y en menor proporción nitratos y yeso junto con abundantes microorganismos filamentosos. Todos estos minerales suelen aparecer en las primeras etapas de mineralización del guano (Audra *et al.*, 2019, 2021). Su mayor concentración en la pátina negra sugiere, según los modelos de estos autores, que esta pátina sea más reciente y esté más próxima a la fuente de guano que las negro-rojizas C6.1 y C6.2, como de hecho ocurre en la actualidad en el interior de la cueva. Todas estas muestras corresponden a biopelículas bien desarrolladas.
2. Las pátinas ricas en calcita, como la gris, que incluye además algo de aragonito, hidroxiapatito y óxidos de hierro. De nuevo la presencia de trazas de hidroxiapatito





Figura 8. Esquema de las pátinas de color estudiadas en la Cueva de Don Juan según la distancia a la fuente de guano y su composición mineral.

y posiblemente de yeso sugieren una relación genética lejana con las pátinas oscuras a pesar de encontrarse esta pátina en la zona húmeda, alejada de la fuente actual de guano.

- Las pátinas que corresponden a una mezcla de las anteriores (pátina blanquecina y negro-rojizas C6.3 y C6.4 desarrolladas sobre espeleotemas rotos y caídos en un gour). Estas muestras no se parecen visualmente. Sin embargo, las tres muestras estudiadas están formadas principalmente por calcita y filossilicatos con cantidades variables de hidroxiapatita, yeso y óxidos de hierro, que sugieren un estado intermedio entre los tipos anteriores. Esto podría deberse a una distancia intermedia a los murciélagos, a mayor tiempo de evolución desde el depósito del guano o a una evolución diferente dado que todas estas muestras se encuentran en la zona más seca de la cueva. En cualquier caso, la mineralogía y textura de las pátinas parece indicar que ninguna de ellas tiene relación directa con las actividades humanas, tanto pasadas como actuales y que todas guardan una relación con la presencia de murciélagos en la cueva, si bien la situación respecto de la fuente principal de guano, el tiempo transcurrido desde su acumulación y el microclima de la zona de la cueva determinarían las proporciones finales de cada mineral (figura 8; Audra *et al.*, 2019 y 2021).

Un hecho curioso es que casi todos los minerales que constituyen las pátinas estudiadas son de color claro. Las concentraciones de hematitas y otros óxidos de hierro junto con la presencia de filossilicatos son probablemente el origen de los colores rojizos pero no hemos encontrado ningún mineral que pueda justificar los colores tan oscuros de algunas pátinas. Estos colores deben tener su origen en las variaciones en el contenido en guano y materia orgánica puesto que las muestras oscuras son, además, las que presentan mayor abundancia de microorganismos y estructura de biopelícula. Excepcionalmente se encontró en el SEM un pequeño grano de óxido de manganeso en la pátina blanquecina, sin embargo, no se han encontrado más trazas de óxidos de manganeso ni carbonilla en el resto de muestras por lo que se descartan estos orígenes para los colores oscuros.

Este estudio sirve para constatar que las pátinas de color de la Cueva de Don Juan constituyen una parte más del patrimonio de la cueva. Contienen la mayor variedad

mineralógica de la cavidad, registran parte de su historia, y constituyen un registro y almacén de microorganismos extremófilos que suelen ser, en la mayor parte de las cuevas, desconocidos aún para la ciencia.

## Agradecimientos

Contribución a los proyectos CGL2017-83287-R y PID2021-122854OB-100 (Ministerio de Ciencia e Innovación) y al Grupo UCM-910198 (CLIMSED). Nuestro agradecimiento a los doctores Policarp Garay y Rafael Martínez Valle, de la Generalitat Valenciana, y al Exmo. Ayuntamiento de Jalance, por los permisos y su colaboración en el trabajo. Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento a Juan Carlos Salamanca, Xabier Arroyo y Francisco Coruña (Fac. de CC. Geológicas - UCM) por su apoyo técnico y a la profesora Blanca Pérez Uz (Fac. de CC. Biológicas - UCM), por sus comentarios sobre los microorganismos.

## Referencias

- Audra, P., Heresanu, V., Barriquand, L., Boutchich, M.E.K., Jailliet, S., Pons-Branchu, E., Bosák, P., Cheng, H., Edwards, R. L., Renda, M. (2021). Bat guano minerals and mineralization processes in Chameau cave, Eastern Morocco. *International Journal of Speleology*, 50(1), 91-109. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.50.1.2374>.
- Audra, P., Waele, J. De, Bentaleb, I., Chroňáková, A., Křišťůfek, V., Ilenia, M.D., Carbone, C., Madonia, G., Vattano, M., Scopelliti, G., Cailhol, D., Vanara, N., Temovski, M., Bigot, J.Y., Nobécourt, J.C., Galli, E., Rull, F., Sanz-Arranz, A. (2019). Guano-related phosphate-rich minerals in European caves. *International Journal of Speleology*, 48(1), 75-105. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.48.1.2252>.
- Cuezva, S., Jurado, V., Fernández-Cortés, A., García-Antón, A., Rogerio-Candelera, M.A., Ariño, X., Benavente, D., Cañaveras, J.C., Saiz-Jimenez, C., Sanchez-Moral, S. (2015). Scientific Data Suggest Altamira Cave Should Remain Closed. In: A. Summers Engel (Eds), *Microbial life of Cave Systems. Life in Extreme Environments*, 3: 303-317.
- Del Rosal-Pardial, Y., Roldán-Molina, M., Hernández-Marine, M. (2014). Biofilms fotosintéticos en la Cueva de Nerja: *Chroococcidiopsis* sp. En: J.M Calaforra y J.J. Durán (Eds.), *CUEVATUR 2014, I Congreso Iberoamericano y V congreso español sobre Cuevas Turísticas, Iberoamérica Subterránea*, pp 463-472.
- García-Patón, J., Navarro-Navarro, A., Piera Poveda, A. I., Martínez Valle, R., Gabarda Vicente, M. (2012). Investigaciones arqueológicas en la cueva de Don Juan (Jalance, Valencia). En: J. J. Durán y P.A. Robledo (Eds.), *Las cuevas turísticas como activos económicos: conservación e innovación*, pp 77-86.
- Hill, C.A., Forti, P. (1997). Cave minerals of the world. *National Speleological Society*. Huntsville, Alabama, USA. 439 pp.
- Lavoie, K.H., Northup, D.E., Barton, H.A. (2019). Microbial interactions; Geomicrobiology in caves: A review. In: S.K. Jain, A.A. Kahn and M.K. Rai (Eds) *Geomicrobiology. Science Publisher, USA*. pp. 1-46
- Rossi, C., Lozano, R.P. (2016). Hydrochemical controls on aragonite versus calcite precipitation in cave dripwaters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 192: 70-96. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.07.021>.
- Santisteban, C., Vicente, R., Díaz, E., Fernández Portal, J.M., Garay, P., Martínez, J., Paz, A., Valls, A., Vidal, V., Zalve, E. (2016). La cueva de Don Juan (Jalance, Valencia): historia geológica de un karst singular. En: *Geología 16, Sociedad Geológica de España (ed.)*. Valencia. 8 pp.
- Sarah, K. C., Bräuer, S.L. (2015). Microbial Diversity and Manganese Cycling: A review of Manganese-oxidizing Microbial Cave Communities. In: A. Summers Engel (Eds), *Microbial life of Cave Systems. Life in Extreme Environments*, 3: 137-152.
- The Rock Color Chart Committee (1995). Rock-Color Chart with genuine Munsell® color chips. *The Geological Society of America (Eds)*. 8th printing, 1995.

# El estudio geológico de la Cueva del Estrecho (Villares del Saz, Cuenca): una contribución para la puesta en valor del turismo subterráneo

Raquel MORALES GARCÍA <sup>(1)</sup>, Juan José DURÁN VALSERO <sup>(1)</sup>,  
Sergio Raúl DURÁN LAFORET <sup>(2)</sup>, Pedro Agustín ROBLEDO ARDILA <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Calle Ríos Rosas, 23. 28003, Madrid.  
r.morales@igme.es; jj.duran@igme.es

<sup>(2)</sup> Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA), Edificio de Investigación Ada Byron,  
Arquitecto Francisco Peñalosa, 18. 29010, Málaga. sduran@uma.es

<sup>(3)</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Administración Periférica del Estado, Carrer de Felicià  
Fuster, 7. 07006, Palma de Mallorca. pa.robledo@igme.es

---

## Resumen

La Cueva del Estrecho, situada junto a la transitada autovía Madrid-Valencia, al noroeste de la localidad conquense de Villares del Saz, forma parte de un sistema de cavidades kársticas desarrolladas sobre las calizas cretácicas del anticlinal de la Sierra del Torreón. Se presenta en este trabajo el estudio geológico llevado a cabo en el conjunto de cavidades de la cueva del Estrecho, la cueva de la Moneda, la cueva de las Palomas y la cueva del Camino. Se ha realizado un reconocimiento geológico en el interior de las cavidades, así como diversos recorridos exteriores de campo que han permitido establecer el contexto geológico regional y la historia geológica singular que explica la génesis de las cuevas. En ella han intervenido diversos factores espeleogenéticos, que se evidencian principalmente a través de los cortes geomorfológicos perpendiculares y longitudinales del interior de las galerías de las cuevas. La evolución del nivel freático de las aguas subterráneas es el condicionante principal de una arquitectura en forma de red espeleológica laberíntica que se estructura en varios niveles. Los trabajos realizados ponen de manifiesto que las cuevas, además de presentar notables restos arqueológicos (en el caso de la cueva del Estrecho), poseen un elevado valor patrimonial desde otros puntos de vista (geológico, geomorfológico, hidrogeológico, mineralógico), y que los estudios geológicos en particular contribuyen a la puesta en valor de estos lugares de interés geológico, fomentando de este modo el turismo subterráneo y el desarrollo económico de la región. En esta línea, para incrementar el potencial turístico, la Diputación Provincial de Cuenca, en colaboración con el Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), han elaborado una ruta geológica divulgativa de la zona, que explica la formación del sistema de cavidades kársticas del Estrecho de Villares del Saz, así como su historia geológica.

**Palabras clave:** estudios geológicos, divulgación, lugares de interés geológico, turismo subterráneo, valores patrimoniales

## ***The geological study of the Cueva del Estrecho (Villares del Saz, Cuenca): a contribution to the enhancement of cave tourism***

### **Abstract**

*The Cueva del Estrecho, located next to the busy Madrid-Valencia motorway to the northwest of the Cuenca town of Villares del Saz, is part of a system of karstic cavities developed on the Cretaceous limestone of the Sierra del Torreón anticline. This communication presents the geological study carried out in all the cavities of: the Cueva del Estrecho, the Cueva de la Moneda, the Cueva de las Palomas and the Cueva de la Carretera. A geological reconnaissance has been carried out inside the cavities, as well as various outside field trips that have made it possible to establish the regional geological context and the unique geological history that explains the genesis of the caves. Speleogenetic factors have intervened in it, which are evidenced mainly through the perpendicular and longitudinal geomorphological profiles of the cave galleries. The evolution of the groundwater table is the main conditioning factor of an architecture of a labyrinthic speleological network that is structured on several levels. The work carried out shows that the caves, in addition to presenting notable archaeological remains (in the case of the Cueva del Estrecho), have a high heritage value from other points of view (geological, geomorphological, hydrogeological, mineralogical), and that the geological studies in particular contribute to the enhancement of these places of geological interest, thus promoting underground tourism and the economic development of the region. In this line, to increase the tourist potential, the Diputación Provincial de Cuenca, in collaboration with the Geological and Mining Institute of Spain (IGME-CSIC), have developed a geological informative route of the area, which explains the formation of the system of cavities karstics of the Strait of Villares del Saz, as well as its geological history.*

**Keywords:** *geological studies, outreach, heritage values, geosites, show caves*

## **Introducción**

Uno de los principales problemas del territorio español es la progresiva despoblación que se está sufriendo en el interior. Se buscan alternativas a la España vaciada tanto desde el punto de vista económico como social y cultural. Los principales actores y sufridores de este reto demográfico son los municipios, en los que en tres de cada cuatro se pierde población en la última década (MITECO, 2020).

Para reactivar la economía, local los pueblos miran a su alrededor buscando en los recursos naturales, en su Patrimonio Natural, ese impulso que les permita salir adelante. Villares del Saz representa un ejemplo singular de esta realidad. Con una población inferior a 500 habitantes, este municipio conquense pugna por vencer el despoblamiento y prosperar.



*Figura 1. Entrada de la cueva del Estrecho, en el camino de acceso junto a la Autovía del Este-A3.*

En su empeño, apuesta por utilizar los recursos naturales y culturales existentes en su municipio, entre ellos ciertas cavidades, y fomentar así el turismo subterráneo.

Para ello cuenta con el sistema de cavidades kársticas de la sierra del Torreón, al NW de la población, donde se desarrolla la cueva del Estrecho, la mayor y más conocida. El conjunto está constituido por cuatro cavidades singulares (Cueva del Estrecho, que es la principal, Cueva de las Monedas, Cueva de las Palomas y Cueva del Camino o de la Carretera), formadas por la circulación de las aguas subterráneas por el interior de los materiales carbonáticos cretácicos del anticlinal de la sierra del Torreón, plegamiento secundario asociado a la estructura principal de carácter regional, el sinclinal de Villares del Saz. Su entrada se localiza en el paraje de la "Cañada del Estrecho", en un angosto desfiladero en calizas, de escarpadas y abruptas paredes.

Aunque las cuevas eran conocidas desde hace tiempo, las voladuras de las obras realizadas en los años 90 del siglo XX en la Autovía del Este (A-3), dejaron al descubierto una amplia boca de la cueva del Estrecho, que hasta ese momento se encontraba colmatada de sedimentos, permitiendo así el paso libre al interior. En esos primeros momentos, con un ingreso incontrolado de curiosos y visitantes, se destruyeron, alteraron y expoliaron parte de los importantes restos arqueológicos que la cavidad conservaba en su interior, así como su patrimonio geológico.

La cueva del Estrecho, además de presentar notables restos arqueológicos, presenta un alto valor patrimonial desde otros puntos de vista como son el geológico, el geomorfológico y el hidrogeológico, que se presentan a continuación y que contribuyen de forma importante a la puesta en valor de este entorno rural.

## Estudios geológicos realizados

Para caracterizar de manera adecuada los aspectos geológicos del sistema kárstico del Estrecho, se han realizado estudios geológicos centrados en tres aspectos básicos, la caracterización geológica regional, la geomorfología endokárstica y la hidrogeología.

### *Cartografía e interpretación geológica y estructural*

En su contexto regional, las cuevas de Villares del Saz se localizan en la Comarca Alta de la Llanura manchega, aunque la región cuenta en su entorno con diversos elementos geológicos que destacan geográficamente sobre esta planicie. Desde el punto de vista geológico-estructural, pertenece a la terminación oriental del dominio de la Sierra de Altomira, que se refleja en la orografía de la zona por sendos pliegues (ITGE, 1998b): el anticlinal de Zafra de Zancara (al norte) y el sinclinal de Villares del Saz con su anticlinal asociado, el anticlinal de la sierra del Torreón (al sur), formados por materiales carbonatados de la serie jurásica y cretácica (figura 2).

En detalle, el conjunto de cuevas kársticas del Estrecho se localiza en el extremo septentrional del anticlinal de la Sierra del Torreón y se han formado por procesos de disolución y precipitación que han actuado en el tiempo sobre las dolomías y calizas de la serie del Cretácico superior, quedando como resultado las cavidades distribuidas a distintas alturas, de acuerdo con el esquema conceptual mostrado en la figura 3.

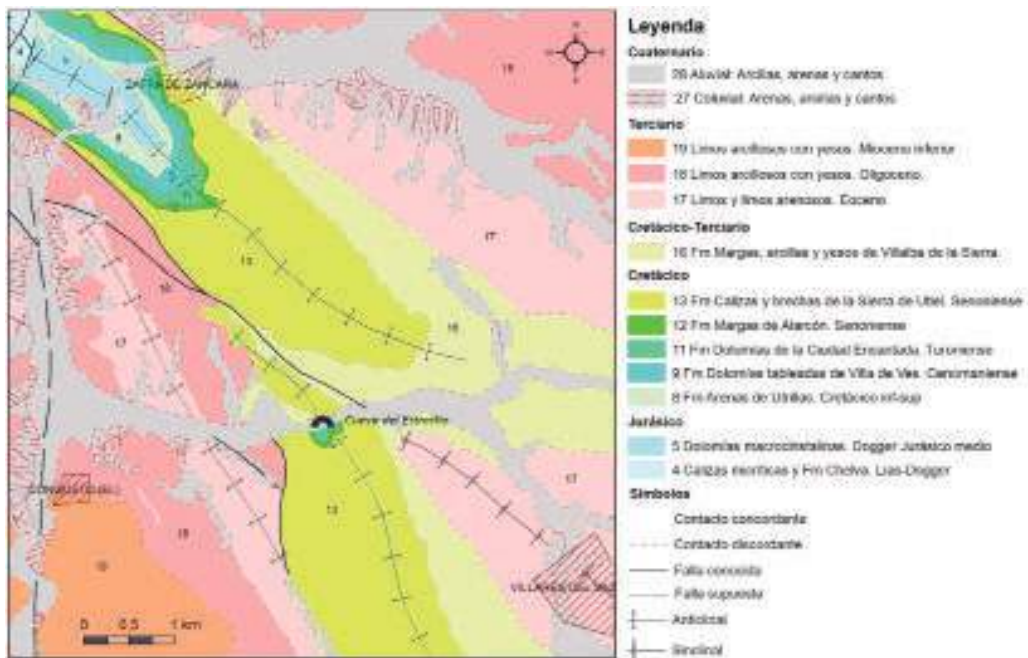


Figura 2. Mapa geológico del entorno de la cueva del Estrecho, modificado de las hojas geológicas 633 y 634 del Instituto Geológico y Minero de España (ITGE a y b, 1998).

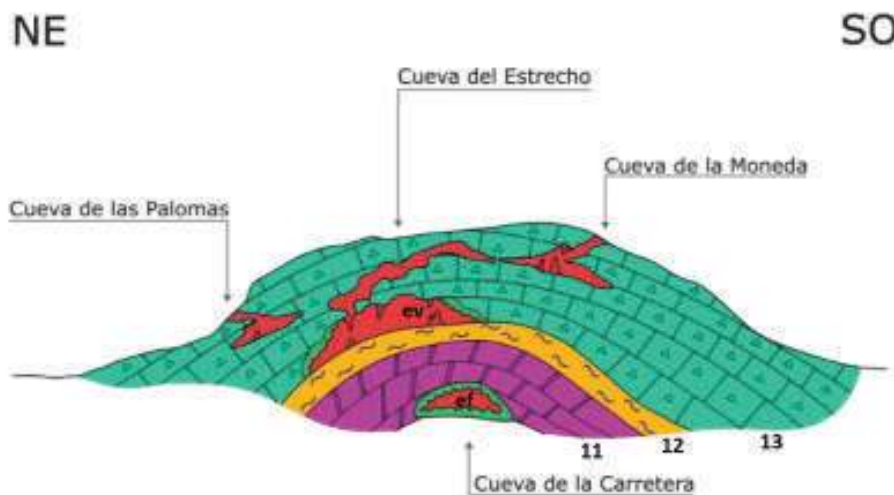


Figura 3: Esquema genético conceptual sin escala del conjunto de las cuevas del Estrecho. Leyenda: 11. Formación Dolomías de la Ciudad Encantada, 12. Formación Margas de Alarcón. 13. Formación Calizas y Brechas de la Sierra de Utiel, todas las rocas son de edad Cretácico superior. ef. espeleotemas freáticos. ev. espeleotemas vadosos.

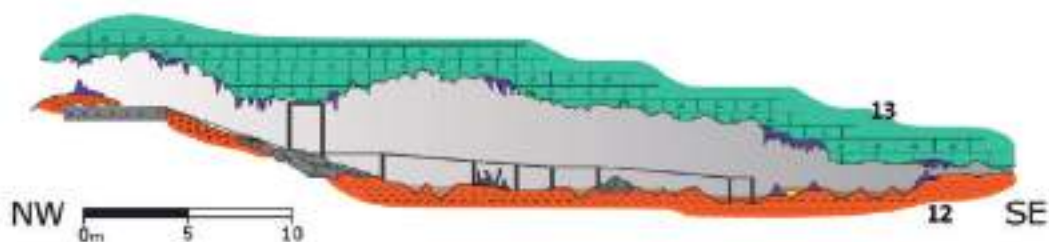


Figura 4. Corte longitudinal de la Sala de los Silos de la Cueva del Estrecho. Leyenda: 12. Formación Margas de Alarcón. 13. Formación Calizas y Brechas de la Sierra de Utiel, todas las rocas son de edad Cretácico superior. En morado se representan los distintos tipos de estalagmitas y estalagtitas, en gris los bloques caídos, rotos o transportados, en marrón y amarillo las cavidades con restos arqueológicos (cerámica y huesos). Elementos construidos en gris: losa de hormigón en la entrada habilitada a la cavidad y la pasarela que permite la visita turística al interior de la cavidad.

En esta, se observa que es en el núcleo del anticlinal, constituido principalmente por la Formación Dolomías de la Ciudad Encantada, donde se localiza la cueva más pequeña, la cueva del Camino (también llamada Cueva de la Carretera) recubierta por completo de espeleotemas de origen freático. En la secuencia litoestratigráfica superior, la Formación Calizas y brechas de la Sierra de Utiel, es donde se da el mayor desarrollo de las cavidades, encontrando en distintas posiciones altimétricas la cueva del Estrecho, con espeleotemas tanto freáticos como vadosos, y las cuevas de Las Palomas y La Moneda en posiciones más elevadas, donde predominan los espeleotemas de génesis vadosa.

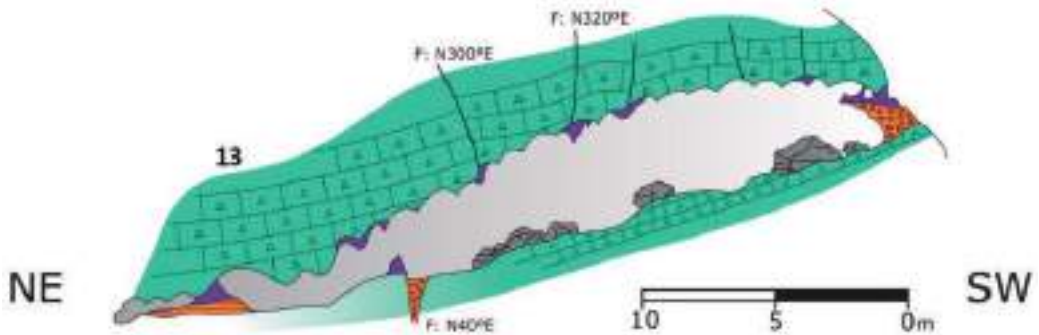


Figura 5. Corte transversal de la Cueva de la Moneda con indicación de las fracturas. Leyenda: 13. Formación Calizas y Brechas de la Sierra de Utiel de edad Cretácico superior. En morado se representan los distintos tipos de estalagmitas y estalagmitas, en gris los bloques caídos, rotos o transportados y en naranja rellenos sedimentarios.

Al estudiar los mapas topográficos disponibles de las cuevas, se observa que las galerías inferiores de la cueva de la Moneda y las galerías altas de cueva del Estrecho se encuentran muy cercanas, evidenciando que forman parte del mismo sistema.

### Cortes geomorfológicos en el interior de las cavidades

Para la caracterización geomorfológica del endokarst de la Sierra del Torreón, se han realizado una serie de cortes geomorfológicos en el interior de las cavidades, en distintas secciones de las mismas, tanto longitudinales (figura 4) como transversales (figura 5). Los cortes geomorfológicos se realizan sobre secciones topográficas previas, llevadas a cabo por los espeleólogos que han trabajado en la cueva con anterioridad, y constituyen una técnica de estudio avanzada que requiere conocimientos muy específicos, no sólo geológicos, sino también conocimientos y entrenamiento espeleológico.

En estos cortes, además de representar las litologías y la edad sobre las que se desarrollan las cuevas (roca caja), se identifican las morfologías erosivas (figura 6) y los depósitos de diverso tipo (espeleotemas, bloques de rocas, mineralizaciones o sedimentos detríticos);

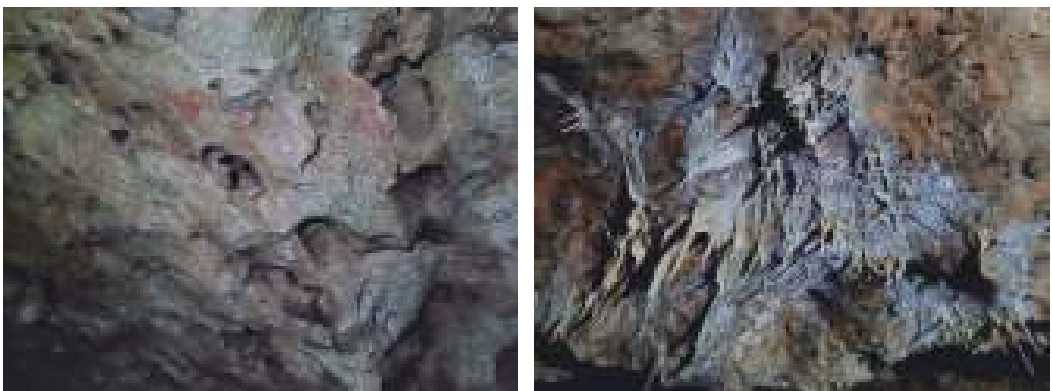


Figura 6. Formas de disolución (izda.) y de depósito (dcha.) en el techo la cueva del Estrecho.





*Figura 7. Espeleotemas vadosos en el techo de la Sala de los Silos de la Cueva del Estrecho.*

aspectos hidrogeológicos como goteos, niveles freáticos, lagos, gours o zonas húmedas; o elementos estructurales como fracturas, pliegues o desprendimientos.

La interpretación conjunta de todos los elementos identificados y representados en los distintos cortes permite establecer la secuencia de los eventos ocurridos y conectarlos con la historia geológica de la región y la consecuente evolución del sistema kárstico.

### *Hidrogeología y secuencia genética de espeleotemas*

Desde el punto de vista hidrogeológico, el sistema kárstico de la cueva del Estrecho se encuentra en la actualidad en un estado muy evolucionado, estando el nivel freático por debajo de la cota del suelo de todas las cuevas. No se observa superficie freática



*Figura 8. Espeleotemas freáticos en la Cueva del Camino.*

dentro de ninguna de las cavidades, quedando todas dentro de la Zona No Saturada (ZNS) del acuífero. Se trata de cuevas donde la circulación del agua subterránea se produce únicamente por infiltración del agua de lluvia desde la superficie dando lugar a una circulación en la ZNS del acuífero y produciendo actualmente espeleotemas de tipo vadoso (figura 7). La cueva del Camino es la única del sistema que no presenta en la actualidad actividad vadosa alguna pues se encuentra protegida por un nivel impermeable de margas que impide que lleguen las aguas por percolación de lluvia.

En el comienzo del proceso de karstificación, el nivel freático estaba alto en el acuífero y la disolución se producía en todo el espacio de la formación carbonática, dirigiéndose el flujo hidrogeológico general hacia el norte, con salidas naturales en surgencias asociadas a la incipiente red fluvial (en el frente de la Sierra del Torreón). En la actualidad, solo existen pequeñas fuentes a cota del río, prácticamente sin caudal. Los procesos de precipitación eran de tipo freático como se evidencian en la cueva del Camino (figura 8), que siempre estuvo sumergida, y en las galerías bajas de la cueva del Estrecho.

A medida que avanza la karstificación, se van formando y desarrollando cavidades a distintas alturas debido a que la red fluvial se va encajando en la red de fracturas y provoca el descenso paulatino del nivel de las aguas subterráneas del acuífero. De este modo, las cavidades superiores se van quedando en el aire y avanzando los procesos genéticos de tipo vadoso de arriba hacia abajo en la distribución de las cuevas, por eso coexisten en algunas galerías de la cueva del Estrecho los espeleotemas freáticos y vadosos, y prácticamente sólo se observan espelotemas vadosos en las salas superiores de la cueva del Estrecho, la cueva de la Moneda y las Palomas, y exclusivamente freáticos en la cueva del Camino.

## **Historia geológica de las cuevas y el entorno**

Hace unos 100 millones de años, durante el Cretácico superior, buena parte de la provincia de Cuenca se cubrió por las aguas de un mar somero. Siguieron 25 millones de años de ciclos sucesivos de elevación (transgresión) y bajada (regresión) del nivel del mar que dieron lugar a la formación de un importante paquete de rocas y sedimentos carbonáticos y margosos. A finales de este periodo (entre 86 y 73 millones de años antes de la actualidad), se depositaron los materiales de la formación denominada "Calizas y brechas de la Sierra de Utiel", en cuyo interior se desarrolla hoy en día el sistema de cavidades kársticas del Estrecho de Villares del Saz.

Con posterioridad a la retirada de los ambientes marinos y lacustres cenozoicos que sucedieron a los mares cretácicos, los empujes tectónicos derivados de la Orogenia Alpina fueron los responsables del plegamiento y fracturación de las potentes series sedimentarias Mesozoicas y Cenozoicas depositadas, dando lugar al conjunto de elevaciones de orientación Norte-Sur que constituyen el dominio estructural de la Sierra de Altomira y una serie de anticlinales subsidiarios.

Uno de los anticlinales menores de este conjunto es el anticlinal de la Sierra de Zafra que, en su extremo sureste, cerca de la localidad de Villares del Saz, presenta un repliegue de pequeño tamaño, el anticlinal de la Sierra del Torreón, donde afloran casi exclusivamente materiales de la formación de "Calizas y Brechas de la Sierra de Utiel", a excepción del pequeño afloramiento en el núcleo del pliegue, atravesado por la Autovía del Este.

Una vez que la arquitectura geológica del Anticlinal de la Sierra del Torreón estuvo preparada, los agentes geodinámicos externos (especialmente el agua) empezaron a formar las cuevas. Así comienza una primera fase de karstificación subterránea, cuya disolución fue dando origen a una red de cavidades en el extremo septentrional del anticlinal, hacia donde se dirigían las aguas subterráneas para alcanzar la superficie en los incipientes valles fluviales de la región.

El descenso del nivel de base de las aguas subterráneas, marcado por los cauces aluviales actuales (como el encajamiento del arroyo de la Fuente del Villar en la falla), contribuyeron al drenaje de los niveles superiores del acuífero, dando lugar a la presencia de una red espeleológica laberíntica estructurada en varios niveles.

Mucho más cercano al momento actual, la red espeleológica libre de las aguas subterráneas quedó al aire y los procesos de evolución geomecánica y de relleno comenzaron a actuar. De esta manera se originaron las sucesivas generaciones de espeleotemas (depósitos carbonáticos de precipitación química) y de sedimentos detríticos de origen clástico (grandes bloques autóctonos, o alóctonos, arenas y arcillas).

## Otros valores patrimoniales de la cueva

Las cuevas del Estrecho de Villares del Saz, por su ubicación, en la ladera del desfiladero del arroyo de la Fuente del Villar, constituyen un sitio de paso natural, histórico y estratégico. La



*Figura 9. Mandíbula y fragmento de cerámica en la cueva del Estrecho.*

importancia de este enclave ya desde la época prehistórica está refrendada por las evidencias arqueológicas aquí encontradas que presentan un amplio horizonte cronológico, si bien el período más relevante e importante de ocupación de estos yacimientos sería sobre todo durante el período Calcolítico y en la Edad del Bronce.

En el interior de la cueva del Estrecho destaca la Sala de los Silos, con una treintena de estructuras siliformes u hoyos excavados en el sedimento arcilloso que presentan multitud de fragmentos de cerámicas hechas a mano. En algunas partes de esta sala se encuentran vestigios de pinturas rupestres y manifestaciones pictóricas de arte esquemático. También se diferencian los Espacios Sepulcrales o espacios funerarios colectivos, con inhumaciones rituales que responden a una variada tipología de sepulturas tales como pithoi, cista, deposiciones de cadáveres o enterramientos secundarios (Bernárdez Gómez *et al.*, 2017).

## Acondicionamiento y puesta en valor de la cueva del Estrecho

El Ayuntamiento de Villares del Saz ha llevado a cabo unas primeras obras de acondicionamiento y restauración de la cueva del Estrecho que han consistido básicamente en la limpieza de la misma y, con asesoramiento arqueológico, la excavación de los yacimientos arqueológicos existentes, así como la exploración de las salas y galerías superiores y la construcción de la pasarela de acceso a la sala de los Silos (Guisado di Monti *et al.*, 2016), para la correcta



Figura 8.W Portada y primera página de la guía divulgativa de la cueva del Estrecho publicada por el IGME-CSIC y la Diputación Provincial de Cuenca.

observación y conservación de los elementos arqueológicos y naturales de la cueva con alto valor patrimonial. En este momento se encuentra en el último proceso de acondicionamiento final, previo a su apertura para su uso y disfrute turístico.

En este sentido, para incrementar el potencial turístico que con la apertura de la cueva se experimentará en la región y reforzar la divulgación científica de los conocimientos adquiridos durante los estudios geológicos que se han realizado en la cueva y que aportan mayor valor a la misma, la Diputación Provincial de Cuenca, en colaboración con el Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), han incluido esta cueva dentro de su Convenio de Colaboración realizando una ruta geológica divulgativa de la zona: Paseo Geológico por la Cueva del Estrecho y su entorno (figura 8), de reciente publicación (Durán Valsero *et al.*, 2022), que explica la génesis del sistema de cavidades kársticas del Estrecho de Villares del Saz, así como su historia geológica, un resumen de los valores patrimoniales del conjunto y del estudio geológico, geomorfológico e hidrogeológico realizado para su puesta en valor y explotación turística.

## Algunos resultados y conclusiones

El estudio geológico realizado, basado en la interpretación de la cartografía geológica y la realización de cortes geomorfológicos en el interior de las cavidades, ha aportado luz sobre la génesis del sistema de cuevas kársticas del Estrecho, mejorando su comprensión y añadiendo valor respecto a los tres pilares básicos que sirven para evaluar cuantitativamente (Carcavilla *et al.*, 2007) el patrimonio natural de una región:

- Valor didáctico: la elaboración de los cortes geomorfológicos mejora la comprensión de los elementos y procesos de la cueva, que pueden ser utilizados tanto en sesiones de la cueva como en colegios y visitas educativas.
- Valor científico: dentro de los estudios geológicos realizados, se han tomado muestras para el análisis mineralógico y la difracción de rayos X cuya interpretación contribuirá a avanzar en el conocimiento científico de los procesos genéticos que intervienen en los procesos de karstificación e hipogénesis, y a la alta divulgación científica.
- Valor recreativo: la mejor comprensión del origen y evolución de la cueva y la guía divulgativa elaborada aumentan el valor recreativo y uso turístico de la misma, fomentando el desarrollo rural de la región y el turismo de interior.

## Referencias

- Bernárdez Gómez, M.J., Guisado di Monti, J.C., Ripoll López, S., Latova Fernández-Luna, J. (2017). *Análisis territorial y funcional de los contextos ocupacionales en cueva de la Edad del Bronce en La Mancha conquense. Interrelación arte parietal en cavidades subterráneas y espacios rituales. Memoria. Proyectos de Investigación del Patrimonio Arqueológico y Paleontológico de Castilla-La Mancha para el año 2016* (D.O.C.M. n.o 172, de 2 de septiembre de 2016).
- Carcavilla, L., López Martínez, J. y Durán, J.J. (2007). Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos. *Serie Cuadernos del Museo Geominero*, 7. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 360 p.

- Durán Valsero, J.J, Morales García, R., Durán Laforet, S.R., Guisado, J.C. y Bernárdez, M.J. (2022). *Paseo geológico por la Cueva del Estrecho y su entorno. Cuevas hipogénicas y grandes pliegues*. Instituto Geológico y Minero de España (CSIC) y Diputación Provincial de Cuenca. 18 pp. ISBN: 978-84-00-10953-0.
- Guisado di Monti, J.C., Bernárdez Gómez, M.J. (2016). Cueva del Estrecho en Villares del Saz. Adaptación de la Cueva a Uso Turístico. En: Ruiz-Checa, J.M., Cristini, V., Coord, (Eds.), *Actuaciones sobre el Patrimonio Histórico y Medioambiental. Plan de Mejoras Turísticas, Provincia de Cuenca (Plamit 2011-2015)*. Diputación Provincial de Cuenca, pp. 59-61.
- ITGE. 1998 a. Mapa Geológico de España, escala 1:50.000, 2a Serie (MAGNA), Primera edición. *Hoja Geológica 633 Palomares del Campo*.
- ITGE. 1998 b. Mapa Geológico de España, escala 1:50.000, 2a Serie (MAGNA), Primera edición. *Hoja Geológica 634 San Lorenzo de la Parrilla*.
- MITECO. 2020. *El reto demográfico y la despoblación demográfica en España en cifras.28/06/22*, <https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2020/280220- despoblacion-en-cifras.pdf>

# Evolución espacio-temporal de los gases CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> y sus relaciones isotópicas (<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C) en la atmósfera de la Cueva de Nerja (Málaga, España)

Lucía OJEDA RODRÍGUEZ <sup>(1)</sup>, Iñaki VADILLO PÉREZ <sup>(1)</sup>, Cristina LIÑÁN BAENA <sup>(1,2)</sup>, José BENAVENTE HERRERA <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Dpto. Ecología y Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. 29071. Málaga. España. luciaor@uma.es, vadillo@uma.es

<sup>(2)</sup> Fundación Cueva de Nerja. Instituto de Investigación. Ctra. de Maro s/n. 29787, Nerja, Málaga. España. cbaena@cuevadenerja.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Geodinámica. Universidad de Granada. jbenaven@ugr.es

---

## Resumen

Desde finales de 2017, un equipo de espectroscopía laser con tecnología CRDS (*Cavity-Ring-Down Spectroscopy*) realiza la medida, en continuo, de las concentraciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y la relación isotópica <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C en las moléculas de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> presentes en el aire de la Cueva de Nerja (Málaga, España). Los puntos de muestreo se ubican en las salas de Cataclismo (puntos T1 y T2), Columnas de Hércules (T3) e Inmensidad (T4), localizándose los puntos T3 y T4 en la zona no habilitada para las visitas. El objetivo es caracterizar el origen de ambos gases y los procesos de ventilación entre los distintos subsistemas de la Cueva de Nerja, para establecer un modelo conceptual de funcionamiento que ayude a la gestión de la cavidad. El periodo de estudio analizado en este trabajo corresponde al año hidrológico 2017/18. Durante el período invernal, la evolución temporal de la concentración de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en el aire de las salas no visitables es similar a la de las Galerías Turísticas. Las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el aire de la cueva son ligeramente superiores a la atmosférica, mientras que el caso del CH<sub>4</sub> son similares o inferiores. En verano, la concentración de CO<sub>2</sub> varía entre las diferentes salas. En todos los casos, el efecto de la respiración humana es patente en todas las salas del sector turístico, en las que se observan acusadas variaciones diarias de su concentración, con valores más elevados en el mes de agosto, cuando el número de visitas es máximo. El CH<sub>4</sub> disminuye drásticamente debido a la menor ventilación, lo que permite identificar los procesos microbianos de oxidación de ese gas, así como el aporte desde la zona vadosa circundante. Los periodos de primavera y otoño presentan mayor variabilidad en los datos. En estos periodos la dirección de los flujos de aire puede cambiar de forma horaria/diaria, modificando significativamente la composición gaseosa de la atmósfera subterránea a esta escala.

**Palabras clave:** CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, cueva de Nerja, espectroscopía láser, metanotrofia.

## **Spatio-temporal evolution of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> gases and their isotopic ratios (<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C) in the atmosphere of the Nerja Cave (Málaga, Spain)**

### **Abstract**

Since the end of 2017, a laser spectroscopy equipment with CRDS (Cavity-Ring-Down Spectroscopy) technology has been continuously measuring the concentrations of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>) and the <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C isotopic ratio in the CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> molecules present in the air of the Nerja Cave (Malaga, Spain). The sampling points are located in the Cataclysm (points T1 and T2), Columns of Hercules (T3) and Immensity (T4) rooms, with points T3 and T4 located in the area not open to visitors. The objective is to characterise the origin of both gases and the ventilation processes between the different subsystems of the Nerja Cave, in order to establish a conceptual model of operation that will help in the management of the cave. The study period analysed in this work corresponds to the hydrological year 2017/18. During the winter period, the temporal evolution of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentration in the air of the non-visitable rooms is similar to that of the Tourist Galleries. The CO<sub>2</sub> concentrations in the cave air are slightly higher than the atmospheric concentration, while in the case of CH<sub>4</sub> they are similar or lower. In summer, the CO<sub>2</sub> concentration varies between the different rooms. In all cases, the effect of human respiration is evident in all the rooms in the tourist sector, where there are marked daily variations in concentration, with higher values in August, when the number of visitors is at its highest. CH<sub>4</sub> decreases drastically due to the lower ventilation, which makes it possible to clearly identify the microbial processes of oxidation of this gas, as well as the contribution from the surrounding vadose zone. The spring and autumn periods show more variability in the data. In these periods the direction of airflows can change hourly/daily, changing the gaseous composition of the subsurface atmosphere significantly on this scale.

**Key words:** CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, laser spectroscopy, methanotrophy, Nerja cave.

## **Introducción**

La ventilación y los procesos de intercambio gaseoso entre el aire exterior y el aire subterráneo están controlados por las diferencias de densidad o de presión entre ambas masas de aire y varían en función de la temperatura del aire, la presión, la humedad relativa, la composición de los gases, el viento y la geometría de la cueva (Wigley, 1967; Cigna, 1968; Badino, 2010; Kowalczyk y Froelich, 2010; Sánchez-Cañete et al., 2013). Los ciclos estacionales y diarios de las diferencias entre el interior y el exterior determinan la tasa de intercambio de aire y la composición del aire de la cueva (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, <sup>222</sup>Rn, H<sub>2</sub>O<sub>(g)</sub>) a lo largo del año. Aunque se han observado diversos tipos de circulación de aire, la circulación de tipo chimenea parece ser el mecanismo más observado (Covington y Perne, 2015). Este tipo de circulación se produce en cuevas con múltiples entradas situadas a



diferentes altitudes donde el flujo de aire es dependiente de las diferencias de densidad. La Cueva de Nerja presenta este tipo de ventilación y se caracteriza por tener un modelo de ventilación con cuatro regímenes estacionales bien diferenciados (Liñan *et al.*, 2018): invierno, primavera, verano y otoño; y dos modos de ventilación con direcciones de flujo de aire opuestas durante un ciclo anual. En invierno, el aire externo entra en la Cueva de Nerja y se desplaza desde el sector turístico al no turístico. El fuerte régimen de ventilación durante este periodo contribuye a la entrada de aire atmosférico. Durante el régimen de verano, la ventilación es la más baja del ciclo anual. El aire de la cueva sale por las entradas más bajas y el aire exterior entra en la cueva por la entrada más alta. La primavera y el otoño son regímenes de ventilación de transición y los más complejos. Las direcciones de los flujos de aire pueden cambiar con una periodicidad diurna o poli diurna, ya que la diferencia de temperatura exterior e interior varía entre la mañana y la noche.

El CO<sub>2</sub> en cuevas puede proceder de diversas fuentes. La concentración de CO<sub>2</sub> varía desde contenidos cercanos a los atmosféricos hasta varios órdenes de magnitud superiores (Ek y Gewalt, 1985). Diversos estudios han demostrado mediante el uso de isótopos del carbono que el aire del interior de cuevas es una mezcla de aire rico en CO<sub>2</sub> con valores bajos de δ<sup>13</sup>C, junto con niveles de CO<sub>2</sub> cercanos a los atmosféricos con una composición isotópica de C estable de -7 a -8‰ (Baldini *et al.*, 2006). Además del CO<sub>2</sub> atmosférico, las fuentes de CO<sub>2</sub> en cuevas son diversas: 1) CO<sub>2</sub> transportado mediante procesos difusivos y/o advectivos a través del epikarst y la zona vadosa (y el suelo) resultado de la respiración de las raíces y la descomposición de la materia orgánica; 2) la desgasificación de las aguas de goteo y las aguas subterráneas; 3) CO<sub>2</sub> geológico; 4) la producción biológica; y 5) la contribución humana o antropogénica.

En cavidades, la desaparición de CH<sub>4</sub> se ha observado en una variedad de cuevas en todo el mundo (Mattey *et al.*, 2013; Fernández-Cortés *et al.*, 2015; McDonough *et al.*, 2016; Webster *et al.*, 2016; Waring *et al.*, 2017; Webster *et al.*, 2018). En general, la atmósfera subterránea se encuentra en composiciones inferiores a la de la atmósfera exterior (1,908 ppmv en mayo de 2022; Ed Dlugokencky, NOAA/GML, [gml.noaa.gov/ccgg/trends\\_ch4/](http://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/)), debido a la oxidación microbiana de aire atmosférico llevada a cabo por bacterias metanotróficas. Además de este proceso de desaparición de CH<sub>4</sub> atmosférico, las cuevas pueden tener diferentes fuentes de CH<sub>4</sub>. En la actualidad, se han descrito las siguientes: CH<sub>4</sub> atmosférico que entra en una cueva a través de la ventilación; CH<sub>4</sub> previamente oxidado en el suelo o la zona vadosa y que se introduce en la cavidad mediante procesos advectivos o difusivos (McDonough *et al.*, 2016; Waring *et al.*, 2017); CH<sub>4</sub> termogénico (Webster *et al.*, 2018); y CH<sub>4</sub> biogénico, producido tanto localmente como de origen vadoso (Mattey *et al.*, 2013; Webster *et al.*, 2018).

En este trabajo, se presentan los resultados obtenidos a través de un equipo de espectroscopía laser con tecnología CRDS (*Cavity-Ring-Down Spectroscopy*) de datos en continuo (horario) de las concentraciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y la relación isotópica <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C en las moléculas de CO<sub>2</sub> presentes en el aire de la Cueva de Nerja (Málaga, España) durante el año hidrológico 2017/2018. Los datos se relacionan con datos de temperatura exterior y precipitación de una estación meteorológica situada cerca de

la Cueva de Nerja. El objetivo es caracterizar el origen de ambos gases y los procesos de ventilación entre los distintos subsistemas de la Cueva de Nerja, para establecer un modelo conceptual de funcionamiento que ayude a la gestión de la cavidad.

## Descripción del área de estudio

La Cueva de Nerja (figura 1) es una importante cueva turística que presenta una media de ~485.000 visitantes al año, principalmente durante los meses de verano, de junio a septiembre. La cavidad tiene un desarrollo horizontal y un volumen aproximado de 300.000 m<sup>3</sup>. Su entrada principal se encuentra a unos 160 m sobre el nivel del mar (s.n.m.), y con unos 12 m<sup>2</sup> de superficie abierta es el acceso de los visitantes. Existen otros dos sumideros naturales subcirculares en una altitud similar sobre el nivel del mar junto a la entrada principal, con un diámetro de 1 y 6 m. El punto más distante a la entrada de la cueva está a una altitud de 190 m s.n.m. en su punto más alto y de 130 m s.n.m. en el más bajo. Aproximadamente un tercio de la cueva —las Galerías Turísticas— está abierto al público, mientras que la otra parte —las Galerías Altas y Nuevas— sólo es accesible a investigadores y personal de mantenimiento y conservación (figura 1).

Geológicamente, la cueva se desarrolló dentro de mármoles dolomíticos triásicos, fisurados y karstificados, de más de 500 m de espesor. La estratificación en el sector de la cueva es casi horizontal, y la cueva tiene una orientación aproximada N-S. La formación carbonatada presenta a muro una gruesa secuencia de esquistos principalmente paleozoicos. Alrededor del Barranco de Maro aparece una formación pleistocena compuesta por brechas calcáreas muy cementadas. La falla regional de "Las Alberquillas" bordea el sector meridional del entorno de la cueva: la falla es normal y de deslizamiento y ha estado activa en tiempos geológicos recientes (Sanz-Galdeano *et al.*, 1991). Su incidencia global en el desarrollo de la geomorfología local ha supuesto la elevación progresiva del bloque norte desde el Mioceno tardío, lo que ha provocado la incisión del Barranco de Maro y la ubicación elevada de la Cueva de Nerja por encima del nivel piezométrico (Guerra-Merchán *et al.*, 2004). Una parte importante de los afloramientos



Figura 1. Ubicación del equipo (punto rojo) y de los puntos de muestreo T1 a T4 (puntos azules).

carbonatados de la zona de estudio es roca desnuda. La cobertura del suelo es escasa, irregular y rara vez supera los 15 cm de espesor. La vegetación natural está formada principalmente por arbustos y pinos.

El clima en la zona de estudio es mediterráneo costero, con una precipitación media ligeramente inferior a 500 mm/año, más del 60% de la cual cae entre octubre y enero. La temperatura media oscila entre los ~13 °C en enero y los 26 °C en agosto (Liñán *et al.*, 2007), mientras que los valores medios de la temperatura del aire y la humedad atmosférica relativa son de 18,8 °C y 66%, respectivamente.

## Metodología

El aire del interior de la cueva se analizó de manera continua con un espectrómetro láser de tipo Ring-Down (CRDS) para medidas de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> (Picarro G2201-i, Picarro Inc., California, precisión de δ<sup>13</sup>C- CH<sub>4</sub> <1,15‰ en modo de Alta Precisión, precisión de CH<sub>4</sub> 5 ppb + 0,05% de la lectura (<sup>12</sup>C), 1 ppb + 0,05% de la lectura (<sup>13</sup>C) en modo de Alta Precisión, con un rango operativo de CH<sub>4</sub> de 1,2-15 ppmv). La relación isotópica del C estable se expresa en partes por mil (‰), con valores referenciados al estándar Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB). Se midieron con frecuencia (una vez al día durante 10 min) estándares patrón para cuantificar la deriva durante los análisis de muestras de aire de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. El equipo pertenece al Área de Geodinámica Externa del Departamento de Geología de la Universidad de Málaga y está instalado en la Sala del Cataclismo. Los puntos de muestreo de aire (figura 1) se ubican en las salas de Cataclismo (puntos T1 y T2), Columnas de Hércules (T3) e Inmensidad (T4), localizándose los puntos T3 y T4 en la zona no habilitada para las visitas. El equipo fue programado con una secuencia de registro de datos cada 60 minutos en cada una de las localizaciones. Para el análisis posterior de estos datos, se utiliza como representativo de ese periodo de 60 minutos el valor mediano de los últimos 30 minutos de medida. De tal forma que en cada punto de medida (T1, T2, T3 o T4) se registran las variables de interés (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, y la señal isotópica de C de CO<sub>2</sub>) durante 1 hora cada 4 horas, dando como resultado series diarias con periodicidad de 6 horas.

## Resultados y discusión

Los datos horarios resultantes del equipo de espectrometría laser CRDS muestran variaciones en las concentraciones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, así como de la composición isotópica de CO<sub>2</sub>. Estas variaciones se deben principalmente a cambios naturales de la ventilación producida en la propia cueva, y que depende mayoritariamente de las diferencias entre la temperatura exterior y la temperatura interior de la cueva y, por tanto, del patrón de ventilación dominante en cada estación del año. Así, dependiendo de estas variaciones, la fuente dominante tanto de CO<sub>2</sub> como de CH<sub>4</sub> varía, así como los procesos que favorecen su eliminación en el sistema. Los periodos que se muestran a continuación corresponden al periodo comprendido entre octubre de 2017 y octubre de 2018, y, por tanto, abarcan

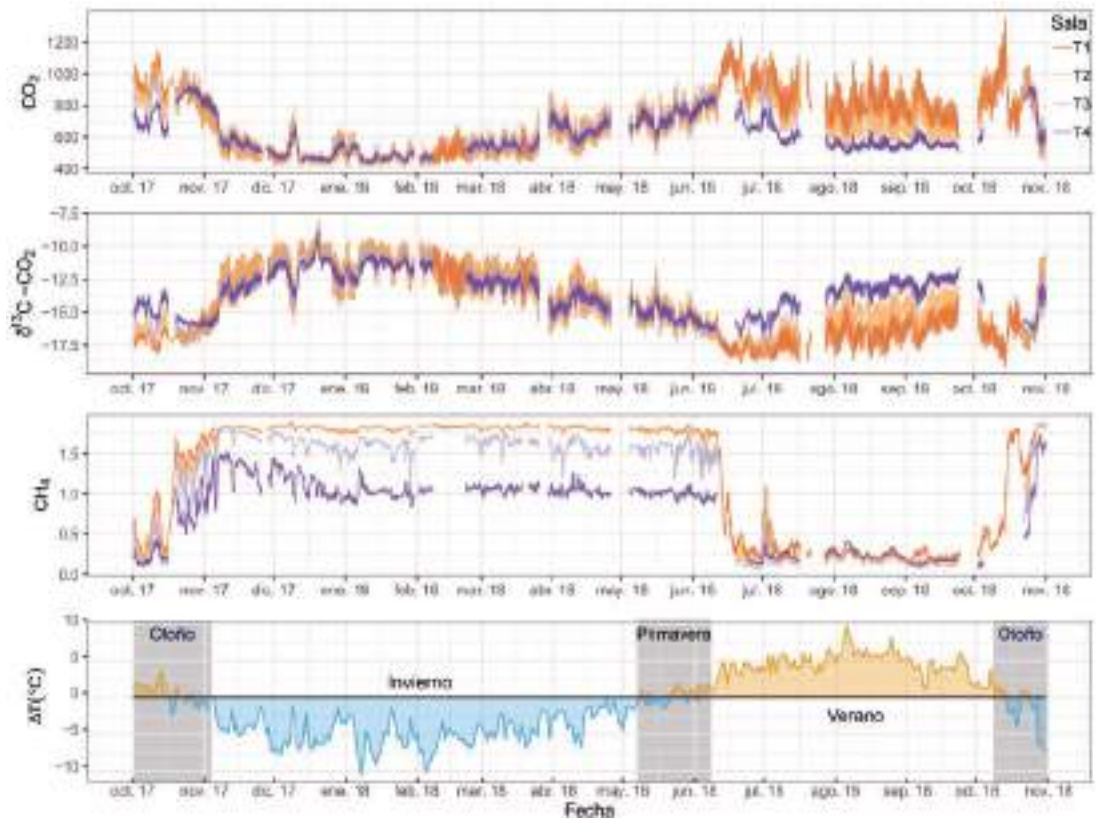


Figura 2. Variaciones en la concentración de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, y señal isotópica de C de CO<sub>2</sub>, durante el periodo estudiado, frente a la diferencia de temperatura exterior-interior a escala diaria ( $\Delta T$ ). Barras grises: Periodos de transición (otoño y primavera). T1 y T2: Sala del Cataclismo (Sector turístico); T3: Sala de Columnas de Hércules (Zona no visitable); T4: Sala de Inmensidad (Zona no visitable).

los periodos estacionales de invierno, primavera, verano y otoño (figura 2), según el modelo de ventilación natural vigente (Liñán et al., 2018).

Durante el período invernal, la evolución temporal de la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire de las salas no visitables es similar a la de las Galerías Turísticas (563 ppm de valor medio en T4, respecto a 540 ppm de valor medio en T1, figura 3). En ambos casos, la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire de la cueva es ligeramente superior a la atmosférica (417,19 ppm en agosto de 2022; <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>). Asimismo, muestra una tendencia ascendente desde febrero hasta el final del periodo de invierno (principios de mayo). La señal isotópica del CO<sub>2</sub> es muy similar en todas las salas de control, y está comprendida entre -17,4 ‰ y -8,0 ‰, con un valor medio de -12,3 ‰ (Cataclismo; T1 y T2), -12,7 ‰ (Hércules; T3) y -12,8 ‰ (Inmensidad; T4), valores que se sitúan entre la señal propia de la atmósfera (-8 ‰) y la correspondiente al epikarst/respiración humana (de -24,0 a -21,0 ‰, aproximadamente). Esto pone de manifiesto que el CO<sub>2</sub> del aire de la cueva tiene un doble origen: atmosférico y biológico. Los valores isotópicos del CO<sub>2</sub> se

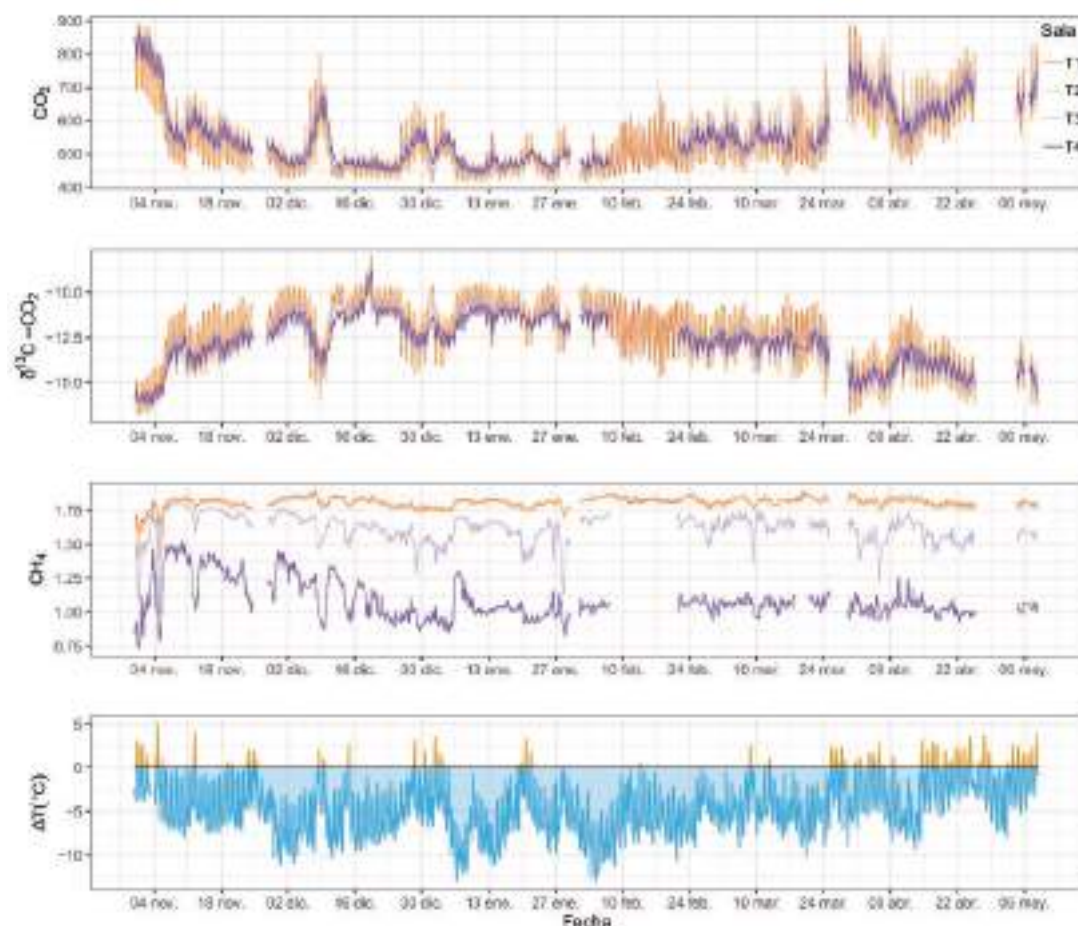


Figura 3. Variaciones en la concentración de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> y señal isotópica de C de CO<sub>2</sub>, durante el período invernal frente a la diferencia de temperatura exterior-interior a escala horaria ( $\Delta T$ ).

van haciendo cada vez más ligeros a medida que avanza el período de invierno (desde valores medios de -11,2 en enero, a -14,1 ‰ en abril), indicando un menor aporte de CO<sub>2</sub> atmosférico y una mayor contribución de CO<sub>2</sub> de origen biológico (suelo y/o visitas). A medida que avanza el periodo, el número de visitantes de la cueva aumenta y la diferencia de temperatura entre el aire exterior e interior disminuye de forma que disminuye progresivamente la entrada de aire atmosférico a través de las cotas bajas (torcas+entrada turística). La concentración de CO<sub>2</sub> en el aire de la cueva aumenta y la señal isotópica se hace más ligera.

A diferencia del CO<sub>2</sub>, la concentración de CH<sub>4</sub> es diferente en las salas controladas (figura 2). Las Galerías Turísticas presentan unos valores de concentración de metano propios de un metano de origen atmosférico, con un valor medio de 1,8 ppm. En la Sala de Inmensidad, sin embargo, la concentración es sub-atmosférica en todo el periodo, con

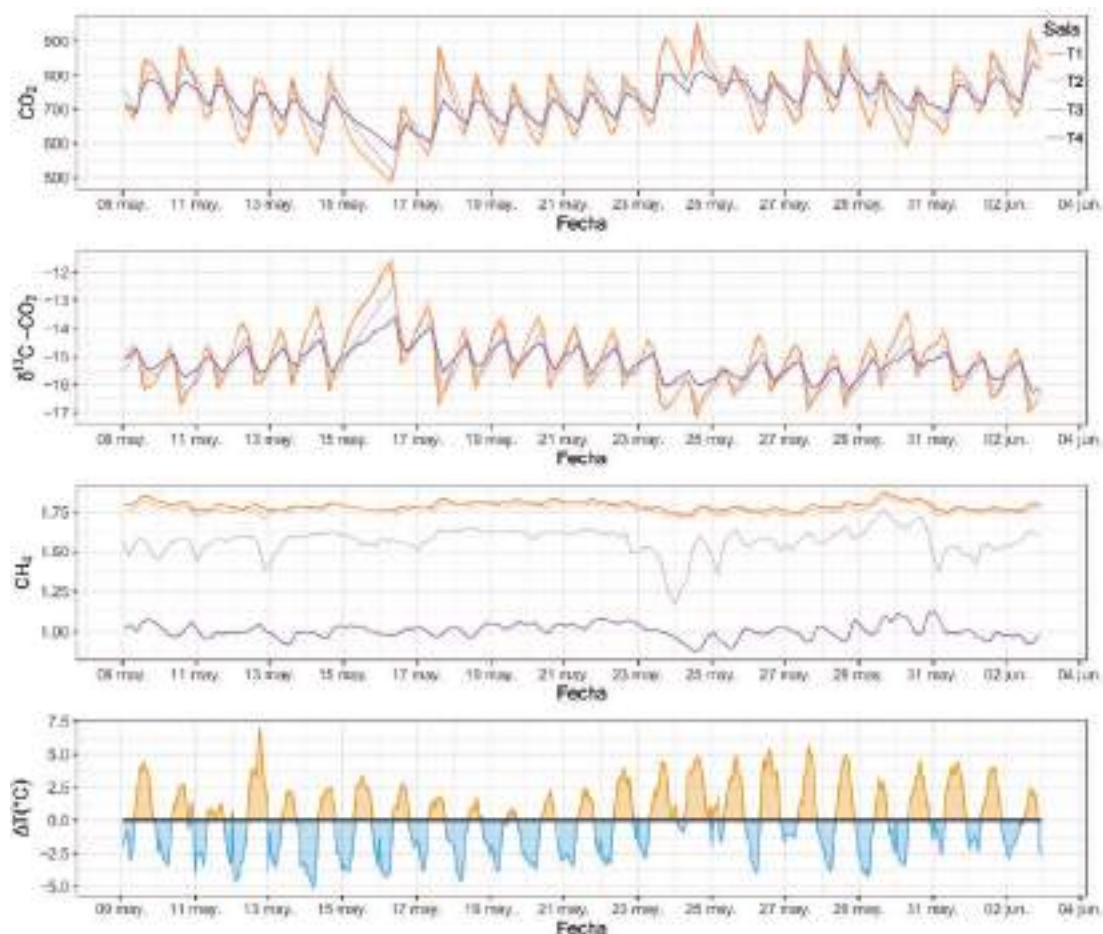


Figura 4. Variaciones en la concentración de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> y señal isotópica de C de CO<sub>2</sub> durante primavera frente a la diferencia de temperatura exterior-interior a escala horaria ( $\Delta T$ ).

un valor medio de 1,1 ppm. La Sala de Columnas de Hércules presenta unos valores de concentración intermedios entre ambos, con un valor medio de 1,6 ppm. Este último valor indica que, si bien existe una disminución en la concentración de metano en el aire de esta sala, la señal atmosférica es bastante importante debido a la elevada ventilación de este sector de la cueva, más próximo a las entradas de la cavidad (torcas+entrada turística) que la Sala de Inmensidad. La desaparición del metano está ligada a la oxidación producida por bacterias metanotrofas presentes en la cavidad (Ojeda *et al.*, 2019).

Durante el período de primavera, la ventilación se caracteriza por presentar variaciones en la dirección de los flujos dominantes a escala diaria. En esta época, las diferencias de temperatura entre el aire interior y el aire exterior pueden ser tanto positivas como negativas, modificando la composición gaseosa de la atmósfera subterránea con respecto a invierno. La concentración de CO<sub>2</sub> en el aire de las salas no visitables (valores medios

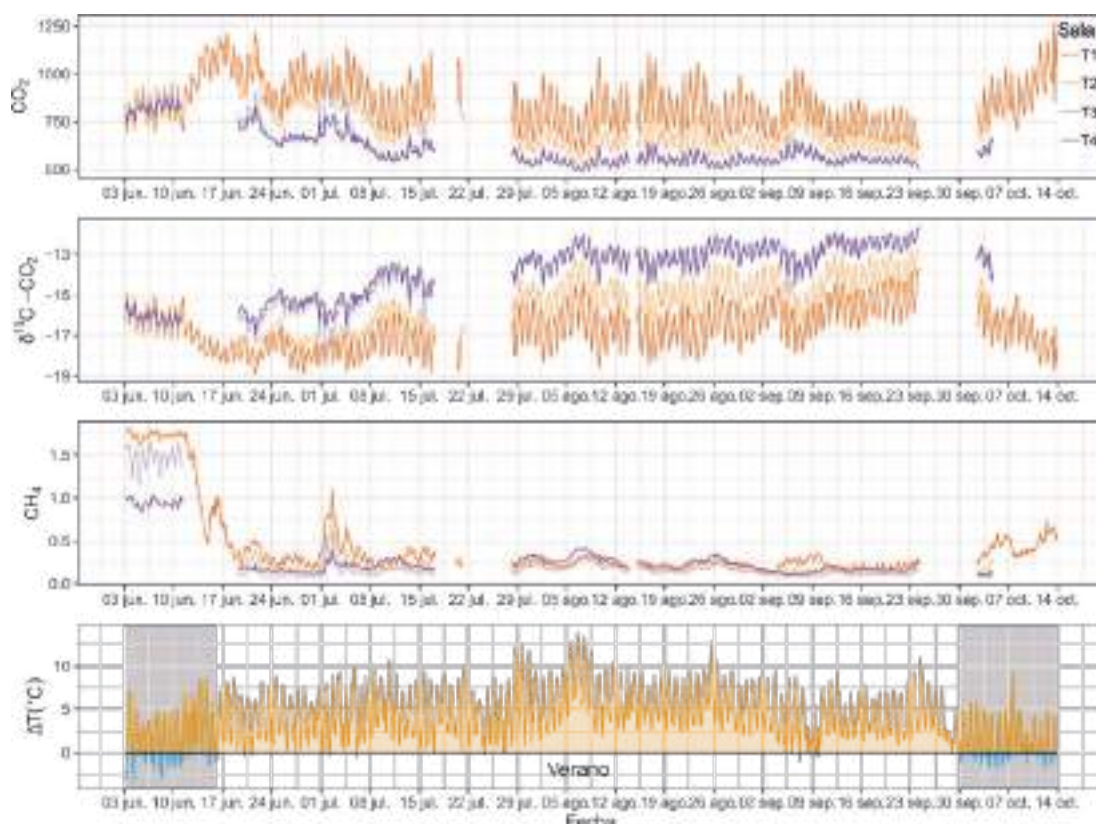


Figura 5. Variaciones en la concentración de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> y señal isotópica de C de CO<sub>2</sub> durante el periodo de verano frente a la diferencia de temperatura exterior-interior a escala horaria ( $\Delta T$ ). Se marcan con barras grises los periodos de transición previos (primavera) y posteriores (otoño) al verano.

de 734 ppm en T3 y 725 ppm en T4) es similar al de las Galerías Turísticas (valores medios: 721 ppm en T1 y T2) (figura 4). La señal isotópica del CO<sub>2</sub> es muy similar en todas las salas de control, con un valor medio entre -15,3 y -15,1 ‰, correspondiente a los puntos T3 y T1-T2, respectivamente. En primavera, cuando la diferencia entre la temperatura exterior e interior es positiva, la entrada de aire atmosférico se ve limitada por las entradas de la cueva ubicadas a menor cota (torcas+entrada turística). En esas situaciones (por ejemplo, desde mediados-finales de mayo, figura 4), la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire de la cueva aumenta (la renovación de aire por entrada de aire atmosférico se reduce) y la señal isotópica se hace más ligera. Dado que la señal isotópica del CO<sub>2</sub> originado en el epikarst es similar a la del CO<sub>2</sub> procedente de la respiración humana, es difícil discriminar entre ambos orígenes. La concentración de CH<sub>4</sub> es diferente en las salas controladas, y no se ve afectada por las visitas turísticas (figura 4). Las Galerías Turísticas presentan unos valores de concentración de metano ligeramente inferiores a los del metano atmosférico, con unos valores medios de 1,79 y 1,77 ppm, para las salas T1 y T2, respectivamente. En la Sala de Inmensidad (T4), sin embargo, la concentración es sub-atmosférica en todo el periodo, con un valor medio de 0,87 ppm. La Sala de Columnas de Hércules (T3) presenta unos valores de concentración intermedios entre ambos, con un valor medio de 1,18 ppm. Este

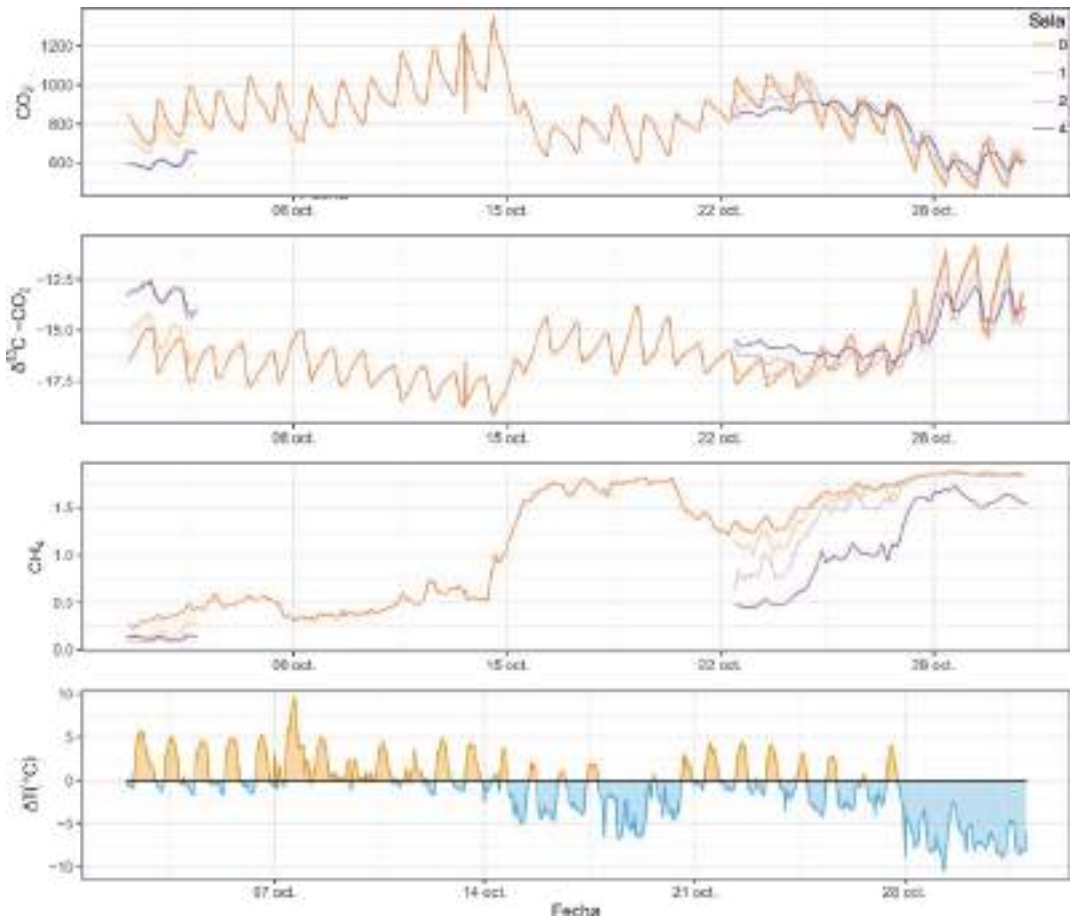


Figura 6. Variaciones en la concentración de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, y señal isotópica de C de CO<sub>2</sub>, durante otoño de 2018 frente a la diferencia de temperatura exterior-interior a escala horaria ( $\Delta T$ ).

último valor indica que, si bien existe una disminución en la concentración de metano en el aire de esta sala, la señal atmosférica sigue siendo significativa debido a su mayor proximidad a las entradas de la cavidad.

Durante el verano, la concentración de CO<sub>2</sub> varía entre las diferentes salas. Las Galerías Turísticas presentan un valor medio de 870 ppm en T1 y 711 ppm en T2, mientras que el sector no habilitado no supera valores de 586 ppm en la sala de Inmensidad (T4). Esto es debido a la ventilación dominante en este periodo, la entrada de aire exterior se produce a través de las entradas superiores, en el sector no habilitado. La concentración de CO<sub>2</sub> en este sector es más cercana a la exterior. En el sector turístico, la afección de la respiración humana de las visitas es más patente, ya que la ventilación es menos eficiente en este sector, y se observan acusadas variaciones diarias de su concentración, con concentraciones más elevadas en el mes de agosto cuando el número de visitas incrementa. La concentración de CH<sub>4</sub> es extremadamente baja en todas las salas



controladas (figura 5), y claramente inferior a la del período invernal, con un valor promedio de ~0,1 ppm en todas las salas controladas.

Este aire empobrecido en metano puede provenir tanto a través de pulsos de aire vadoso previamente oxidado en el epikarst, como a una oxidación *in situ* llevada a cabo por bacterias metanotrofas del aire atmosférico que entra por las entradas superiores de la cavidad. En cualquier caso, pese a que en este periodo de ventilación el aire exterior entra predominantemente a través de las entradas superiores (más próximas al punto T4), la tasa de renovación del aire en esta época es muy baja y la ventilación no es tan efectiva como en invierno.

Durante el período de otoño (figura 6), la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire de la sala T1 de las Galerías Turísticas (865 ppm de valor medio) es ligeramente superior a la de la sala T2 (769 ppm) y a la del sector no habilitado (752 ppm de valor medio en T3; y 738 ppm en T4) (figura 6). Además, en otoño, la diferencia de temperatura exterior-interior empieza a disminuir, la entrada de aire atmosférico por las entradas de la cueva ubicadas a menor cota (torcas+entrada turística) aumenta. Como resultado, la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire de la cueva disminuye (la renovación de aire por entrada de aire atmosférico aumenta). Esto también se refleja en la señal isotópica. En este periodo, la señal isotópica es más pesada que en verano. En otoño, la señal isotópica de CO<sub>2</sub> en las Galerías Turísticas (valores medios de -16,4 y -15,3 ‰, en T1 y T2, respectivamente) fue un poco más ligera que el sector no habilitado (-15,1 ‰ en T3; y -14,8 en T4; figura 6). En otoño, las Galerías Turísticas y el sector no habilitado presentaron unos valores de concentración de metano inferiores a las del metano atmosférico, con un valor medio de 0.2 ppm en T1, y un valor medio de 0,1 ppm para el resto (figura 6), y presentaron un aumento de las concentraciones conforme las diferencias de temperaturas exterior e interior se hacían más negativas. Tal y como ocurre con el CO<sub>2</sub>, cuando la diferencia entre la temperatura exterior e interior es negativa, la entrada de aire atmosférico por las entradas de la cueva ubicadas a menor cota (torcas+entrada turística) aumenta. En esas situaciones, la concentración de CH<sub>4</sub> en el aire de la cueva aumenta.

## Conclusiones

La ventilación juega un papel fundamental en la composición de la atmósfera subterránea y la estabilidad microclimática del sistema. Durante un ciclo anual, la composición de CO<sub>2</sub> es variable mostrando valores más elevados con composición isotópica más empobrecida durante el verano, y, en general, contenidos más bajos y cercanos a la atmósfera exterior durante el invierno. La excepción de esto último se produce en verano en la sala T4, en el sector no visitable, donde se registran concentraciones de CO<sub>2</sub> mínimas y sin variaciones acusadas debido a la entrada de aire externo desde las cotas más altas. En los periodos de transición —otoño y primavera—, la dirección de los flujos de aire es variable, en función de la diferencia de temperatura entre el aire exterior e interior, lo que provoca cambios en el contenido y la composición isotópica de la atmósfera subterránea. La contribución de la respiración humana y la entrada de aire vadoso son difíciles de discernir puesto que ambos tienen una señal isotópica similar, aunque esta es

más ligera y presenta picos más acusados cuando existe un aumento significativo de las visitas (p.ej., agosto). Las variaciones en la disminución de CH<sub>4</sub> en el interior de la Cueva de Nerja tienen lugar principalmente debido al intercambio gaseoso con el exterior y la zona vadosa circundante. En invierno, la cueva presenta una disminución significativa de la concentración de CH<sub>4</sub> en las salas no turísticas cuando la tasa de ventilación es más elevada. En verano, cuando la ventilación es menor, el CH<sub>4</sub> desaparece en todas las salas estudiadas. Esta disminución de CH<sub>4</sub> parece depender de la distancia a la entrada de esta, como fue observado en estudios anteriores (Ojeda *et al.*, 2019), y presenta los niveles más bajos en las partes internas de la cueva, alejadas de las entradas principales y menos afectadas por la ventilación. La desaparición de CH<sub>4</sub> es el resultado de la interacción entre la tasa de ventilación, la entrada de aire vadoso/suelo, y la oxidación a través de la comunidad microbiana específica de cada sala de la cueva.

## Referencias

- Badino, G. (2010). Underground meteorology: "What's the weather underground?", *Acta Carsologica*, 39(3), 427–448. <https://doi.org/10.3986/ac.v39i3.74>.
- Baldini, J.U.L., Baldini, L.M., McDermott, F., Clipson, N. (2006). Carbon dioxide sources, sinks and spatial variability in shallow temperate zone caves: Evidence from Ballynamindra Cave, Ireland. *Journal of Cave and Karst Studies*, 68(1), 4–11.
- Cigna, A. A. (1968). An analytical study of air circulation in caves. *International Journal of Speleology*, 3(1), 41–54. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.3.1.3>.
- Covington, M. D., Perne, M. (2015). Consider a cylindrical cave: A physicist's view of cave and karst science. *Acta Carsologica*, 44(3), 363–380. <https://doi.org/10.3986/ac.v44i3.1925>.
- Dlugokencky, E., Tans, P.: Trends in atmospheric carbon dioxide, National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL). [https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl\\_data.html](https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl_data.html).
- Ek, C., Gewalt, M. (1985). Carbon dioxide in cave atmospheres. New results in Belgium and comparison with some other countries. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10(2), 173–187. <https://doi.org/10.1002/esp.3290100209>.
- Fernández-Cortés, A., Cuezva, S., Álvarez-Gallego M., García-Antón, E., Pla, C., Benavente, D., Jurado, V., Saiz-Jimenez, C., Sanchez-Moral, S. (2015). Subterranean atmospheres may act as daily methane sinks. *Nature Communications*, 6, 7003. <https://doi.org/10.1038/ncomms8003>.
- Guerra-Merchán, A., Serrano, F., Ramallo D. (2004). Geomorphic and sedimentary Plio–Pleistocene evolution of the Nerja area (northern Alboran basin, Spain). *Geomorphology*, 60, 89–105. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.07.010>.
- Kowalczyk, A.J., Froelich, P.N. (2010). Cave air ventilation and CO<sub>2</sub> outgassing by radon-222 modeling: how fast do caves breathe? *Earth and Planetary Science Letters*, 289(1–2), 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.11.010>.
- Liñán, C., Simón-Vallejo, M.D., del Rosal, Y., Garrido, A. (2007). Estudio preliminar del clima en el entorno de la Cueva de Nerja (Andalucía, provincia de Málaga). In *Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible*, 24, 159–167.
- Liñán, C., Del Rosal, Y., Carrasco, F., Vadillo, I., Benavente, J., Ojeda, L. (2018). Highlighting the importance of transitional ventilation regimes in the management of Mediterranean show caves (Nerja-Pintada system, southern Spain). *Science of The Total Environment*, 631, 1268–1278. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.304>.
- Mattey, D.P., Atkinson, T.C., Barker, J.A., Fisher, R., Latin, J.P., Durrell R., Ainsworth, M. (2016). Carbon dioxide, ground air and carbon cycling in Gibraltar karst. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 184, 88–113. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.01.041>.
- McDonough, L.K., Iverach, C.P., Beckmann, S., Manefield, M., Rau, G.C., Baker, A., Kelly, B.F.J. (2016). Spatial variability of cave-air carbon dioxide and methane concentrations and isotopic compositions in a semi-arid

- karst environment. *Applied and environmental microbiology*, 74(5), 1305. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5497-5>.
- Ojeda, L., Vadillo, I., Etiope, G., Benavente, J., Liñán, C., del Rosal, Y., Tapia, S.T., Moríñigo, M.A., Carrasco, F. (2019). Methane sources and sinks in karst systems: The Nerja Cave and its vadose environment (Spain). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 259, 302–315.
- Sánchez-Cañete, E.P., Serrano-Ortiz P., Domingo Poveda, F., Kowalski A.S. (2013). Cave ventilation is influenced by variations in the CO<sub>2</sub>-dependent virtual temperature. *International Journal of Speleology*, 42(1), 1-8. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.42.1.1>.
- Sanz de Galdeano, C., López Garrido, A. (1992). Tectonic evolution of the Malaga basin (Betic Cordillera). Regional implications. *Geodinamica Acta*, 5(3), 173–186. <https://doi.org/10.1080/09853111.1992.11105226>.
- Waring, C.L. Hankin, S.I., Griffith, D.W.T., Kertesz, M.A., Kobylski, V., Wilson, N.L., Coleman, N.V., Kettlewell, G., Zlot, R., Bosse, M., Bell, G., (2017). Seasonal total methane depletion in limestone caves. *Scientific reports*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07769-6>.
- Webster, K.D., Mirza, A., Deli, J.M., Sauer, P.E., Schimmelmann, A. (2016). Consumption of atmospheric methane in a limestone cave in Indiana, USA. *Chemical Geology*, 443, 1–9.
- Webster, K.D., Drobniak, A., Etiope, G., Mastalerz, M., Sauer, P.E., Schimmelmann, A. (2018). Subterranean karst environments as a global sink for atmospheric methane. *Earth and Planetary Science Letters*, 485, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.12.025>.
- Wexsteen, P., Jaffé, F.C., Mazor, E. (1988). Geochemistry of cold CO<sub>2</sub>-rich springs of the Scuol-Tarasp region, Lower Engadine, Swiss Alps. *Journal of Hydrology*, 104(1-4), 77-92. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90158-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90158-8).
- Wigley, T. M. L. (1967). Non-steady flow through a porous medium and cave breathing. *Journal of Geophysical Research*, 72(12), 3199–3205. <https://doi.org/10.1029/JZ072i012p03199>.



# **Estudio de estabilidad con escáner laser 3D, vigilancia y seguridad de la Cueva del Viento (Tenerife, Islas Canarias)**

María Leticia PACHECO CABRERA <sup>(1)</sup>, María Esther MARTÍN GONZÁLEZ <sup>(2)</sup>,  
Francisco MESA LUIS <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Consultora, C/ San Borondón, 18, Playa Honda,  
Lanzarote, 35509 Las Palmas. maletipaca@gmail.com

<sup>(2)</sup> Museo de Ciencias Naturales de Tenerife, C/ Fuente Morales, 1, 38003 Santa Cruz de Tenerife, Tenerife.  
mmartin@museosdetenerife.org

<sup>(3)</sup> Centro de Visitantes Cueva del Viento, Carretera de Los Piquetes, 51. 38480, Icod de los Vinos, Tenerife.  
fmesa@gmail.com

## **Resumen**

La Cueva del Viento es considerada actualmente uno de los tubos de lava laberínticos más largos del mundo, con 18,5 kilómetros conocidos hasta la fecha. De estos, solo 180 m han sido acondicionados para ser visitados por el público en la galería de Sobrado superior. Las visitas se realizan en pequeños grupos que son dirigidos desde el centro de visitantes por un guía-intérprete, que explica el entorno natural y las características geomorfológicas y geológicas de esta cavidad volcánica. Debido a que es un destino turístico popular, era importante realizar un estudio de estabilidad para garantizar la seguridad de los visitantes y empleados. Este estudio se ha dividido en dos partes. En la primera se realizaron análisis geológicos, geomorfológicos y geotécnicos, y que consiste en el reconocimiento geológico y la caracterización geomecánica de los materiales que componen la estructura de la cueva. En el segundo estudio, una empresa especializada en topografía llevó a cabo un levantamiento topográfico, y varios escaneos láser 3D durante varios meses. El objetivo de aplicar esta tecnología, las comparaciones de nubes de puntos 3D, era determinar la estabilidad de la cueva a gran escala. En este trabajo se presentan los resultados del estudio de estabilidad obtenido de las nubes de puntos realizadas con un escáner láser 3D, su evolución a lo largo de varios meses, los estudios geológicos, geomorfológicos y geotécnicos y las acciones que se tomaron en base a estos hallazgos.

**Palabras clave:** Cueva del Viento, escáner láser 3D, estabilidad, seguridad, visitantes

## ***Stability study with 3D laser scanner, surveillance and security of the Cueva del Viento (Tenerife, Canary Islands)***

### **Abstract**

*The Cueva del Viento is currently considered one of the longest labyrinthine lava tubes in the world, with 18,5 kilometers surveyed to date. Of these, only 180 m have been*

*conditioned to be visited by the public in the gallery of Sobrado superior. The visits are made in small groups that are led from the visitor center by a guide-interpreter, who explains the natural environment and the geomorphological and geological characteristics of this volcanic cavity. Because it is a popular tourist destination, it was important to conduct a stability study to ensure the safety of visitors and employees. This study has been divided into two parts, The first one in which geological, geomorphological and geotechnical analyses were carried out, and consisting of geological recognition and geomechanical characterization of the materials that make up the structure of the cave. In the second study, a company specialized in topography carried out a topographic survey, and several 3D laser scans for several months. The goal of applying this technology, comparisons of 3D point clouds, was to determine the cave's stability on a big scale. This paper presents the stability study results obtained from the point clouds made with a 3D laser scanner, its evolution over a period of several months, the geological, geomorphological and geotechnical studies and the actions that were taken based on these findings.*

**Keywords:** 3D laser scanner, Cueva del Viento, security, stability, visitors.

## Introducción

En una cueva volcánica es normal que se desarrollen fenómenos de inestabilidad en la bóveda y paredes que son consecuencia de la evolución natural de este tipo de cavidades originadas por tubos de lava volcánicos, produciéndose caídas de fragmentos de roca de pequeño tamaño y colapsos de mayor entidad (procesos de caída a micro, a meso y mega-escala).

En estos tipos de cavidades, los colapsos generalizados o procesos de caída a mega escala son fenómenos que se desarrollan a escala de tiempo geológico; es decir, para que dichos procesos tengan lugar se requiere un debilitamiento general de la estructura geológica que constituye el tubo. En los tubos volcánicos este proceso origina un jameo, quedando el tubo abierto a la superficie, originando zonas de acceso al interior de la cavidad.

En cuanto a los desprendimientos de fragmentos aislados y/o de un conjunto de fragmentos de rocas desde el techo y las paredes del tubo volcánico, procesos de caída denominados a micro y meso escala, la posibilidad de ocurrencia es muy elevada, teniendo en cuenta las condiciones geológicas y morfológicas de los basaltos. La presencia en el suelo de los tubos volcánicos de varios fragmentos de roca de distintos tamaños es una evidencia clara de que los procesos de caída son activos.

En la galería de Sobrado superior de la Cueva del Viento se ha acondicionado un tramo de 180 m para ser visitable, y está siendo explotado turísticamente desde hace años. En 1994, previo a la apertura como cueva turística, se realizaron diferentes intervenciones de bulonado con el fin de fijar una serie de bloques en apariencia inestables. Los bulones utilizados fueron de acero de 1 a 2 metros de longitud. Esta actuación se realizó sin ningún estudio previo del macizo rocoso de la cueva, por lo que la decisión de qué bloque bulonar o no, se basó únicamente en la apariencia de inestabilidad de dichos bloques.

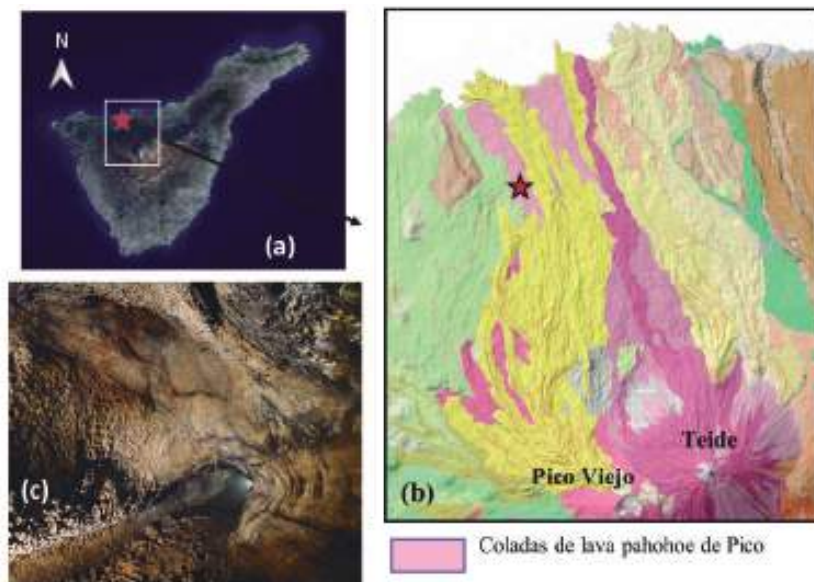


Figura 1. Localización de la Cueva del Viento en la isla de Tenerife (a y b). La estrella roja indica la situación de la boca de la cueva. (b) Mapa geológico de la zona (Mapa Geológico de Canarias, Grafcan). (c) Vista de la sección del tubo volcánico visitable.

Ante la necesidad de conocer la estabilidad actual del tramo visitable, se han realizado una serie de trabajos que justifiquen cualquier actuación que se acometa sobre el macizo rocoso del techo de la cueva. Debido a la experiencia adquirida durante años, relacionada con geomecánica, estabilidad, vigilancia y obras de refuerzos en tubos de lava volcánicos unido a la aplicación cada vez más frecuentes de los sistemas de escaneo láser 3D, con resoluciones milimétricas, en control de túneles, minas, canteras entre otros, se propuso desde un inicio innovar en este estudio de estabilidad, aplicando nubes de puntos 3D. La aplicación del escáner láser 3D con la intención de estudiar el comportamiento a mega y meso escala del macizo rocoso de la Cueva del Viento además ha servido de apoyo para la caracterización geomecánica del macizo rocoso y nos ha proporcionado una buena base topográfica de la cueva.

## Geología local y génesis de la cueva

Las coladas de lavas que dieron origen a este sistema de tubos volcánicos, conocido como Cueva del Viento, tienen su origen en el Edificio Volcánico de Pico Viejo, el cual se encuentra en las faldas suroccidentales del Teide. El edificio volcánico se levanta 1.200 m desde la base de la caldera, con una altura final de 3.134 m s.n.m., con una antigüedad de unos 27.000 años. Es un estratovolcán con pendientes moderadas, por las que descendieron multitud de coladas (figura 1).

El desnivel de todo el tubo volcánico, en el que se encuentra la Cueva del Viento, es de unos 470 metros, con una inclinación media de 11°. Este gradiente es constante y

se mantiene en todos los niveles, aunque ocasionalmente hay pendientes que pueden llegar a 30°.

Las lavas son de tipo pahoehoe (lavas poco viscosas) y los basaltos son plagioclásicos vacuolares (BPLV: código usado en geomecánica para nombrar estos basaltos). La presencia de los cristales de plagioclasas hace aumentar la viscosidad de la lava, pero la pendiente del terreno, así como el hecho de que el flujo de lava fue emitido por varias bocas eruptivas y con altas tasas de efusión, produjo un gran caudal de lava que hizo que estas se comportasen como lavas pahoehoe y que se extendiesen por una amplia zona.

Debido a la elevada proporción de plagioclasas que tiene en su composición y el ser vacuolares, hace que la meteorización actúe con mayor velocidad en los basaltos vacuolares plagioclásicos (BPLV) que en otros basaltos. Si a todo esto se le añade el ambiente húmedo de la cueva, la degradación de la roca por meteorización es elevada.

## **Descripción del macizo rocoso que forma un tubo volcánico**

La roca volcánica tiene una fracturación muy alta, con discontinuidades horizontales, verticales, inclinadas y con huecos. El techo de un tubo volcánico está constituido por un macizo rocoso volcánico originado por el enfriamiento paulatino de un flujo de lava que discurre por un encajante. El flujo de lava se va enfriando a modo de capas de cebollas, que pueden ser de pocos centímetros de espesor hasta 50 cm como media. En este proceso de enfriamiento se producen dos tipos de discontinuidades principales, una horizontal o inclinada que separa una capa de la otra, llamadas capas de acreción, y otras discontinuidades verticales de origen térmico, formadas por retracción, sufrido al enfriarse los materiales lávicos (figura 2).

Por otra parte, a medida que la lava fluye pueden producirse procesos de desgasificación, dando lugar a burbujas que, al enfriarse, quedan como huecos o pequeñas cavidades. En ocasiones, el enfriamiento de la lava en contacto con capas superiores a techo, o con las paredes, puede generar niveles escoriáceos y, en otras, debido a su fluidez forman estructuras de lavas cordadas.,

Por todo lo anterior, al observar en detalle el techo de una cueva volcánica, se puede observar una superficie planar en la que encontramos bloques que parecen estar en mero equilibrio con los adyacentes, bloques cuya única sujeción es el bloque superior, y, en otros casos, bloques de grandes, medias y pequeñas dimensiones, totalmente diferenciados de los adyacentes por fracturas muy abiertas. En otras superficies del techo de la cueva, que a simple vista no presentan fracturaciones preocupantes, dando la impresión de que no hay riesgo de caída, pueden existir bloques de poco espesor y en sus contactos a techo puede existir una fracturación muy abierta, cavidades o escorias. En consecuencia, el techo de una cueva volcánica puede tener una estabilidad muy desigual.

Un macizo rocoso volcánico es clasificado según la resistencia de la roca matriz, el tamaño y forma de los bloques, el índice de cavernosidad, las características de las discontinuidades



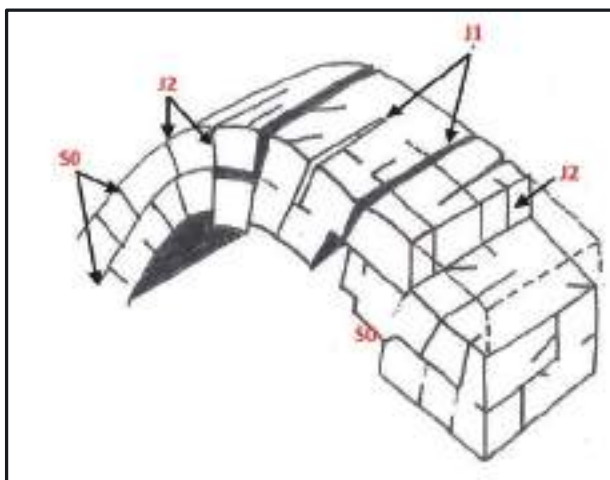


Figura 2. Representación esquemática de un sistema de diaclasado típico de un macizo rocoso de tubo volcánico (tomado de Jordá-Bordehore et al., 2016)

Parámetro	Importancia
Resistencia de la roca matriz	+
Tamaño y forma de los bloques	++
Índice de cavernosidad	++
Características de las discontinuidades	+++++
Presencia de agua	+

Tabla 1. Importancia de distintos parámetros en la clasificación de macizos rocosos volcánicos (Muñiz Menéndez y González-Gallego, 2010)

y la presencia de agua. En la tabla 1, se muestra la importancia de cada parámetro en la clasificación de macizos rocosos volcánicos (Muñiz Menéndez y González-Gallego, 2010).

## Caracterización geomecánica del macizo rocoso del techo de la Cueva del Viento

Para la caracterización geomecánica macizo rocoso de la Cueva del Viento, se diferenciaron tres unidades geomecánicas que coincidían con las diferentes unidades basálticas genéticas diferenciadas en el tubo de lava (figura 3). En una primera fase de trabajo se realizó una campaña de campo en la que se obtuvo toda la información necesaria para caracterizar geomecánicamente cada unidad basáltica. Como novedad en este trabajo, también se han obtenido las mediciones de las discontinuidades, tales como buzamientos, aperturas, persistencia, espaciado, que se han tomado a partir de las nubes de puntos, utilizando los programas Autodesk Recap y el Cloud Compare Stereo. En

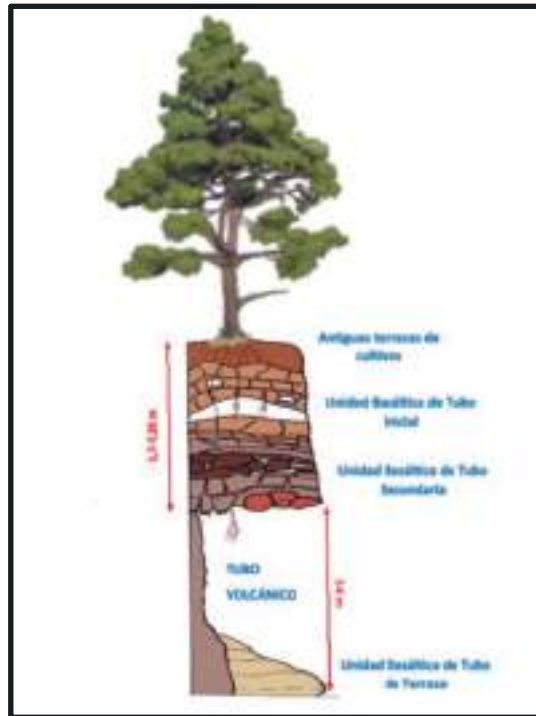
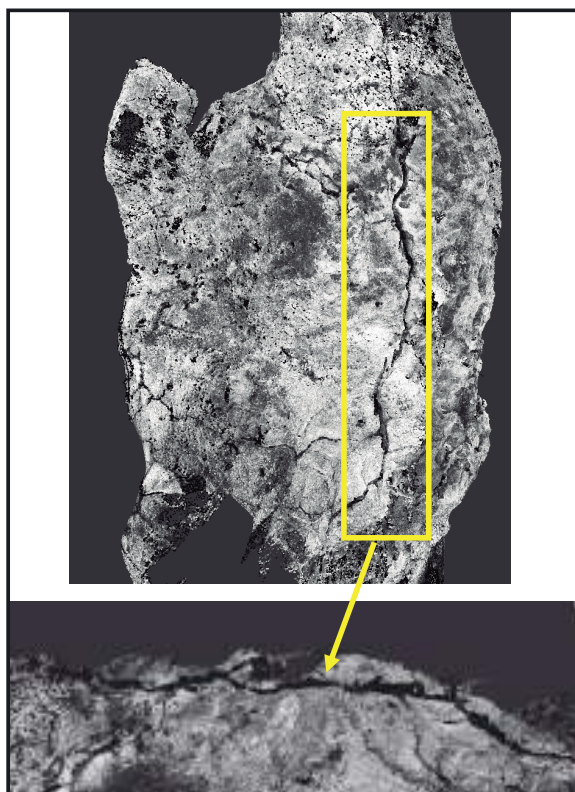


Figura 3. Columna esquemática del tubo volcánico de la Cueva del Viento desde su base hasta la superficie exterior.

algunas discontinuidades se ha podido medir su penetración hacia el interior del macizo rocoso y poder así conocer una potencia mínima de las capas superficiales del techo de la cueva (figura 4).

En este estudio se ha realizado una caracterización geomecánica del macizo rocoso, utilizando los modelos propuestos por Bieniawski para el RMR (Bieniawski, 1993), Barton para el Q (Barton y Freitas de Quadros, 2002) para la toma de datos geomecánicos en cada estación geomecánica y el modelo propuesto por Hoek y Paul Marinos, Geological Strength Index GSI, utilizado para macizos de baja calidad.

Las clasificaciones geomecánicas son limitadas en el caso de macizos rocosos compuestos por sucesiones de coladas de lava (tramos de basaltos vacuolares y masivos fracturados intercalados con tramos de cavidades y de conglomerados de bloques basálticos heterogéneos y escorias), de ahí la dificultad para definir un valor general de confianza de calidad. Por otro lado, utilizamos una metodología empírica aceptada internacionalmente, pero estas clasificaciones no tienen en cuenta las dimensiones del talud (altura y anchura) y han sido definidas para estudiar la estabilidad de un macizo rocoso sobre el que se va a efectuar unas actuaciones, tales como excavación de minas, de taludes, túneles y carreteras. Pero en ninguna se considera un macizo rocoso volcánico



*Figura 4. Imagen 3D de una zona de la cueva con una fractura métrica. En la imagen se observa como los rayos láser han penetrado por la fractura, permitiendo estimar la penetración en la misma y conocer el espesor aproximado del bloque delimitado por la fractura.*

de tubo en equilibrio natural desde hace miles de años y sobre el que no se va a realizar ningún tipo de excavación de su macizo rocoso con medios mecánicos.

Además, la formación de un tubo de lava se debe al enfriamiento diferencial de un flujo de lava, con lo que la estructura del macizo rocoso es muy diferente a cualquier otro macizo rocoso natural tanto ígneo, plutónico, metamórfico y sedimentario. En pocos metros dentro de un mismo tubo nos encontramos zonas relativamente estables y zonas con signos de inestabilidad con desmoronamiento de bloques del techo y losas desprendidas en las paredes.

Todos los métodos de clasificación geomecánica aplicados, han dado como resultado que la calidad que presenta el macizo rocoso de la Cueva del Viento es muy heterogénea, pero a la hora de sacar un valor medio de todos los resultados obtenemos una calidad del macizo rocoso de mala a muy mala, lo cual sitúa al macizo en un punto de inestabilidad según la metodología utilizada. Estos resultados, si los aplicamos como si estuviésemos en una obra subterránea artificial, indican que se debería colocar sostenimiento en todo el tramo visitado. Sin embargo, nos encontramos con un dilema, cualquier actuación que se realice sobre el macizo rocoso volcánico de tubo puede afectar a un equilibrio natural

de sostenimiento existente desde su enfriamiento, además de dañar estéticamente la cueva.

## Levantamiento topográfico y escaneo 3D

Para el levantamiento topográfico y el escaneo 3D se utilizaron un escaner Láser Leica RTC360 y GeoMax Zoom90 BRO 838532 1015 en LR. Al ejecutar el escaneo inicial se realizó un levantamiento topográfico del interior de la cueva, trasladando posteriormente las coordenadas del trazado del interior a la superficie, determinando así con la mayor



*Figura 5. Trazado en superficie de la Cueva del Viento (izquierda). Situación en la isla de Tenerife (arriba).*

exactitud posible la ubicación del tubo en superficie y espesor existente desde el techo de la cueva a la superficie. Esto nos ha permitido conocer con exactitud el espesor de la montera de la cueva y su trazado en superficie (figuras 5 y 6).

El resultado de esta combinación de escaneo y levantamiento topográfico ha sido un modelo 3D de la cueva con las coordenadas UTM, del que se han obtenido secciones transversales cada dos metros y planos 2D, a una escala 1:100, para ser usados como base de trabajo para la cartografía geológica y geomorfológica, y como plano de referencia del interior de la cueva. Aunque el plano base se sacó a escala 1:100, se presentó también un topográfico completo a 1:20, de toda la cueva (figura 7).

La clasificación geomecánica de un macizo rocoso es necesaria para tomar decisiones de actuación en algunas zonas de la cueva. Pero si únicamente consideramos este resultado, el techo de la cueva estaría tapizado con bulones cada metro y malla metálica. La seguridad del visitante y del personal laboral es importante, pero conservar la estética natural de la

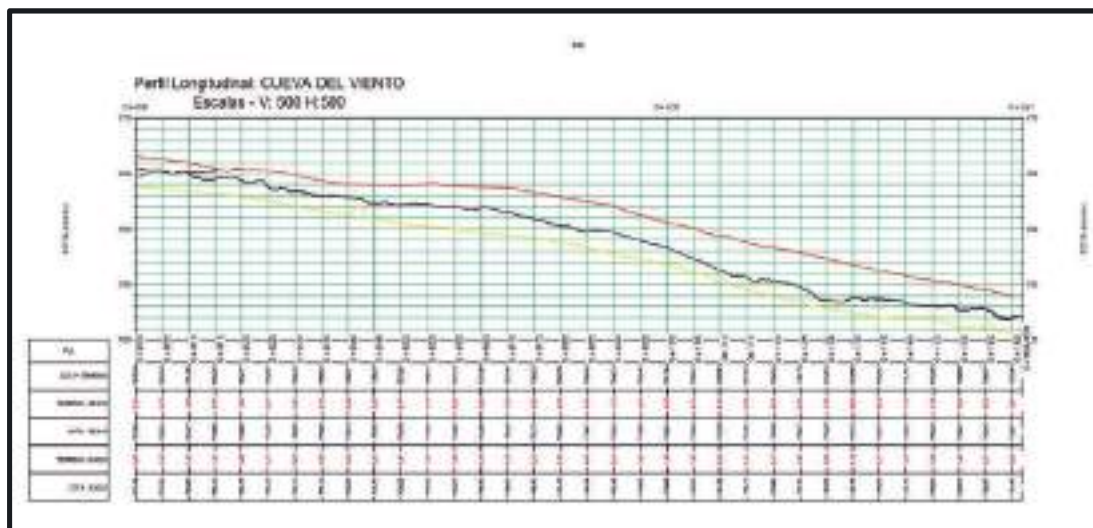


Figura 6. Perfil longitudinal de la cueva y espesor del macizo rocoso desde techo a superficie.

cueva también lo es. Por ello, aplicar el sistema de monitoreo periódico con escáner láser 3D puede ser un método de vigilancia de la estabilidad del macizo rocoso muy eficaz, ofreciendo una total garantía de seguridad. Mientras se esté aplicando un método de vigilancia fiable de la estabilidad de un macizo rocoso y no se obtenga resultados de inestabilidad, no será necesario actuar sobre este, lo cual a su vez contribuirá a mantener su equilibrio natural.

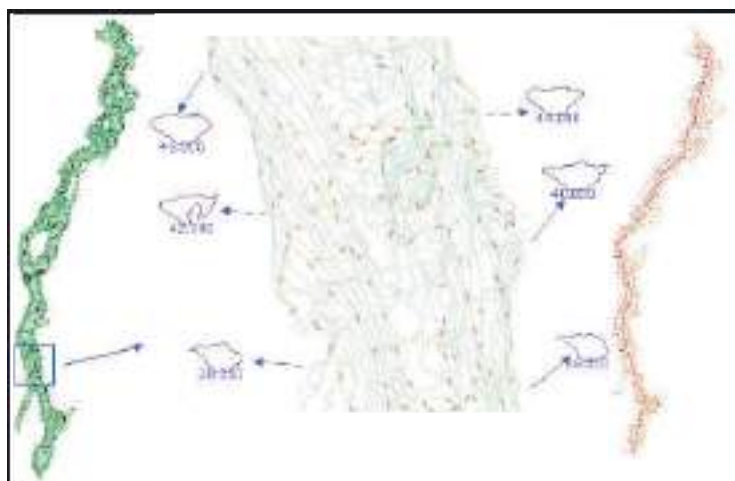
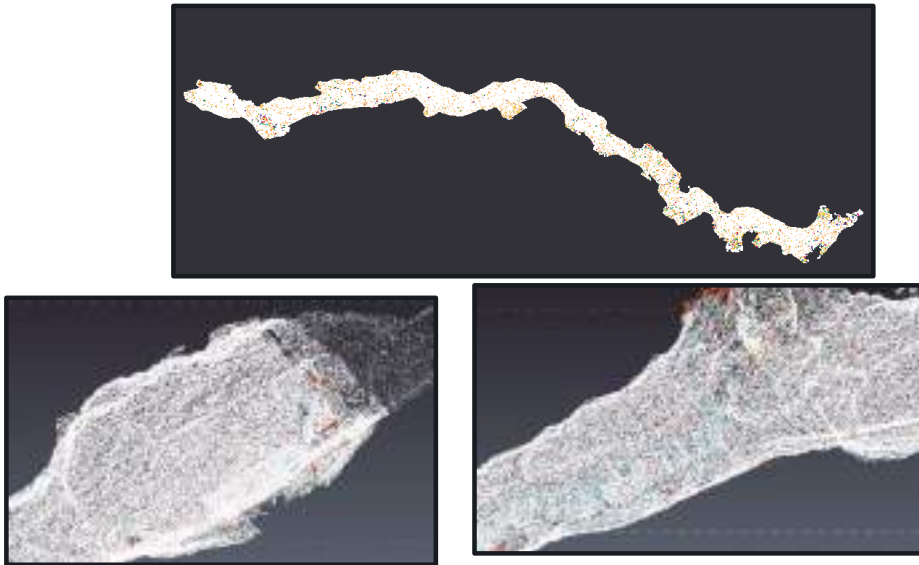


Figura 7. Plano topográfico de la cueva, con curvas de nivel cada 20 cm a izquierda y cada 100 cm a derecha, secciones cada 2 metros, obtenido a partir del levantamiento topográfico del interior de la cueva y la nube de puntos 3D. Monitoreo con escáner láser 3D y manual.

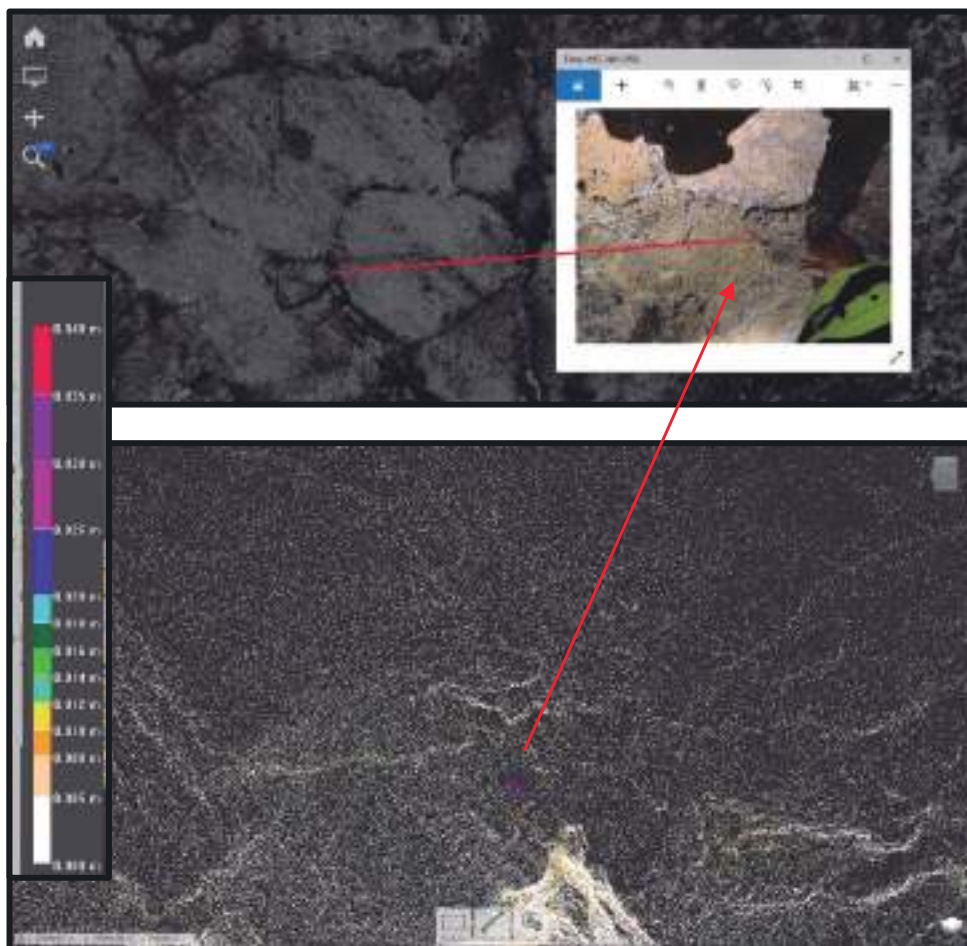


*Figura 8. Comparativa de la nube inicial y nube 7. Arriba, la planta superior de toda la cueva. Abajo, dos zonas ampliadas.*

Entre octubre de 2020 y mayo de 2021 se acometió un monitoreo periódico del macizo rocoso del tramo visitable de la Cueva del Viento, que consistió en realizar nubes de puntos mensuales que se fueron superponiendo siempre con la inicial. El escaneo se ha realizado a una velocidad de 1.000.000 de puntos/segundos, con una densidad media de un punto cada 6 mm a 10 metros y un punto cada 2 mm a 5 metros. El primer escaneo dio lugar a una primera nube de puntos, llamada nube 1 o inicial, la cual se ha utilizado posteriormente para superponer las siguientes nubes y hacer comparativas. El objetivo de estas comparativas de las nubes de puntos sucesivas con la número uno es comprobar si el macizo rocoso muestra señales de inestabilidad, principalmente a mega y meso-escala (figura 8).

La comparativa hecha entre el inicial y el último escaneo de mayo de 2021, prácticamente algo más de seis meses, muestra a grandes rasgos una muy buena estabilidad del macizo rocoso de toda la cueva. No se detectó ningún tipo de anomalía que indicase riesgo de caídas de bloques a mega o meso-escala.

Al comprobar la estabilidad de la cueva durante los primeros meses y una vez que se había determinado que el macizo rocoso del techo de la cueva no mostraba signos de posibles caídas de grandes bloques, se inició un monitoreo manual del techo ya que, aun no existiendo riesgo de colapso, el riesgo de caída de bloques de pequeñas dimensiones (<20 cm) sí es posible. El monitoreo manual se inició previo al último escaneo programado en este estudio con el fin de comprobar la fiabilidad de los resultados que se estaban obteniendo. Esto es, al retirar durante la limpieza manual un gran número de fragmentos de bloques de pequeño tamaño, estos deberían ser detectados como anomalías en la comparativa de las nubes de puntos inicial y última (figura 9).



*Figura 9. Arriba imagen tomada de la nube de puntos 1 o inicial y foto del momento de la retirada de un fragmento de roca debido a que presentaba riesgo de caída inminente durante la revisión manual efectuada en la cueva el día 18 de marzo del 2021. Abajo imagen de la comparativa de nubes 1-7, donde se aprecia la anomalía en la nube de puntos, en colores, tras la retirada de la roca que se muestra en la imagen superior. Por otro lado, los puntos blancos nos muestran estabilidad de ese macizo rocoso. Abajo a la izquierda escala de colores/mm de movimiento.*

Los resultados obtenidos con las comparativas de nubes de puntos, de resolución milimétrica, pusieron de manifiesto la gran capacidad de detección de movimientos de grandes, medianos, e incluso pequeños bloques, con este proceso de monitoreo. Al analizar la última comparativa de esta primera fase, se pudo detectar la huella dejada por los fragmentos de roca que se habían retirado en el proceso de mantenimiento manual (figura 9).

Es importante resaltar que para comprender y analizar las comparativas hay que conocer muy bien el macizo rocoso objeto de estudio, ya que son muchas las zonas de sombras, fracturas y cavidades pequeñas que pueden generar conclusiones erróneas.

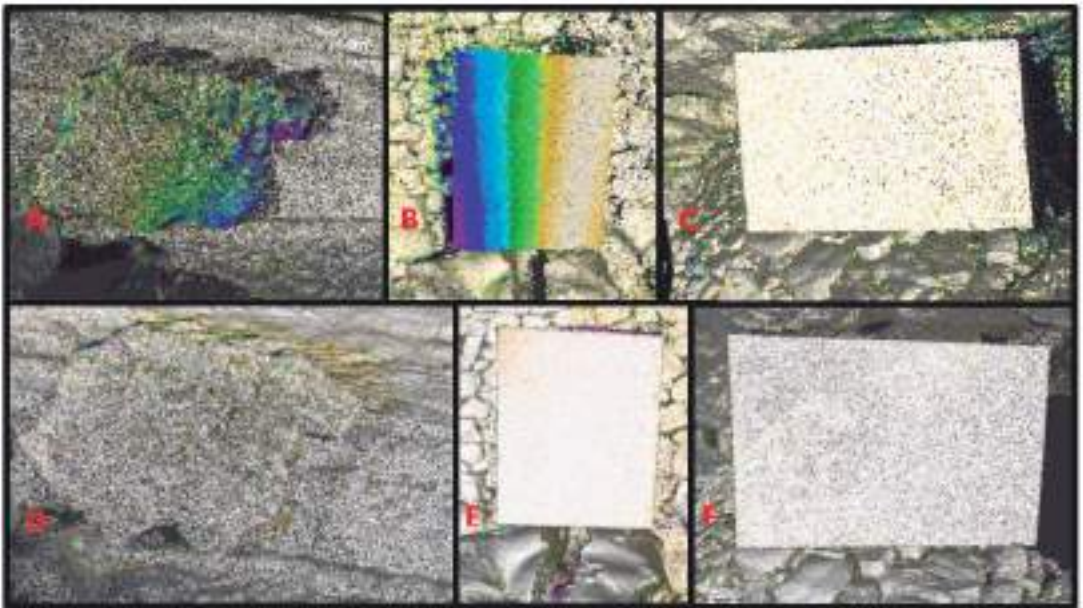


Figura 10. Las imágenes A, B y C son imágenes tomadas de la última comparativa de nubes de punto (nube inicial y nube de puntos hecha en febrero del 2022) y las imágenes D, E y F son tomada de la comparativa de nubes de puntos 1 y 7 (octubre del 2020 y mayo del 2021). A y D nos indica que el bloque ha sido movido en el periodo de tiempo transcurrido entre mayo del 2021 y febrero del 2022, B y E nos muestra que ese panel se ha movido también, mientras que podemos observar como el panel de las fotos C y F no muestra ninguna anomalía que indique un movimiento de este. La escala de colores/Imm movimiento, se muestra en la figura 9.



## Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos del Estudio Geológico, Geotécnico y Geomorfológico, así como de las comparativas de nubes de puntos realizadas durante seis meses entre 2020 y 2021, se recomendó continuar aplicando este método de vigilancia para la estabilidad del macizo rocoso de la Cueva del Viento. De esta forma, se debían realizar al menos dos escaneos 3D en el año, aplicando mensualmente una vigilancia manual del techo.

En febrero del 2022 se retomó este proceso de vigilancia, volviendo a realizarse una nueva nube de puntos, pasado unos nueve meses de la última. Esta nueva nube se ha superpuesto a la inicial y los resultados de dicha comparativa continua mostrando estabilidad a grandes rasgos; además, como curiosidad (figura 10), ha puesto en evidencia numerosas anomalías que se corresponden con la retirada manual de pequeños fragmentos del techo y con algunas actuaciones hechas por el personal de mantenimiento.

Después de más de un año y medio aplicando las comparativas de nubes de puntos 3D en la vigilancia del macizo rocoso de la Cueva del Viento, añadido a un control manual mensual del techo de la cueva, se puede garantizar la inexistencia de movimientos de bloques del techo que pudiesen terminar en colapso, estando injustificado bulonar es en algunas zonas del techo de la cueva.

Este método es totalmente experimental y no existe bibliografía sobre su aplicación en cuevas volcánicas, por lo que todo lo obtenido es innovador en la vigilancia de cuevas volcánicas turísticas, contribuyendo a no alterar un equilibrio natural del macizo rocoso mantenido durante miles de años. A raíz de los resultados obtenidos, es importante asumir que el riesgo cero en una cueva, no existe.

## Referencias

- Carracedo, J.C. (Coord.) (2006). *Los Volcanes del Parque Nacional del Teide: El Teide, Pico Viejo y las dorsales activas de Tenerife*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, 388 pp.
- Carracedo, J. C. (2008). *El Teide y las Dorsales de Tenerife: un sistema volcánico interactivo*. Itinerarios geológicos por las Islas Canarias, Fuerteventura, Tenerife y La Palma. Sociedad Geológica de España, 115-181.
- Hernández Gutiérrez, L.E. (2014). *Caracterización geomecánica de las rocas volcánicas de las Islas Canarias*. Tesis Doctoral, Departamento de Biología Animal, Edafología y Geología de la Universidad de La Laguna.
- Hernández Gutiérrez, L.E., Santamarta Cerezal, J.C. (Eds.) (2015). *Ingeniería Geológica en Terrenos Volcánicos: Métodos, técnicas y Experiencias en las Islas Canarias*. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos. ISBN: 978-84-608-5072-4
- Jordá Bordehore, L., Toulkeridis, T., Romero-Crespo, P.L., Jorda-Bordehore, R., García-Garizabal, I. (2016). Stability assessment of volcanic lava tubes in the Galápagos using engineering rock mass classifications and an empirical approach. *International Journal of rock mechanics and mining sciences*, 89, 55-67.
- Muñiz Menéndez, M. (2009). *Clasificaciones geomecánicas en rocas volcánicas*. Máster en Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica. Cedex.
- Signorelli, S. (2007). *The Jameos del Agua cave (Lanzarote, Canary Islands): Some morphological and geological features of a spectacular lava tube adapted to auditorium*. International Workshop on volcanic rocks, Workshop W2-11th Congress ISRM, Ponta Delgada, Azores, Portugal.
- Socorro, S. (2009). *Cavidades volcánicas de Canarias, tipos y génesis*. Libro de Actas V Semana Científica Telesforo Bravo, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz, Tenerife.



## Las cuevas como recurso biotecnológico

José Luis GONZÁLEZ PIMENTEL <sup>(1)</sup>, Irene DOMÍNGUEZ MOÑINO <sup>(2)</sup>,  
Leonila LAIZ TROBAJO <sup>(2)</sup>, Bernardo HERMOSÍN CAMPOS <sup>(2)</sup>, Ana Teresa CALDEIRA <sup>(1)</sup>,  
Valme JURADO LOBO <sup>(2)</sup>, Cesáreo SAIZ JIMÉNEZ <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Laboratório HERCULES, Universidade de Évora. Portugal. pimentel@uevora.pt, atc@uevora.pt

<sup>(2)</sup> Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología, IRNAS-CSIC. Sevilla. idominguez@irnase.csic.es,  
vjurado@irnase.csic.es, hermosin@irnase.csic.es, leo@irnase.csic.es, saiz@irnase.csic.es

---

### Resumen

Las cuevas vienen siendo estudiadas desde diversos puntos de vistas: ambiental, geológico, geoquímico, microbiológico, turístico, etc. Sin embargo, las cuevas y otros ambientes subterráneos han sido poco explorados desde el punto de vista biotecnológico, aunque representan nichos ecológicos indispensables que podrían ofrecer nuevas moléculas de interés para la medicina y la farmacología. Se han investigado las bacterias de diversas cuevas de la Península Ibérica, así como de las Islas Canarias para comprobar su bioactividad. Entre ellas, han mostrado un interesante potencial antimicrobiano algunas de las bacterias aisladas de la Cueva de Altamira. Los análisis *in vitro* e *in silico* mostraron la inhibición de bacterias patógenas Gram- positivas, Gram-negativas y hongos. El interés de esta investigación se apoya en la conocida resistencia de las bacterias patógenas a los antimicrobianos, lo que se ha convertido en un problema mundial en las últimas décadas. Nuestros datos muestran la presencia de bacterias productoras de compuestos antimicrobianos en ambientes subterráneos; y el estudio de sus genomas indicarían la existencia de genes implicados en la síntesis de nuevos compuestos.

**Palabras clave:** Cueva de Altamira, compuestos antimicrobianos, *Crossiella*, *Pseudomonas*, predicción de genes.

## ***Caves as a biotechnological resource***

### ***Abstract***

*The caves have been studied from various points of view: environmental, geological, geochemical, microbiological, tourist, etc. However, caves and other subterranean environments have been little explored from a biotechnological point of view, although they represent essential ecological niches that could offer new molecules of interest for medicine and pharmacology. Bacteria from various caves from the Iberian Peninsula, as well as the Canary Islands, have been investigated to verify their bioactivity. Among them, some of the bacteria isolated from the Altamira Cave have shown an interesting antimicrobial potential. In vitro and in silico analyses showed inhibition of Gram-positive and Gram-negative pathogenic bacteria, and fungi. The interest of this research is based on the known resistance of pathogenic bacteria to antimicrobials, which has become a*

*global problem in recent decades. Our data show the presence of bacteria that produce antimicrobial compounds in subterranean environments and the study of their genome would indicate the existence of genes involved in the synthesis of new compounds.*

**Keywords:** *Altamira Cave, antimicrobial compounds, Crossiella, Pseudomonas, gene prediction*

## Introducción

Las cuevas son lugares de notable interés geológico, ecológico y cultural, con diversos compartimentos que difieren en su composición física, química y microbiana. La colonización microbiana en cuevas es un proceso complejo y dinámico que está controlado por factores ambientales y fisicoquímicos (temperatura, CO<sub>2</sub>, disponibilidad de nutrientes, iluminación, etc.). Las cuevas también son reservorios de biodiversidad y cada año se descubren varias decenas de nuevas especies de bacterias. El estudio del metabolismo de esas nuevas especies de bacterias constituye una línea de trabajo de particular interés, por cuanto las bacterias sintetizan y excretan metabolitos, de potencial utilidad en biotecnología, entre los que se encuentran enzimas, antibióticos y otros compuestos bioactivos o antimicrobianos.

La búsqueda de nuevos antibióticos es un tema de investigación que data de los años 40 del pasado siglo. Waksman y colaboradores (Schatz *et al.*, 1944) fueron pioneros en la investigación de las bacterias aisladas del suelo como productoras de compuestos antimicrobianos (CAs). Una década después, la investigación se centró en la búsqueda de CAs en organismos marinos (Bergmann *et al.*, 1955). En la actualidad, se han identificado un número considerable de CAs a partir de microorganismos terrestres y acuáticos (Rangseekaew y Pathom-aree, 2019; Sharma y Thakur, 2020; McCauley *et al.*, 2020).

El subsuelo y los ambientes subterráneos son hábitats relativamente poco estudiados, y la exploración de cuevas como fuente de CAs es relativamente reciente. Groth *et al.* (1999) sugirieron que las cuevas parecían ser un nicho prometedor para encontrar actinobacterias que produjeran nuevos CAs. Esta hipótesis se confirmó unos años más tarde con el descubrimiento de un grupo de cervimicinas producidas por la bacteria *Streptomyces tendae*, aislada de la Grotta dei Cervi en Italia (Groth *et al.* 2001; Herold *et al.* 2005).

En general, la mayoría de las cuevas existentes en el planeta están inexploradas o rara vez son visitadas por humanos. En estas se podrían aislar taxones nuevos o raros de bacterias (Rangseekaew y Pathom-aree, 2019). Esto también se extiende a las cuevas turísticas andaluzas y con un elevado número de visitantes (Calaforra y Berrocal, 2008) o del norte de España (Groth *et al.* 1999).

Gohain *et al.* (2020) publicaron una lista de especies de actinobacterias que produjeron más de 60 CAs diferentes, y Zada *et al.* (2021) aportaron una lista de 20 CAs sintetizados por bacterias de cuevas, de las cuales 12 fueron producidos por especies de *Streptomyces*,

seis por especies de *Paenibacillus* y una por *Bacillus licheniformis* y *Nonomuraea specus*. Estos datos indican la importancia de las bacterias de cuevas como productoras de CAs.

La Organización Mundial de la Salud ha alertado sobre la necesidad de encontrar nuevos antibióticos eficaces frente a las bacterias multirresistentes (WHO, 2017). En los últimos años, se ha observado un creciente interés en los CAs producidos por microorganismos que habitan en cuevas (Nakaew *et al.*, 2009; Yasir, 2018; Wischart *et al.*, 2019; Paun *et al.*, 2021). La gran mayoría de los artículos publicados por estos y otros autores fueron trabajos descriptivos sobre el aislamiento de cepas de bacterias de cuevas que se examinaron para determinar sus propiedades antimicrobianas frente a otros patógenos, pero sin llegar a identificar químicamente los CAs implicados en el proceso.

Una forma de contrarrestar la falta de estudios sobre los CAs es caracterizar el genoma bacteriano de las bacterias aisladas de cuevas a través de la predicción de genes y anotaciones funcionales. Esto permite centrarse en bacterias con grupos de genes de interés. En el estudio efectuado sobre distintas cuevas españolas se han encontrado especies de bacterias interesantes que animan a seguir esta línea de investigación, por las perspectivas que abre para la industria farmacológica y la medicina.

## Materiales y métodos

### *Muestreo, aislamiento e identificación de bacterias*

Para este estudio se muestrearon algunas cuevas de la Península Ibérica y cuevas volcánicas canarias, cuya localización se detalla en la figura 1. Se tomaron muestras de espeleotemas, biopelículas, y sedimentos y se depositaron en tubos estériles, manteniéndose a 5 °C hasta su llegada al laboratorio. Posteriormente, fueron inmediatamente procesadas mediante



Figura 1. Cuevas muestreadas en España en búsqueda de compuestos antimicrobianos (CAs). Se estudiaron siete cuevas de cuatro comunidades autónomas. El número total de cepas estudiadas por región se representa en color azul. Los círculos representan el número de cepas ensayadas (círculo externo) y las cepas con propiedades antimicrobianas (círculo interno).

suspensión en solución salina e inoculación en un medio de tripticasa-soja-agar (TSA) para aislar las bacterias. Los cultivos se incubaron a 28 °C durante varias semanas para permitir el crecimiento de cepas de crecimiento lento.

Las muestras de aire de las cuevas se recolectaron utilizando un muestreador Surface Air System de gran volumen (Duo SAS, modelo Super 360, International pBI, Milán, Italia). Las muestras se tomaron por duplicado y el volumen de aire filtrado se fijó en 100 L (Domínguez -Moñino *et al.*, 2021a). El medio de cultivo fue TSA, y las placas se incubaron a 28 °C. Se aislaron colonias morfológicamente diferentes. La identificación bacteriana se llevó a cabo mediante la secuenciación del gen del ARN ribosomal (ARNr) 16S (Domínguez-Moñino *et al.*, 2021a). La identificación de taxones relacionados filogenéticamente se determinó mediante el algoritmo de alineación global, utilizando la base de datos EzBioCloud (Yoon *et al.*, 2017). El número de cepas analizadas de cada cueva y la actividad frente a bacterias patógenas se muestran en las figuras 2 y 3.

### *Ensayos de inhibición de bacterias y hongos*

Para poder determinar la capacidad antimicrobiana de las bacterias ensayadas, se propuso un ensayo inicial para el cribado inicial de bacterias con bioactividad basado en una adaptación del método "Oxford cup". Las cepas estudiadas fueron cultivadas en placas de agar nutritivo (NA) con 2% de glicerol e incubadas un mínimo de 24 horas, a 30 °C, dependiendo del crecimiento de cada bacteria. Una vez crecidas, se recogieron secciones de 0,4 cm con un sacabocado y se depositaron en una placa de cultivo de TSA, con cada una de las bacterias patógenas incluidas en el cultivo. En resumen, el método siguió los siguientes pasos: Cada bacteria patógena fue cultivada en 7 mL de caldo tripticasa-soja a 30 °C y 180 rpm entre 18-24 horas, hasta alcanzar un crecimiento del cultivo igual al estándar n° 2 de McFarland. Este cultivo se añadió a un volumen de 30 mL de TSA, esterilizado a una temperatura cercana a la solidificación del medio (45-50 °C). Una vez las placas se solidificaron, se depositaron las secciones de 0,4 cm de biomasa de los cultivos de las bacterias a ensayar y se cultivaron durante 24 horas a 30 °C. Las bacterias que presentaron actividad inhibiendo el crecimiento de las patógenas, fueron seleccionadas para un ensayo posterior en medio líquido.

Las cepas se cultivaron en frascos con 150 mL de caldo nutritivo con 2% de glicerol (v/v), a 30 °C y 180 rpm, ya que el glicerol como fuente de carbono promueve la síntesis de antibióticos en actinomicetos (Jonsbu *et al.*, 2002; Saudagar y Singhal, 2007). Después de la incubación, los cultivos se filtraron a través de un filtro de policarbonato con un tamaño de poro de 0,22 µm y los extractos se analizaron para determinar su actividad antibacteriana. Las bacterias patógenas utilizadas en esta prueba fueron *Bacillus cereus* CECT 148, *Staphylococcus aureus* CECT 4630, *Escherichia coli* DSM 105182, *Pseudomonas aeruginosa* CECT 110 y *Acinetobacter baumannii* DSM 30007. Además, se agregó a la prueba una bacteria ambiental, *Arthrobacter sp.*, por su baja resistencia antimicrobiana. Se prepararon suspensiones de bacterias patógenas en solución salina estéril al 0,9 % (p/v) y se ajustaron a 0,5 unidades McFarland utilizando un densitómetro DEN-1B (BioSan SIA, Riga, Latvia). El ensayo inhibitorio se llevó a cabo por duplicado en un dispositivo de microplacas SPECTROstar Nano (BMG Labtech, Ortenberg, Alemania). Las microplacas

se sometieron a agitación orbital a 500 rpm, a 30 °C durante 24 horas y los datos se registraron cada 30 minutos.

El ensayo de inhibición del crecimiento fúngico se llevó a cabo en un cultivo sólido de agar nutritivo-glicerol, una metodología similar a la utilizada por Kerr (1999). La biomasa de las cepas Cross-1 y Cross-2 se esparció sobre agar en forma de zigzag y se incubó a 30 °C durante 24 horas, antes de la inoculación de las especies fúngicas. Una vez inoculados los hongos, las placas se incubaron a 25 °C durante 28 días. Las especies de hongos utilizadas en este ensayo se aislaron previamente de cuevas e incluyeron *Aspergillus versicolor*, *Penicillium chrysogenum*, *Cladosporium cladosporioides*, *Fusarium solani* y *Ochroconis lascauxensis* (Martin-Sánchez et al., 2012; Domínguez-Moñino et al. 2021b; Sánchez-Moral et al. 2021).

### Análisis genómico

El ADN extraído para el estudio del genoma completo de las bacterias fue secuenciado por Macrogen Inc. (Seúl, Corea del Sur) para lecturas cortas (Illumina 150 PE), utilizando un secuenciador NovaSeq 6000 (Illumina, EE.UU.) y TruSeq DNA PCR-free para la construcción de bibliotecas. El ensamblaje de novo se realizó con SPAdes (Prjibelski et al., 2020), utilizando las lecturas sin procesar. La comparación del genoma por pares se llevó

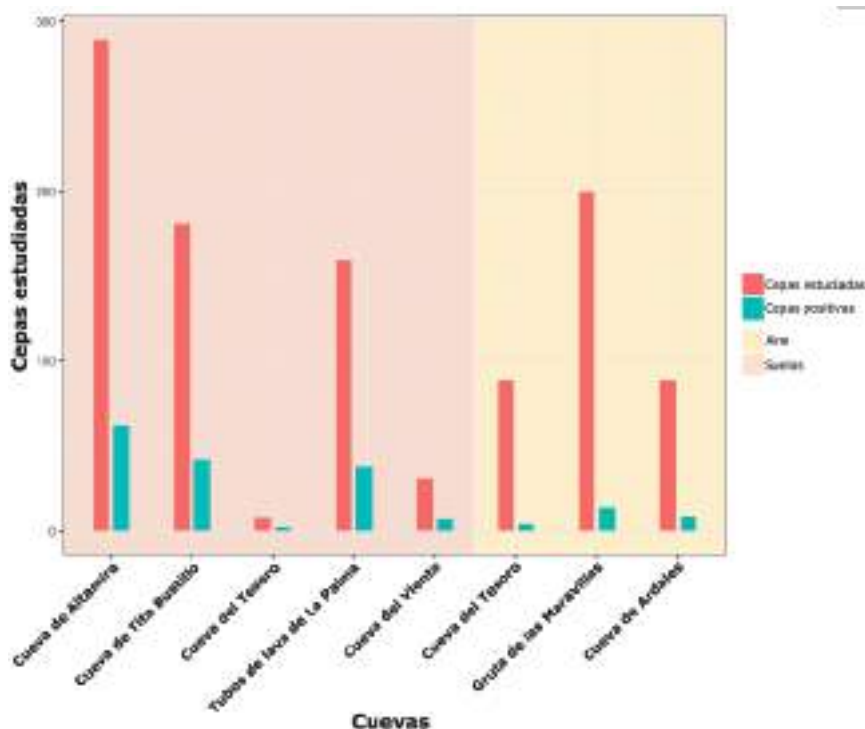


Figura 2. Número de cepas estudiadas por cueva y número de cepas productoras de compuestos antimicrobianos (CAs).

a cabo utilizando la herramienta web JSpeciesWS (Richter *et al.*, 2016). Se implementó la búsqueda de correlación Tetra (TCS) para buscar los genomas más cercanos, que se acoplaron junto con las cepas Cross-1 y Cross-2 para calcular la identidad promedio de nucleótidos con los algoritmos BLAST (ANiB) y MUMmer (ANIm). La caracterización funcional de los genes se obtuvo utilizando Prokka (Seemann, 2014) y antiSMASH 6.0 en modo "estricto" y activadas todas las funciones adicionales para la extracción automatizada del genoma del metabolismo secundario (Blin *et al.*, 2021). Los grupos de genes previstos incluidos en el metabolismo secundario se anotaron con la base de datos UniProtKB utilizando BLAST.

Los números de acceso GenBank/EMBL/DDBJ secuencias del gen 16S rRNA de las cepas de *Crossiella*, Cross-1 y Cross-2 fueron ON669108 y ON669109, respectivamente. Los datos de secuenciación generados en este estudio se depositaron en el Centro Nacional de Información Biotecnológica (NCBI) con el número de ID de BioProyecto PRJNA769239. El proyecto de genoma completo se depositó en DDBJ/ENA/GenBank con los números de acceso JALMDJ000000000 y JALMDK000000000, para *Crossiella*, cepas Cross-1 y Cross-2, respectivamente.

## Resultados y discusión

Se han muestreado cuevas kársticas en la Península Ibérica, así como cuevas volcánicas en las Islas Canarias (figura 1). Los diferentes muestreos arrojaron un total de 1047 bacterias, que se ensayaron para comprobar su actividad antimicrobiana (tabla 1). El número de bacterias productoras de CAs fue notable, no solo en las cuevas de la Península Ibérica, sino también en cuevas volcánicas ubicadas en las Islas Canarias (figura 1). Estos datos sugieren el interés por explorar las cuevas kársticas y volcánicas en busca de CAs.

Origen	Cepas ensayadas	Cepas positivas (%)	1	2	3	4	5	6
Sedimentos	669	151 (22.57)	119	97	129	26	51	32
Aire	378	27 (7.14)	8	5	23	1	2	2
<b>Total (%)</b>	<b>1047</b>	<b>178 (17.00)</b>	<b>127</b>	<b>102</b>	<b>152</b>	<b>27</b>	<b>53</b>	<b>34</b>

Tabla 1. Bacterias de cuevas productoras de compuestos antimicrobianos (CAs) frente a bacterias patógenas. 1: *Bacillus cereus* CECT 148; 2: *Staphylococcus aureus* CECT 4630; 3: *Arthrobacter* sp. LR384284; 4: *Pseudomonas aeruginosa* CECT 110; 5: *Escherichia coli* DSM 105182; 6: *Acinetobacter baumannii* DSM 300007.

### La Cueva de Altamira

Altamira, la cueva española arqueológicamente más famosa, fue descubierta en 1868 y contiene arte rupestre atribuido al Paleolítico Superior. Las primeras excavaciones de principios del siglo XX en Altamira, así como posteriores trabajos de consolidación por el derrumbe de los bloques de roca del techo, la instalación de iluminación artificial y las visitas masivas, alteraron el ecosistema original y deterioraron las pinturas. De hecho, en 1973 se registraron hasta 175.000 visitantes. Como consecuencia, la cueva tuvo que ser clausurada en 1977, reabierta en 1982 y clausurada de nuevo en 2002, debido a la



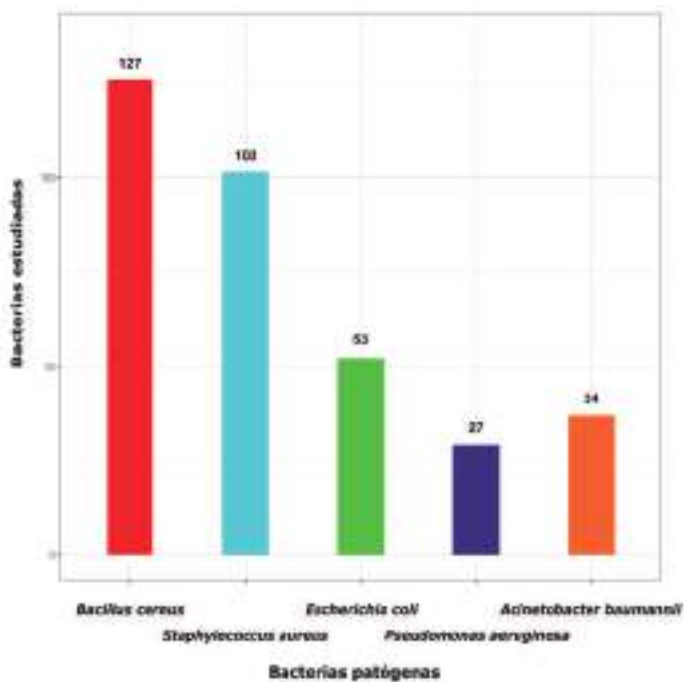


Figura 3. Número de cepas con actividad antimicrobiana frente a las distintas bacterias patógenas.

contaminación de la Sala de Polícromos y sus pinturas por microorganismos fototróficos (cianobacterias y algas) (Saiz-Jiménez *et al.*, 2011).

De los numerosos estudios efectuados en la Cueva de Altamira, muchos de ellos recogidos por Sánchez-Moral (2014) en su monografía, el hallazgo más intrigante fue la ausencia de hongos en las paredes de la cueva, a pesar de la alta concentración de esporas de hongos medidas en el aire, que ascendió a 390 UFC/m<sup>3</sup> en la Sala de Polícromos (García- Antón *et al.*, 2014). Esto se atribuyó a las actinobacterias que proliferan en sus paredes, como *Actinomadura*, *Amycolatopsis*, *Nocardia*, *Micromonospora*, *Rhodococcus* y *Streptomyces* (Groth *et al.*, 1999; Sánchez-Moral *et al.*, 2014), que producen CAs con propiedades antifúngicas. La mayoría de estas bacterias se aislaron de colonias blancas distribuidas por toda la cueva. Por lo tanto, la ausencia de hongos en las paredes de la Cueva de Altamira no fue sorprendente, y la conclusión fue que el microbioma original de la cueva protegía a Altamira de una recolonización por hongos procedentes del exterior y transportados por el aire.

De todas las bacterias aisladas en las distintas cuevas con propiedades antimicrobianas se seleccionaron dos cepas de *Crossiella* (Cross-1 y Cross-2), procedentes de la Cueva de Altamira, para su posterior análisis. Estas cepas presentaron una destacada capacidad para inhibir el crecimiento de todas las bacterias patógenas ensayadas, así como de los hongos utilizados.

Una vez se observó la capacidad de ambas cepas de *Crossiella* para producir CAs, se procedió a su identificación taxonómica, inicialmente a través de la amplificación y secuenciación del

ANib \ ANIm	1	2	3	4	5	6	7	8
1	100	99.97	93.13	71.11	70.73	71.19	79.84	72.07
2	99.99	100	93.07	71.19	70.66	71.20	79.84	72.08
3	92.81	92.81	100	71.14	70.75	71.15	79.51	72.20
4	71.43	71.42	71.52	100	75.25	75.61	71.18	72.00
5	71.27	71.27	71.31	75.81	100	74.78	71.11	71.89
6	71.17	71.16	71.20	75.41	74.07	100	71.27	71.48
7	80.51	80.52	80.21	71.28	70.82	71.47	100	72.47
8	70.02	72.03	72.10	71.76	71.27	71.51	72.00	100

Tabla 2. Comparación de genomas por pares de las cepas Cross-1 y Cross-2 con las especies filogenéticamente más cercanas mediante la Identidad de Nucleótidos Promedio utilizando los algoritmos BLAST (ANib) y Mummer (ANIm). 1: Cepa Cross-1; 2: Cepa Cross-2; 3: *Crossiella cryophila* DSM 44230T; 4: *Amycolatopsis nigrescens* CSC177a- 90T; 5: *Amycolatopsis cihanbeyliensis* DSM 45679T; 6: *Amycolatopsis magusensis* DSM 45510T; 7: *Crossiella equi* NRRL B-24104T 8: *Kutzneria albida* DSM 43870T.

gen ARN ribosómico 16S, y posterior alineamiento de la secuencia con las de las bacterias más cercanas disponibles en la base de datos. Se identificó a *Crossiella cryophila* como la especie más cercana, con un 99,70% de similitud, seguida de *Crossiella equi*, con un 98,87% de similitud. *Crossiella cryophila*, originalmente descrita como *Nocardiopsis mutabilis* subespecie *cryophilis*, es la especie tipo del género *Crossiella*. Es una bacteria productora del antibiótico dopsisamina, capaz de inhibir tanto bacterias Gram-positivas como Gram-negativas, a excepción de *Pseudomonas* y *Serratia* (Takahashi et al., 1986). Los resultados *in vivo*, para determinar la capacidad de inhibición de bacterias patógenas y hongos por parte de las cepas Cross-1 y Cross- 2, parecían indicar una discrepancia entre la bioactividad del antibiótico sintetizado por *C. cryophila* y la capacidad para inhibir la bacteria patógena *Pseudomonas aeruginosa* por las dos cepas en estudio. De este modo, los análisis *in silico* basados en la secuenciación de los genomas completos, y posterior análisis funcional, permitió averiguar la relación filogenética entre Cross-1 y Cross-2 y las especies más cercanas, así como indagar en los rutas metabólicas de estas cepas e intentar determinar aquellos mecanismos genéticos previsiblemente involucrados en la síntesis de CAs.

Tras la secuenciación del ADN de Cross-1 y Cross-2, los datos crudos se pretrataron, eliminando adaptadores y lecturas de baja calidad. Los genomas ensamblados presentaron un tamaño de 10.680.392 y 10.681.678 de pares de bases, respectivamente, con un contenido GC del 70,4% en ambas cepas. Posteriormente, a través de la comparación de los genomas por pares con la herramienta JSpecies, se confirmó a *C. cryophila* como la especie más cercana a las cepas Cross- 1 y Cross-2 (tabla 2). Los valores calculados con los algoritmos ANlb y ANlm se situaron por encima del umbral de 95%, indicando que los genomas de las bacterias Cross-1 y Cross-2 pertenecían a dos cepas de la misma especie. Del mismo modo, los valores por debajo del 95% con respecto a las bacterias comparadas, indicarían que los genomas de Cross-1 y Cross-2 pertenecen a una especie distinta a aquellas filogenéticamente más cercanas y ya descritas.

La producción de metabolitos secundarios sucede durante la fase estacionaria de crecimiento de las bacterias (Ruiz *et al.*, 2010). Por ello, la herramienta antiSMASH lleva a cabo una predicción, mediante la minería de datos genómicos, de clústeres de genes susceptibles de participar en el metabolismo secundario para la síntesis de compuestos bioactivos. Así, se utilizaron los genomas de las cepas de estudio, Cross-1 y Cross-2, junto con el genoma de la especie más cercana, *C. cryophila*, para identificar y comparar los diferentes mecanismos involucrados en la producción de metabolitos secundarios. Se predijeron un total de 50 regiones, en ambos genomas de Cross- 1 y Cross-2, que presentaron hasta 61 clústeres de genes susceptibles de participar en la síntesis de metabolitos con diferente origen y función, mientras que en el caso de *C. cryophila*, se identificaron 44 regiones del genoma en las que se predijeron hasta 59 clústeres de genes. A pesar de los clústeres similares generados por Cross-1 y Cross-2 con respecto a *C. cryophila*, se observaron variaciones en número y tipos. Con respecto a terpenos, en *C. cryophila* se predijeron hasta 13 clústeres de genes, mientras que en las cepas de estudio se identificaron 10. Los terpenoides son las moléculas más abundantes y diversas de la naturaleza, con actividades biológicas tan dispares como las vitaminas o agentes antitumorales (Helfrich *et al.*, 2019). Otros compuestos abundantes en las cepas de *Crossiella* analizadas fueron lantipéptidos, péptidos no ribosomales (NRPS), y derivados de la actividad de las enzimas policétidos sintasas (PKS). Los lantipéptidos con actividad antimicrobiana son denominados lantibióticos, y tienen actividad fundamentalmente frente a bacterias Gram-positivas (Repka *et al.*, 2017). Por su parte, los compuestos derivados de las enzimas NRPS y PKS son sobradamente reconocidos por su importancia en farmacología (Singh *et al.*, 2017). En el caso de los lantipéptidos, en Cross-1 y Cross-2 se predijeron 11 clústeres de genes, mientras que en *C. cryophila* se identificaron ocho. Tanto las cepas de estudio como la especie tipo presentaron siete clústeres susceptibles de clasificarse como NRPS, mientras que con respecto a los policétidos sintasas, se observaron 10 PKS en Cross-1 y Cross-2 y 11 en *C. cryophila*. Entre otros metabolitos con menor abundancia, destacaron cuatro lasso péptidos, un sactipéptido y un furano que se predijeron en las cepas en estudio, pero no se identificaron en la especie tipo de *Crossiella*. Gracias a los avances en las tecnologías de secuenciación de genomas, los lasso péptidos y sactipéptidos se presentan en los últimos años como productos atractivos para la industria farmacéutica, debido a su prometedor potencial en la lucha contra distintas enfermedades (Cheng y Hua, 2020; Chen *et al.*, 2021). En total se identificaron hasta 15 clústeres de genes en Cross-1 y Cross-2 que no se observaron en *C. cryophila*, entre los

que se encontraban tres lantipéptidos, dos NRPS y cuatro PKS, aparte de los compuestos mencionados anteriormente.

Los análisis taxonómicos y de predicción de metabolitos secundarios definen a las cepas de *Crossiella* Cross-1 y Cross-2 como dos bacterias con un prometedor potencial biotecnológico, con compuestos bioactivos diferenciables, frente a *C. cryophila*, la especie tipo del género *Crossiella* y más cercana a las cepas de estudio. La predicción de metabolitos novedosos como lasso péptidos y sactipéptidos y la disposición para realizar estudios basados en la minería de datos, podría conducir al descubrimiento de nuevas moléculas útiles en la lucha de patógenos y otras enfermedades infecciosas.

## Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto de investigación 0483\_PROBIOMA\_5\_E.

## Referencias

- Bergmann, W., Burke, D.C. (1955). Marine products. XXXIX. The nucleosides of sponges. III. Spongothymidine and spongouridine. *J. Org. Chem.*, 20, 1501–1507. <https://doi.org/10.1021/jo01128a007>.
- Blin, K., Shaw, S., Kloosterman, A.M., Charlop-Powers, Z., van Wezel, G.P., Medema, M.H., et al. (2021). antiSMASH 6.0: improving cluster detection and comparison capabilities. *Nucleic Acids Res.*, 49, W29–W35. <https://doi.org/10.1093/nar/gkab335>.
- Calaforra, J.M., Berrocal, J.A. (2008). El Karst de Andalucía. Geoespeleología, Bioespeleología y Presencia Humana. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía (ed.), Sevilla. ISBN 978- 84-96776-61-6.
- Chen, Y., Wang, J., Li, G., Yang, Y., Din, W. (2021). Current advancements in sactipeptide natural products. *Front. Chem.* 9, 595991. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.595991>.
- Cheng, C., Hua, Z.C. (2020). Lasso Peptides: Heterologous production and potential medical application. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 8, 571165. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.571165>.
- Domínguez-Moñino, I., Jurado, V., Rogerio-Candelera, M.A., Hermosin, B., Saiz-Jiménez, C. (2021a). Airborne bacteria in show caves from Southern Spain. *Microbial Cell.*, 8, 247–255. <https://doi.org/10.15698/mic2021.10.762>.
- Domínguez-Moñino, I., Jurado, V., Rogerio-Candelera, M.A., Hermosin, B., Saiz-Jiménez, C. (2021b). Airborne fungi in show caves from Southern Spain. *Appl. Sci.*, 11, 5027. <https://doi.org/10.3390/app11115027>.
- García-Antón, E., Cuezva, S., Jurado, V., Porca, E., Miller, A.Z., Fernández-Cortés, A., et al. 2014. Combining stable isotope ( $\delta^{13}C$ ) of trace gases and aerobiological data to monitor the entry and dispersion of microorganisms in caves. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 21, 473–484. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1915-3>.
- Gohain, A., Manpoong, C., Saikia R., De Mandal, S. (2020). Actinobacteria: diversity and biotechnological applications. In: *Recent Advancements in Microbial Diversity*, De Mandal, S., Bhatt, P., Eds., Academic Press, London, pp. 217–231. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821265-3.00009-8>.
- Groth, I., Vettermann, R., Schuetze, B., Schumann, P., Saiz-Jiménez, C. (1999). Actinomycetes in Karstic caves of northern Spain (Altamira and Tito Bustillo). *J. Microbiol. Methods*, 36, 115– 122. [https://doi.org/10.1016/S0167-7012\(99\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0167-7012(99)00016-0).
- Groth, I., Schumann, P., Laiz, L., Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Saiz-Jiménez, C. (2001). Geomicrobiological study of the Grotta dei Cervi, Porto Badisco, Italy. *Geomicrobiol. J.*, 18, 241-258. <https://doi.org/10.1080/0149045015246778>.
- Helfrich, E.J.N., Lin, G.M., Voigt, C.A., Clardy, J. (2019). Bacterial terpene biosynthesis: challenges and opportunities for pathway engineering. *Beilstein J. Org. Chem.*, 15, 2889-2906. <https://doi.org/10.3762/bjoc.15.283>.
- Herold, K., Gollmick, F.A., Groth, I., Roth, M., Menzel, K.D., Möllmann, U., et al. 2005. Cervimycin A-D: A polyketide glycoside complex from a cave bacterium can defeat vancomycin resistance. *Chem. Eur. J.*, 11, 5523–5530. <https://doi.org/10.1002/chem.200500320>.

- Jonsbu, E., McIntyre, M., Nielsen, J. (2002). The influence of carbon sources and morphology on nystatin production by *Streptomyces noursei*. *J. Biotechnol.*, 95, 133–144. [https://doi.org/10.1016/s0168-1656\(02\)00003-2](https://doi.org/10.1016/s0168-1656(02)00003-2).
- Kerr, J.R. 1999. Bacterial inhibition of fungal growth and pathogenicity. *Microb. Ecol. Health Dis.* 11, 129–142, <https://doi.org/10.1080/089106099435709>.
- Martin-Sánchez, P.M., Nováková, A., Bastian, F., Alabouvette, C., Saiz-Jiménez, C. (2012). Two new species of the genus *Ochroconis*, *O. lascauxensis* and *O. anomala* isolated from black stains in Lascaux Cave, France. *Fungal Biol.* 116, 574–589. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2012.02.006>.
- McCauley, E.P., Piña, I.C., Thompson, A.D., Bashir, K., Weinberg, M., Kurz, S.L., et al. (2020). Highlights of marine natural products having parallel scaffolds found from marine-derived bacteria, sponges, and tunicates. *J. Antibiot.* 73, 504–525. <https://doi.org/10.1038/s41429-020-0330-5>.
- Nakaew, N., Pathom-aree, W., Lumyong, S. (2009). Generic diversity of rare actinomycetes from Thai cave soils and their possible use as new bioactive compounds. *Actinomycetologica* 23, 21– 26. <https://doi.org/10.3209/saj.SAJ230201>.
- Paun, V.I., Lavin, P., Chifiriuc, M.C., Purcarea, C. (2021). First report on antibiotic resistance and antimicrobial activity of bacteria isolates from 13,000-year old cave ice core. *Sci. Rep.* 11, 514. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79754-5>.
- Prijbelski, A., Antipov, D., Meleshko, D., Lapidus, A., Korobeynikov, A. (2020). Using SPAdes de novo assembler. *Curr. Protoc. Bioinformatics*, 70, e102. <https://doi.org/10.1002/cpbi.102>.
- Rangseekaew, P., Pathom-aree, W. (2019). Cave Actinobacteria as producers of bioactive metabolites. *Front. Microbiol.* 10, 387. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00387>.
- Repka, L.M., Chekan, J.R., Nair, S.K., van der Donk, WA. (2017). Mechanistic understanding of lanthipeptide biosynthetic enzymes. *Chem Rev.* 117, 5457–5520. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00591>.
- Richter, M., Rosselló-Móra, R., Glöckner, F.O., Peplies, J. (2016). JSpeciesWS: a Web server for prokaryotic species circumscription based on pairwise genome comparison. *Bioinformatics*, 32, 929–931. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btv681>.
- Ruiz, B., Chávez, A., Forero, A., García-Huante, Y., Romero, A., Sánchez, M., et al. (2010). Production of microbial secondary metabolites: regulation by the carbon source. *Crit. Rev. Microbiol.*, 36, 146-167. <https://doi.org/10.3109/10408410903489576>.
- Saiz-Jiménez, C., Cuezva, S., Jurado, V., Fernández-Cortés A., Porca, E., Benavente, D., et al. (2011). Paleolithic art in peril: Policy and science collide at Altamira Cave. *Science*, 334, 42–43. <https://doi.org/10.1126/science.1206788>.
- Sánchez-Moral, S. (2014). Estudio integral del estado de conservación de la cueva de Altamira y su arte paleolítico (2007-2009). Perspectivas futuras de conservación. Monografías No 24, Museo Nacional y Centro de Investigación de Altamira. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Madrid.
- Sánchez-Moral, S., Jurado, V., Fernández-Cortés, A., Cuezva, S., Martin-Pozas, T., González- Pimentel, J.L., et al. (2021). Environment-driven control of fungi in subterranean ecosystems: the case of La Garma Cave (northern Spain). *Int. Microbiol.*, 24, 573–591. <https://doi.org/10.1007/s10123-021-00193-x>.
- Schatz, A., Bugle, E., Waksman, S.A. (1944). Streptomycin, a substance exhibiting antibiotic activity against gram-positive and gram-negative bacteria. *Exp. Biol. Med.*, 55, 66–69. <https://doi.org/10.3181/00379727-55-14461>.
- Sharma, P., Thakur, D. (2020). Antimicrobial biosynthetic potential and diversity of culturable soil actinobacteria from forest ecosystems of Northeast India. *Sci. Rep.*, 10, 4104. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60968-6>.
- Saudagar, P.S., Singhal, R.S. (2007). Optimization of nutritional requirements and feeding strategies for clavulanic acid production by *Streptomyces clavuligerus*. *Bioresour. Technol.*, 98, 2010-2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.003>.
- Seemann, T. (2014). Prokka: rapid prokaryotic genome annotation. *Bioinformatics*, 30, 2068– 2069. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btu153>.
- Singh, M., Chaudhary, S., Sareen, D. (2017). Non-ribosomal peptide synthetases: Identifying the cryptic gene clusters and decoding the natural product. *J. Biosci.* 42, 175-187. <https://doi.org/10.1007/s12038-017-9663-z>.
- Takahashi, A., Hotta, K., Saito, N., Morioka, M., Okami, Y., Umezawa, H. (1986). Production of novel antibiotic, dopsisamine, by a new subspecies of *Nocardioopsis mutabilis* with multiple antibiotic resistance. *J. Antibiot.*, 39, 175-183. <https://doi.org/10.7164/antibiotics.39.175>.

- Wiseschart, A., Mhuantong, W., Tangphatsornruang, S., Chantasingh, D., Pootanakit, K. Shotgun metagenomic sequencing from Manao-Pee cave, Thailand, reveals insight into the microbial community structure and its metabolic potential. *BMC Microbiology*, 19, 144. <https://doi.org/10.1186/s12866-019-1521-8>.
- WHO (2017). *Prioritization of Pathogens to Guide Discovery, Research and Development of New Antibiotics for Drug-Resistant Bacterial Infections, Including Tuberculosis*. World Health Organization, Geneva. ISBN 978-92-4-002643-8.
- Yasir, M. 2018. Analysis of bacterial communities and characterization of antimicrobial strains from cave microbiota. *Braz. J. Microbiol.*, 49, 248–257. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.08.005>.
- Yoon, S-H., Ha, S-M., Kwon, S., Lim, J., Kim, Y. (2017). Introducing EzBioCloud: A taxonomically united database of 16S rRNA and whole genome assemblies. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 67, 1613–1617. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.001755>.
- Zada, S., Sajjad, W., Rafiq, M., Ali, S., Hu, Z., Wang, H., *et al.* (2021). Cave microbes as a potential source of drugs development in the modern era. *Microb. Ecol.*, 2021, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00248-021-01889-3>.

## Estudio microbiológico de las manchas coloreadas de la Cueva del Viento (Tenerife, España)

Sara GUTIÉRREZ PATRICIO <sup>(1)</sup>, Valme JURADO LOBO <sup>(1)</sup>, Leonila LAIZ TROBAJO <sup>(1)</sup>, Alfredo LÁINEZ CONCEPCIÓN <sup>(2)</sup> Cesáreo SAIZ JIMÉNEZ <sup>(1)</sup>, Ana Zélia MILLER <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS-CSIC), Av. Reina Mercedes 10, 41012 Sevilla, España. sara.gutierrez@irnas.csic.es, vjurado@irnase.csic.es, leo@irnase.csic.es, saiz@irnase.csic.es, anamiller@irnas.csic.es

<sup>(2)</sup> Grupo de Espeleología BENISAHARE, Tenerife, Canarias, España. alfreilainez@hotmail.com

---

### Resumen

Los tubos de lava se encuentran distribuidos por todo el mundo. Estas cuevas volcánicas, inicialmente formadas por el flujo de lava de un volcán en erupción, son habitadas por complejas comunidades microbianas una vez alcanzan la temperatura ambiente. En las paredes y techos del tubo de lava de la Cueva del Viento (Icod de los Vinos, Tenerife, España) se han encontrado colonizaciones microbianas que forman biopelículas de diferentes colores (blancas, amarillas y rojas). Esta cueva es uno de los tubos de lava más grande del mundo, y su nombre se debe a las importantes corrientes de aire que se producen en su interior. La Cueva del Viento presenta unas características geomorfológicas únicas y una gran diversidad de fauna subterránea. Sin embargo, la información disponible sobre la biodiversidad bacteriana presente en su interior es limitada. En este trabajo se llevaron a cabo técnicas de cultivo y análisis moleculares para la caracterización de las biopelículas microbianas y comprender su biodiversidad, así como el estado de conservación de esta cavidad volcánica. Se aislaron 42 cepas bacterianas, distribuidas principalmente en los filos *Actinomycetota* y *Bacillota*. El género más numeroso dentro de cada filo fue *Streptomyces* (ocho cepas), el cual es abundante en suelos, y *Bacillus* (nueve cepas), respectivamente. La especie *Paenarthrobacter nicotinovorans*, perteneciente al filo *Actinomycetota* y hallada en las muestras de colonias amarillas y blancas (cinco cepas), se caracteriza por degradar nicotina, atrazina y otros herbicidas nitrogenados, lo que evidenciaría una posible contaminación proveniente del suelo localizado sobre la cueva. La muestra más diversa correspondió a la biopelícula de color blanco, situada en una de las zonas más contaminadas de la cueva, donde se aislaron 14 cepas bacterianas. La caracterización de las comunidades microbianas presentes en la Cueva del Viento ayudará a comprender mejor su diversidad y a concienciar al público sobre la importancia de la conservación de este tubo de lava, proyectado hoy en día como un museo natural.

**Palabras clave:** bacteria, biodiversidad, técnicas de cultivo, tubos de lava.

## **Microbiological study of the colored mats of the Cueva del Viento (Tenerife, Spain)**

### **Abstract**

*Lava tubes are distributed worldwide. These volcanic caves are inhabited by complex microbial communities. On the walls and ceilings of the lava tube of Cueva del Viento (Icod de los Vinos, Tenerife, Spain) microbial colonisations have been found forming biofilms of different colours (white, yellow and red). This is one of the largest lava tube in the world, and its name is due to the significant air currents that occur inside it. Cueva del Viento has unique geomorphological features and a great diversity of subterranean fauna. However, there is limited information available on the bacterial biodiversity present inside the cave. In this work, culture-dependent techniques and molecular analyses were carried out to characterise the microbial biofilms, to understand their biodiversity, and to the conservation of this volcanic cavity. Forty-two bacterial isolates were obtained, mainly distributed in the phyla Actinomycetota and Bacillota. The most numerous genera within each phylum were Streptomyces (eight strains), which is abundant in soils, and Bacillus (nine strains), respectively. The species Paenarthrobacter nicotinovorans (Actinomycetota) found in the yellow and white colony samples (five strains), is characterised by degrading nicotine, atrazine and other nitrogenous herbicides, which could be an evidence of soil contamination above the cave. The most diverse sample corresponded to the white biofilm, located in one of the most polluted areas of the cave, where 14 bacterial strains were isolated. The characterisation of the microbial communities present in the Cueva del Viento will help to better understand their diversity and to raise public awareness of the importance of the conservation of this lava tube. This cave is projected nowadays as a natural museum.*

**Keywords:** *bacteria, biodiversity, culture-dependent techniques, lava tubes.*

## **Introducción**

El archipiélago canario se encuentra en el océano Atlántico oriental, frente a la costa del sur de Marruecos. Está formado por ocho islas principales de origen volcánico. En el centro de la cadena insular se localiza Tenerife, que es la isla más grande (2034 km<sup>2</sup>), más alta (3714 m s.n.m. en el pico del Teide) y más diversa tanto en ecosistemas como en especies animales y vegetales. La localidad de Icod de Los Vinos se encuentra al noroeste de la isla; esta zona presenta una alta densidad de tubos de lava, en la cual se localiza la Cueva del Viento (Oromí, 2018; Oromí *et al.*, 2021). Numerosos estudios indican una gran riqueza faunística en esta cavidad, pero la información sobre los microorganismos en esta cueva es limitada, y se basa en técnicas moleculares (Socorro *et al.*, 2010; Láinez *et al.*, 2014, Oromí *et al.*, 2021).

Las cuevas volcánicas se encuentran distribuidas por todo el mundo; varios estudios muestran las complejas comunidades microbianas que habitan en estos tubos de lava, que generalmente están formando biopelículas que recubren las paredes y los techos



(Riquelme *et al.*, 2015; González-Pimentel *et al.*, 2018). Estas biopelículas pueden tener diferentes tamaños, desde pequeñas colonias hasta cubrir extensas zonas. Además, también pueden tener diferentes coloraciones, incluyendo amarillo, naranja, gris, rosa y blanco. En 1981 se utilizaron métodos dependientes de cultivos para describir por primera vez las comunidades microbianas presentes en las cuevas de lava de Hawai e informaron sobre la presencia de hongos y bacterias aeróbicas (Lavoie *et al.*, 2017).

Las cuevas de lava son ambientes extremos, caracterizados por ser oligotróficos, con escaso contenido en carbono orgánico, temperatura y humedad constantes a lo largo del año y por la falta de luz en la zona profunda de la cueva, lo que crea un déficit de microorganismos productores primarios. El aislamiento de la mayoría de las cuevas limita la capacidad de los organismos para migrar, lo que resulta en altos niveles de endemismo entre los troglobiontes y los estigobiontes (Christman *et al.*, 2005). Los resultados de Hathaway *et al.* (2014) evidencian que esta tendencia puede extenderse a la diversidad bacteriana encontradas en las biopelículas microbianas de las cuevas de lava de las Azores y Hawai.

Las principales bacterias identificadas en los tubos de lava de todo el mundo pertenecen a los filos Actinomycetota, Pseudomonadota, Acidobacteriota, Nitrospirota, Bacillota, Bacteroidota y Chloroflexota. Actinomycetota y Pseudomonadota son los filos más abundantes en los tubos de lava de diferentes partes del mundo, alcanzando más del 50% del total de filos identificados en cada cueva. Riquelme *et al.* (2015) realizaron uno de los mayores esfuerzos de muestreo en cuevas volcánicas de España, Portugal, Estados Unidos y Canadá (Northup *et al.*, 2011; González-Pimentel *et al.*, 2018; Miller *et al.*, 2020).

## **Materiales y métodos**

### *Localización y muestreo*

La Cueva del Viento es una cavidad volcánica situada en la localidad de Icod de los Vinos, en el norte de la isla de Tenerife, Islas Canarias. Esta cavidad se formó hace unos 27.000 años con la erupción del volcán Pico Viejo. Esta cueva es una de las cavidades volcánicas más grandes del mundo. Tiene 18.500 metros explorados y topografiados, por parte de los espeleólogos del Grupo de Espeleología de Tenerife Benisahare (G.E.T. Benisahare). Su nombre se debe a las importantes corrientes de aire que se producen en su interior. Posee una enorme red laberíntica de paisajes subterráneos, con innumerables ramificaciones aún inexploradas. Esta cueva también destaca por sus características geomorfológicas únicas (figura 1), ya que sus galerías están dispuestas en tres niveles superpuestos, fenómeno que no se describe en ningún otro lugar del mundo. Además, presenta una gran riqueza faunística (Láinez *et al.*, 2014; Socorro *et al.*, 2010).

En septiembre de 2013 se recogieron cuatro muestras de las colonizaciones bacterianas localizadas en las paredes y techos de esta cueva. Las muestras se obtuvieron asépticamente, raspando las colonias con un bisturí estéril; se almacenaron en tubos estériles a 4 °C y se analizaron inmediatamente al llegar al laboratorio. Las muestras se resuspendieron en una solución estéril de NaCl al 0,85 % (p/v) y posteriormente se sembraron en agar nutritivo,

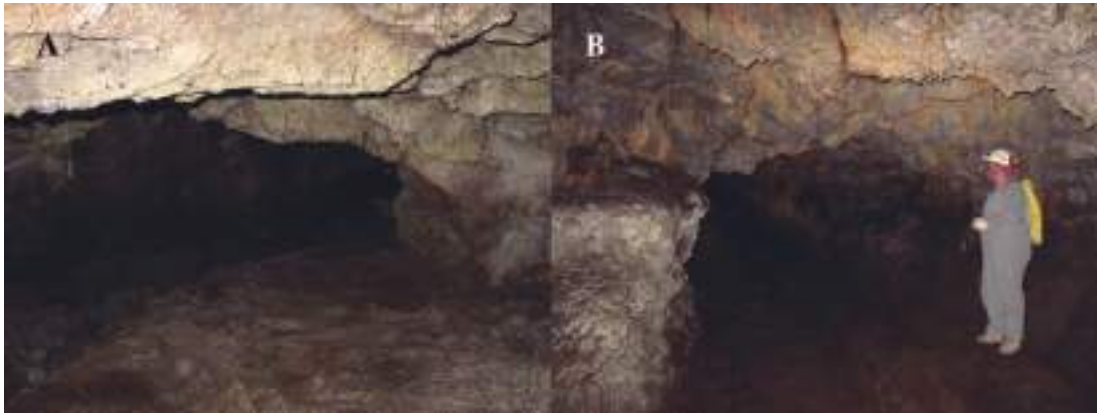


Figura 1. Tubos de lava de la Cueva del Viento.

agar triptona-soja (TSA) y agar triptona-soja con sales de hierro, magnesio y silicio al 3 % (TSBAdFeMgSi). Todas las muestras se incubaron a 30 °C durante 7 semanas. Pasado este tiempo, las colonias bacterianas fueron seleccionadas según sus características morfológicas.

Las muestras 3C y 7G (biopelículas amarillas) se obtuvieron en el tubo B y entrada, respectivamente. La muestra 5E (biopelícula roja) se tomó en el punto B9 y la muestra 11K (biopelícula blanca) en la galería Breveritas inferior, este lugar se encuentra contaminado con un vertido de aguas residuales (tabla 1).

Cepas	Nº acceso	Identificación	% Similitud	Origen
0913CV3CTS3	LN867256	<i>Streptomyces palmae</i> (LC073309)	98,38	Rizosfera palma aceitera
0913CV3CTS5	LN867257	<i>Streptomyces rhizosphaerihabitans</i> (HQ267983)	98,75	Suelo de un bosque de bambú
0913CV3CT5	LN867258	<i>Streptomyces</i> sp <sup>1</sup> .	100,00	Suelo
0913CV3CTS4	LN867259	<i>Streptomyces plumbiresistens</i> (EU526954)	98,48	Suelo contaminado con plomo
0913CV3CT2	LN867259	<i>Streptomyces palmae</i> (LC073309)	98,36	Rizosfera palma aceitera
0913CV3CTS6	LN867261	<i>Streptomyces</i> sp <sup>2</sup> .	99,17	Suelo
0913CV3CT1	LN867262	<i>Bacillus</i> sp <sup>3</sup> .	100,00	Suelo y leche
0913CV3CNS1.2	LN867263	<i>Brevibacterium frigoritolerans</i> (AM747813)/ <i>Peribacillus simplex</i> (BCVO01000086)	99,32	Suelo árido (Marrueco) y suelo
0913CV5ET4	LN867264	<i>Streptomyces</i> sp <sup>4</sup> .	99,78	Suelo
0913CV5ET7	LN867265	<i>Bacillus atrophaeus</i> (AB021181)	99,77	Suelo

Tabla 1. Bacterias aisladas de la Cueva del Viento.

0913CV5ETS4	LN867266	<i>Bacillus siamensis</i> (AJVF01000043)	99,29	Condimento tailandés (Poo-khem)
0913CV5ET2	LN867267	<i>Bacillus</i> sp. <sup>5</sup>	99,85	Nave especial, agua y leche
0913CV5ENS2;2	LN867268	<i>Bacillus tequilensis</i> (AYT001000043)	100,00	Tumba mexicana
0913CV5ETS6	LN881695	<i>Bacillus tequilensis</i> (AYT001000043)	98,85	Tumba mexicana
0913CV5ENS2;1	LN881696	<i>Bacillus tequilensis</i> (AYT001000043)	99,08	Tumba mexicana
0913CV7GT56	LN867269	<i>Paenarthrobacter nicotinovorans</i> (X80743)	99,41	Suelo
0913CV7GNS1	LN881697	<i>Paenarthrobacter nicotinovorans</i> (X80743)	99,35	Suelo
0913CV7GTS4	LN881698	<i>Paenarthrobacter nicotinovorans</i> (X80743)	99,12	Suelo
0913CV7GN7.1	LN867270	<i>Micrococcus luteus</i> (CP001628)	99,12	Piel de mamífero
0913CV7GTS1.2	LN867271	<i>Micrococcus</i> sp. <sup>6</sup>	99,87	Superficie de <i>Polyspora</i> y piel
0913CV7GNS2	LN867272	<i>Peribacillus simplex</i> (BCV001000086)	99,80	Suelo
0913CV7GTS8	LN881699	<i>Peribacillus simplex</i> (BCV001000086)	99,66	Suelo
0913CV7GTS2	LN867273	<i>Bacillus siamensis</i> (AJVF01000043)	99,80	Condimento tailandés (Poo-khem)
0913CV7GN6	LN867274	<i>Bacillus mycoides</i> (ACMU01000002)	99,77	Leche
0913CV7GT7;2	LN867275	<i>Rossellomorea vietnamensis</i> (AB099708)	99,58	Salsa de pescado vietnamita
0913CV7GT7;1	LN881700	<i>Rossellomorea vietnamensis</i> (AB099708)	99,36	Salsa de pescado vietnamita
0913CV7GTS	LN867276	<i>Pseudomonas laurylsulfatiphila</i> (KY462012)	99,40	Suelo contaminado
0913CV7GTS5	LN867277	<i>Psychrobacillus soli</i> (KJ956929)	99,42	Suelo contaminado con aceite
0913CV11KT10	LN867278	<i>Arthrobacter ginkgois</i> (KP128918)	99,21	Rizosfera de <i>Ginkgo biloba</i>
0913CV11KTS3	LN867279	<i>Paenarthrobacter nicotinovorans</i> (X80743)	99,42	Paciente clínico
0913CV11KN7	LN867280	<i>Paenarthrobacter nicotinovorans</i> (X80743)	99,38	Paciente clínico
0913CV11KTS		<i>Micrococcus luteus</i> (CP001628)	99,52	Piel
0913CV11KTS6	LN867281	<i>Micrococcus luteus</i> (CP001628)	99,58	Piel
0913CV11KTS1	LN867282	<i>Streptomyces</i> sp. <sup>4</sup>	99,46	Suelo
0913CV11KTS2	LN867283	<i>Streptomyces halmagora</i> (KV917375)	99,23	Suelo
0913CV11KTS5	LN867284	<i>Metabacillus litoralis</i> (AY608605)	99,01	Mar Amarillo, Corea
0913CV11KT6	LN867285	<i>Pseudomonas yangonensis</i> (MK907288)	97,89	Herida de un paciente

Tabla 1 (continuación). Bacterias aisladas de la Cueva del Viento.

0913CV11KN6,1		<i>Pseudomonas yangonensis</i> (MK907288)	98,59	Herida de un paciente
0913CV11KNS1	LN867286	<i>Pseudomonas lalkuanensis</i> (MF943158)	98,87	Suelo contaminado
0913CV11KN6;2	LN867287	<i>Pseudoxanthomonas</i> sp. <sup>7</sup>	99,38	Suelo y agua contaminado
0913CV11KN3;2	LN867288	<i>Chryseobacterium candidae</i> (SDLV01000037)	98,32	Levadura <i>Candida</i> sp.
0913CV11KN2	LN867289	<i>Flaviumibacter cheonanensis</i> (KF309176)	98,57	Sedimento de un lago

Tabla 1 (continuación). Bacterias aisladas de la Cueva del Viento.

<sup>1</sup>Comparte la misma similitud con *Streptomyces cyaneus* (AF346475), *S. lincolnensis* (X79854), *S. antibioticus* (AB184184), *S. mirabilis* (AB184412), *S. shaanxiensis* (FJ465151) y *S. griseoruber* (AB184209).

<sup>2</sup>Grupo taxonómico *Streptomyces lydicus*: *S. lydicus* (AB184281) y *S. chattanoogensis* (AJ621611).

<sup>3</sup>Grupo taxonómico *Bacillus mycooides*: *B. mycooides* (ACMU01000002) y *B. weihenstephanensis* (BAUY01000093).

<sup>4</sup>Grupo taxonómico *Streptomyces lavendulae*: *S. avidinii* (AB184395), *S. xanthophaeus* (AB184177), *S. cirratus* (AY999794), *S. vinaceus* (AB184394), *S. spororaveus* (AJ781370), *S. nojiriensis* (AJ781355), *S. lavendulae* subsp. *lavendulae* (AB184146), entre otros.

<sup>5</sup>Comparte la misma similaridad con: *Bacillus zhangzhouensis* (JOTP01000061), *B. safensis* subsp. *safensis* (ASJD01000027) y *B. safensis* subsp. *osmophilus* (KY990920).

<sup>6</sup>Grupo taxonómico *Micrococcus luteus*: *M. yunnanensis* (FJ214355) y *M. luteus* (CP001628).

<sup>7</sup>La cepa CV11KN6,2 comparte la misma similitud con *Pseudoxanthomonas mexicana* (AF273082), *P. japonensis* (AB008507) y *P. arseniciresistens* (MN685193).

## Análisis molecular de comunidades microbianas

La identificación de las comunidades bacterianas se realizó mediante técnicas de biología molecular basadas en el análisis del gen ARNr 16S. El ADN fue extraído utilizando el protocolo descrito por Griffiths *et al.* (2000). El gen ARNr 16S se amplificó mediante PCR utilizando los cebadores 616F 5'-AGAGTTTGATYMTGGCTCAG-3' (Juretschko *et al.*, 1998), 1510R 5'-GGTACCTTGTTACGACTT-3' (Echigo *et al.*, 2005), 907R 5'-AATTCCTTTGAGTTT-3' (Weisburg *et al.*, 1991), y 1492R 5'-GGTACCTTGTTACGACTT-3' (Lane, 1991).

Las reacciones de PCR se realizaron en un termociclador FlexCycler (Analytik Jena AG, Alemania), utilizando las siguientes condiciones: 94 °C durante 2 min; 35 ciclos de 94°C durante 20s, 55°C durante 20s, 72 °C durante 2 min; y el paso final de 72 °C durante 10 min. Los productos de PCR positivos se purificaron usando el Kit JetQuick PCR Purification Spin Kit (GenoMed Inc., Leesburg, FL, EE. UU.) de acuerdo con las instrucciones del fabricante y se almacenaron a -20 °C para su posterior análisis.

Los productos purificados por PCR se secuenciaron en el Laboratorio Secugen (CSIC, Madrid, España), las secuencias obtenidas se editaron utilizando el programa BioEdit Sequence Alignment Editor (versión 7.0.4.1; Hall, 1999).

La identificación de las secuencias del gen ARNr 16S se realizó utilizando la base de datos EZBioCloud y la base de datos del Centro Nacional de Información Biotecnológica (NCBI), utilizando el algoritmo BLASTN. Las secuencias se depositaron en la base de datos del NCBI GenBank (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>), con los números de acceso LN867256-LN867289 y LN881695-LN881702.

## Resultados y discusión

En este estudio se han obtenido 42 cepas bacterianas, distribuidas principalmente en los filos Actinomycetota (42,86%) y Bacillota (40,48%). Los géneros más numerosos fueron *Streptomyces* (44,45%) y *Bacillus* (58,82%). El filo Pseudomonadota (11,90%) se encontró en la muestra de biopelícula amarilla B (7G) y en la de biopelícula blanca (11K). El filo Bacteroidota (4,76%) sólo se halló en la muestra 11K, que fue la más diversa, ya que en ella estuvieron presentes los cuatro filos mencionados.

Dentro del filo Actinomycetota, el género *Streptomyces* (44,45%) fue el más numeroso, ya que estuvo presente en todas las muestras, salvo en la muestra 7G. Este género está ampliamente distribuido y es abundante en suelos, incluido el compost. También se ha aislado de otras cuevas volcánicas y cuevas kársticas (Gutierrez-Patricio, 2016; Riquelme *et al.*, 2017). Algunas especies son patógenas de animales y humanos, mientras que otras son fitopatógenas (Kämpfer, 2012). De este género se aislaron seis cepas diferentes, las tres cepas identificadas a nivel de especie se aislaron de la muestra de manchas amarillas A (3C). De *Streptomyces palmae* se aislaron dos cepas en la muestra 3C. Los miembros de este género son conocidos por producir antibióticos y compuestos bioactivos. Por ejemplo *S. palmae*, que se aisló de la rizosfera de la palma aceitera, presenta actividad antifúngica frente a algunos hongos fitopatógenos como *Ganoderma boninense*, y también presenta actividad antimicrobiana frente a bacterias Gram positivas y Gram negativas (Sujarit *et al.*, 2016; 2020). Asimismo, se aislaron las especies *S. rhizosphaerihabitans* y *S. plumbiresistens*. La primera de ellas se aisló por primera vez de la rizosfera de un bosque de bambú coreano, mientras que la segunda fue aislada de un suelo chino contaminado con plomo. Además, se ha demostrado que la cepa *S. plumbiresistens* produce polihidroxialcanoato (PHA) un polímero conocido como plástico biodegradable (Guo, *et al.*, 2009; Al-Hamdani, 2016; Lee *et al.*, 2016).

Miembros de la familia Micrococcaceae se aislaron de las muestras 7G y 11K. Los géneros encontrados fueron *Arthrobacter*, *Paenarthrobacter* y *Micrococcus*. Del género *Arthrobacter*, y concretamente de la especie *A. ginkgonis* sólo se encontró una cepa en la muestra 11K. Esta especie fue aislada por primera vez de la raíz de *Ginkgo biloba* (Cheng *et al.*, 2017). El género *Paenarthrobacter* se halló en la muestra 7G (tres cepas) y 11K (dos cepas). Todas las cepas aisladas se identificaron como *P. nicotinovorans*. Esta especie se caracteriza por la degradación de nicotina, atrazina y otros herbicidas triazínicos (Kodama *et al.*, 1992, Aislabie *et al.*, 2005, Busse, 2016). Por último, se aislaron tres cepas del género *Micrococcus*, que se caracteriza por ser quimioorganótrofo con metabolismo estrictamente respiratorio. Estas cepas se identificaron como *M. luteus*, especie originariamente aislada de la piel de mamífero.

El filo Bacillota, como se ha mencionado anteriormente, fue muy numeroso y diverso, en cuanto al número de géneros hallados. En estas muestras se aislaron 9 cepas de *Bacillus*, género formado por un gran número de bacterias heterogéneas que están ampliamente distribuidas en el suelo y subsuelo. Algunas especies de *Bacillus* se utilizan en aplicaciones industriales, como la síntesis de productos farmacéuticos y químicos, o en la producción de alimentos como es el caso de *B. siamensis* (5E y 7G), aislado inicialmente de un condimento alimentario tailandés muy popular (Poo-khem) (Sumpavapol *et al.*, 2010) y *B. mycoides* (7G) aislado de la leche. Además de las dos especies mencionadas anteriormente, se aislaron otras dos especies de *Bacillus* en la muestra 5E; *B. atrophaeus*, aislada de suelo (Nakamura, 1989), y tres cepas de *B. tequilensis*, aislada por primera vez en una tumba mexicana (Gatson *et al.*, 2006). Asimismo, se aislaron tres cepas de *Bacillus* que no se pudieron identificar a nivel de especie.

También se aislaron otras cuatro especies pertenecientes al filo Bacillota, tres de ellas se aislaron en la muestra 7G, los géneros *Peribacillus*, *Psychrobacillus* y *Rosellomorea*, mientras que los géneros *Metabacillus* y *Sutcliffiella* se aislaron en la muestra 11K. La mayor parte de los miembros del género *Peribacillus* se han aislado de suelos, como es el caso de la cepa aislada en este trabajo, *P. simplex*, aunque también se han aislado de intestinos de animales o de humanos, de permafrost y algunas especies se utilizan industrialmente en la remediación del butanol como, por ejemplo, *P. butanolivorans* (Patel y Gupta, 2020). El género *Psychrobacillus* se caracteriza por ser psicrotolerante, sólo se aisló una cepa correspondiente a *P. soli*, que tiene capacidad para degradar aceite, y se aisló inicialmente de un suelo contaminado con aceite próximo a una gasolinera (Thi Pham *et al.*, 2015). El género *Rosellomorea*, por el contrario, está presente principalmente en ambientes marinos, la especie aislada en este estudio fue *R. vietnamensis*, una bacteria moderadamente halotolerante que fue aislada inicialmente de una salsa de pescado vietnamita (Noguchi *et al.*, 2004; Gupta *et al.*, 2020). El género *Metabacillus* se ha aislado de diversos ambientes, incluidos suelos, lago hipersalino y región costera marina. En este trabajo se aisló una cepa de *M. litoralis* (ambiente marino) (Yoon y Oh, 2005, Patel y Gupta, 2020); mientras que la cepa alcalófila *Sutcliffiella halmapalus* fue aislada de suelo (Nielsen *et al.*, 1995; Gupta *et al.*, 2020).

Por otro lado, el filo *Pseudomonadota* sólo estuvo representado en la muestra 7G y 11K, con el género *Pseudomonas*; este género es muy numeroso y se puede aislar de varios ambientes naturales como agua, suelo, plantas y animales. La mayoría de las especies no son patógenos de plantas y animales, pero algunas causan infecciones en humanos, además son muy versátiles metabólicamente y tienen propiedades biotecnológicas importantes. En la muestra 7G se obtuvo una cepa *P. laurylsulfatiphila*, que se caracteriza por degradar dodecilsulfato sódico (SDS) y se aisló inicialmente de un suelo de turba de una planta de tratamiento de aguas residuales (Furmanczyk *et al.*, 2018). También se encontraron las especies *P. yangonensis* (2 cepas) y *P. lalkuanensis* (1 cepa) en la muestra 11K. La primera fue aislada de una herida de un paciente de un hospital de Myanmar, mientras que la segunda fue aislada de un consorcio de bacterias de suelo contaminado enriquecido para la remediación de desechos electrónicos (Tohya *et al.*, 2020; Thorat *et al.*, 2020).

Otro género de *Pseudomonadota* aislado en la muestra 11K fue *Pseudoxanthomonas*; los miembros pertenecientes a este género tienen una amplia distribución en la naturaleza, concretamente fue aislado del lodo de un reactor anaerobio que trata las aguas residuales de una quesería, de la orina de un niño, aguas subterráneas contaminadas con arsénico en la India, etc. Las bacterias de este género reducen arsénico y nitrato (Thierry *et al.*, 2004; Mohapatra *et al.*, 2018).

En la muestra 11K se identificaron las dos únicas especies pertenecientes al filo Bacteroidota; *Chryseobacterium candidae*, aislada de la levadura *Candida* (Indu *et al.*, 2020) y *Flaviumibacter cheonanensis*, aislada de sedimento de un arroyo en Corea (Kim *et al.*, 2014). Ambas cepas merecen interés, debido a que este filo se aísla con poca frecuencia mediante las técnicas de cultivos tradicionales. A pesar de presentar valores superiores al 97% de similitud podrían ser buenos candidatos para su descripción como nuevas especies, ya que el valor del gen del ARNr 16S del 97% no es un valor de corte estricto.

Las cuevas volcánicas, como la Cueva del Viento, pueden ser un buen escenario para estudiar la diversidad microbiana, para la caracterización de nuevas especies bacterianas y para el estudio de la producción de sustancias bioactivas, especialmente en los géneros *Streptomyces*, *Paenarthrobacter* y *Pseudomonas*. Además, la cepa de *Pseudomonas yangonensis* presentó un especial interés debido a que poseía bajos porcentajes de similitud (97,89%) con respecto a las secuencias del gen del ARNr 16S disponibles en las bases de datos EzTaxon (Rosselló-Móra y Amann, 2001; Stackebrandt, 2003; Kim *et al.*, 2014). La homología de la secuencia completa del ARNr 16S es uno de los primeros datos a tener en cuenta para la selección y estudio de posibles nuevas especies. Por esta razón esta y otras cepas aisladas de cuevas volcánicas podrían ser objeto de investigación en futuros estudios taxonómicos.

## Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto de investigación TUBOLAN PID2019-108672RJ-I00 y del contrato Ramón y Cajal (RYC2019-026885-I), financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033. Además, este trabajo ha recibido apoyo de la Fundação para a Ciência e Tecnologia de Portugal (FCT) en el marco del proyecto MICROCENO (PTDC/CTA-AMB/0608/2020), y del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) a través del proyecto intramural PIE\_20214AT021.

## Referencias

- Aislabie, J., Bej A.K., Ryburn J., Lloyd N., Wilkins, A. (2005). Characterization of *Arthrobacter nicotinovorans* HIM, an atrazine-degrading bacterium, from agricultural soil New Zealand. *FEMS Microbiology Ecology*, 1;52(2),279-86. <https://doi.org/10.1016/j.femsec.2004.11.012>.
- Al-Hamdani, M. A. (2016). Polyhydroxyalkanoate production by *Streptomyces plumbiresistens* CCNWHX 13-160T. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 6,12.
- Busse, H.J. (2016). Review of the taxonomy of the genus *Arthrobacter*, emendation of the genus *Arthrobacter sensu lato*, proposal to reclassify selected species of the genus *Arthrobacter* in the novel genera *Glutamicibacter* gen. nov., *Paeniglutamicibacter* gen. nov., *Pseudoglutamicibacter* gen. nov.,

- Paenarthrobacter* gen. nov. and *Pseudarthrobacter* gen. nov., and emended description of *Arthrobacter roseus*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 66, 9-37. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.000702>.
- Cheng, J., Zhang, M.Y., Zhao, J.C., Xu, H., Zhang, Y., Zhang, T.Y., Wu, Y.Y., Zhang, Y.X. (2017). *Arthrobacter ginkgonis* sp. nov., an actinomycete isolated from rhizosphere of *Ginkgo biloba* L. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 67, 319-324. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.001623>.
- Christman, M.C., Culver, D.C., Madden, M.K., White, D. (2005). Patterns of endemism of the eastern North American cave fauna. *Journal of Biogeography*, 32, 1441-1452. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01263.x>.
- Echigo, A., Hino, M., Fukushima, T., Mizuki, T., Kamekura, M., Usami, R. (2005). Endospores of halophilic bacteria of the family *Bacillaceae* isolated from non-saline Japanese soil may be transported by Kosa event (Asian dust storm). *Saline Systems*, 1, 8. <https://doi.org/10.1186/1746-1448-1-8>.
- Furmanczyk E.M, Lipinski L, Dziembowski A and Sobczak A (2018). Genomic and functional characterization of environmental strains of SDS-degrading *Pseudomonas* spp., providing a source of new sulfatases. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1795. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01795>.
- Gatson, J.W., Benz, B.F., Chandrasekaran, C., Satomi, M., Venkateswaran, K., Hart, M.E. (2006). *Bacillus tequilensis* sp. nov., isolated from a 2000-year-old Mexican shaft-tomb, is closely related to *Bacillus subtilis*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 56, 1475-1484. <https://doi.org/10.1099/ijms.0.63946-0>.
- Griffiths, R.I., Whiteley, A.S., Anthony, G., Donnell, O., Bailey, M.J. (2000). Rapid method for coextraction of DNA and RNA from natural environments for analysis of ribosomal DNA- and rRNA-based microbial community composition. *Applied and Environmental Microbiology*, 66, 5488-5491. <https://doi.org/10.1128/aem.66.12.5488-5491.2000>.
- Gonzalez-Pimentel, J.L., Miller, A.Z., Jurado, V., Laiz, L., Pereira, M.F.C.; Saiz-Jimenez, C. (2018). Yellow coloured mats from lava tubes of La Palma (Canary Islands, Spain) are dominated by metabolically active *Actinobacteria*. *Scientific Reports*, 8, 1944. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20393-2>.
- Guo, J.K., Lin, Y.B., Zhao, M.L., Sun, R., Wang, T.T., Tang, M., Wei, G.H. (2009). *Streptomyces plumbiresistens* sp. nov., a lead-resistant actinomycete isolated from lead-polluted soil in north-west China. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 59, 1326-30. <https://doi.org/10.1099/ijms.0.004713-0>.
- Gupta, R.S., Patel, S., Saini, N., Chen, S. (2020). Robust demarcation of 17 distinct *Bacillus* species clades, proposed as novel *Bacillaceae* genera, by phylogenomics and comparative genomic analyses: description of *Robertmurraya kyonggiensis* sp. nov. and proposal for an emended genus *Bacillus* limiting it only to the members of the *Subtilis* and *Cereus* clades of species. *International Journal of Systematic Evolutionary Microbiology*, 70, 5753-5798. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004475>.
- Gutiérrez-Patricio, S. (2016). Identificación de nuevas especies bacterianas aisladas de cuevas españolas. *Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla*.
- Hall T.A. (1999). BioEdit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for windows 95/98/NT. *Nucleic Acids Symposium Series*, 41, 95-98.
- Hathaway, J.J.M., Garcia, M.G., Moya Balasch, M., Spilde, M.N., Stone, F.D., Dapkevicius, MdL.N.E., Amorim, R.I., Gabriel, R., Borges, P. A. V., Northup, D.E. (2014). Comparison of bacterial diversity in Azorean and Hawaiian lava cave microbial mats. *Geomicrobiology Journal*, 31, 205-220. <https://doi.org/10.1080/01490451.2013.77491>.
- Indu, B., Kumar, G., Smida, N, Shabbir, A. Sasikala, Ch., Ramana, Ch. V. (2020). *Chryseobacterium candidae* sp. nov., isolated from a yeast (*Candida tropicalis*). *International Journal of Systematic Evolutionary Microbiology*, 70, 93-99. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.003716>.
- Kim, W.H., Lee, S., Ahn, T.Y. (2014). *Flaviumibacter cheonanensis* sp. nov., isolated from sediment of a shallow stream. *International Journal of Systematic Evolutionary Microbiology*, 64, 3235-3239. <https://doi.org/10.1099/ijms.0.063370-0>.
- Kodama, K., Yamamoto, H., Amano, N., Amachi, T. (1992). Reclassification of two strains of *Arthrobacter oxydans* proposal of *Arthrobacter nicotinovorans* sp. nov. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 42, 234-239. <https://doi.org/10.1099/00207713-42-2-234>.
- Juretschko, S., Timmermann, G., Schmid, M., Schleifer, K.H., Pommerening-Röser, A., Koops, H.P., Wagner, M. (1998). Combined molecular and conventional analyses of nitrifying bacterium diversity in activated sludge: *Nitrosococcus mobilis* and *Nitrospira*-like bacteria as dominant populations. *Applied Environmental Microbiology*, 64, 3042-3051. <https://doi.org/10.1128/aem.64.8.3042-3051.1998>.



- Kämpfer, P., Lai, W.A., Arun, A. B., Young, C.C., Rekha, P.D., Martin, K., Busse, H.J., Chen, W.M. (2012). *Paracoccus rhizosphaerae* sp. nov., isolated from the rhizosphere of the plant *Crossostephium chinense* (L.) Makino (Seremban). *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 62, 2750-2756.
- Láinez, A., Mesa, F.M., Finke, C., Milenkovic, D. (2014). La Cueva del Viento, otra forma de interpretar y percibir el mundo subterráneo turístico. En: J.M. Calaforra y J.J. Durán (eds.). *Iberoamérica Subterránea*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, pp. 171-180.
- Lane, D.J. (1991). 16S/23S rRNA sequencing. En: E. Stackebrandt y M. Goodfellow, (eds.). *Nucleic Acid Techniques in Bacterial Systematics*. John Wiley and Sons, New York, pp 115–175.
- Lavoie, K.H., Winter A.S., Read K.J.H., Hughes E.M., Spilde M.N., Northup D.E. (2017) Comparison of bacterial communities from lava cave microbial mats to overlying surface soils from Lava Beds National Monument, USA. *PLoS One*, 12, e0169339. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169339>.
- Lee, H.J., Whang, K. S. (2016). *Streptomyces rhizosphaerihabitans* sp. nov. and *Streptomyces adustus* sp. nov., isolated from bamboo forest soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 66, 3573–3578. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.001236>.
- Miller, A.Z., García-Sánchez, A.M., L. Coutinho, M., Costa Pereira, M.F., Gázquez, F., Calaforra, J.M., Forti, P., Martínez-Frías, J., Toulkeridis, T., Caldeira, A.T., Saiz-Jimenez, C. (2020). Colored microbial coatings in show caves from the Galapagos Islands (Ecuador): First Microbiological Approach. *Coatings*, 10, 1134. <https://doi.org/10.3390/coatings1011134>.
- Mohapatra, B., Sar, P., Kazy, S.K., Maiti, M.K., Satyanarayana, T. (2018). Taxonomy and physiology of *Pseudoxanthomonas arseniciresistens* sp. nov., an arsenate and nitrate-reducing novel gammaproteobacterium from arsenic contaminated groundwater, India. *PLoS One*, 13, e0193718. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193718>.
- Nakamura, L.K. (1989). Taxonomic relationship of black-pigmented *Bacillus subtilis* strains and a proposal for *Bacillus atrophaeus* sp. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 39,295-300. <https://doi.org/10.1099/00207713-39-3-295>.
- Nielsen, P., Fritze, D., Priest, F. G. (1995). Phenetic diversity of alkaliphilic *Bacillus* strains: proposal for nine new species. *Microbiology*, 141, 1745–1761. <https://doi.org/10.1099/13500872-141-7-1745>.
- Noguchi, H., Uchino, M., Shida, O., Takano, K., Nakamura, L. K. Komagata, K. (2004). *Bacillus vietnamensis* sp. nov., a moderately halotolerant, aerobic, endospore-forming bacterium isolated from Vietnamese fish sauce. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 54, 2117–2120. <https://doi.org/10.1099/ijms.0.02895-0>.
- Northup, D.E., Melim, L.A., Spilde, M.N., Hathaway, J.J.M., Garcia, M.G., Moya, M., Stone, F.D., Boston, P.J., Dapkevicius, M.L.N.E., Riquelme, C. (2011). Lava cave microbial communities within mats and secondary mineral deposits: Implications for life detection on other planets. *Astrobiology*, 11, 601–618. <https://doi.org/10.1089/ast.2010.0562>.
- Oromí, P. (2018). Researches in lava tubes. En: *Cave Ecology*; Moldovan, O.T., Kovác, L., Halse, S., (eds.), Springer, Cham, Switzerland. pp. 369–381.
- Oromí, P., Socorro, S. (2021). Biodiversity in the Cueva del Viento lava tube system (Tenerife, Canary Islands). *Diversity* 13, 226. <https://doi.org/10.3390/d13060226>.
- Patel, S., Gupta, R.S. (2020). A phylogenomic and comparative genomic framework for resolving the polyphyly of the genus *Bacillus*: Proposal for six new genera of *Bacillus* species, *Peribacillus* gen. nov., *Cytobacillus* gen. nov., *Mesobacillus* gen. nov., *Neobacillus* gen. nov., *Metabacillus* gen. nov., and *Alkalihalobacillus* gen. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 70, 406-438. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.003775>.
- Riquelme, C., Hathaway, J.J.M., Dapkevicius, M.L.N.E., Miller, A.Z., Kooser, A., Northup, D.E., Jurado, V., Fernandez, O., Saiz-Jimenez, C., Cheeptham, N. (2015). Actinobacterial diversity in volcanic caves and associated geomicrobiological interactions. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1342. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01342>.
- Riquelme, C., Dapkevicius, M.L.E., Miller, A.Z., Charlop-Powers, Z., Brady S., Mason, C., Cheeptham, N. (2017). Biotechnological potential of Actinobacteria from Canadian and Azorean volcanic caves. *Applied Microbiology Biotechnology*, 101,843-857. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7932-7>.
- Rosselló-Móra, R., Amann, R. (2001). The species concept for prokaryotes. *FEMS Microbiology Review* 25, 39-67. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2001.tb00571.x>.
- Socorro Hernández, J.S., Láinez Concepción, A., Mesa Luís, F. (2010). *Parque geológico Cueva del Viento (Icod de los Vinos, Tenerife). Una ruta interpretativa turística*. En: J.J. Durán y F. Carrasco (eds.). *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 279-292.

- Stackebrandt, E. (2003). The richness of prokaryotic diversity: There must be a species somewhere. *Food Technology and Biotechnology*, 41, 17-22.
- Sujarit, K., Kudo, T., Ohkuma, M., Pathom-Aree, W., Lumyong, S. (2016). *Streptomyces palmae* sp. nov., isolated from oil palm (*Elaeis guineensis*) rhizosphere soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 66, 3983–3988. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.001298>.
- Sujarit, K., Mori, M., Dobashi K., Shiomi, K., Pathom-aree, W., Lumyong, S. (2020). New antimicrobial phenyl alkenoic acids isolated from an oil palm rhizosphere-associated actinomycete, *Streptomyces palmae* CMU-AB204T. *Microrganisms*, 8, 350. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8030350>.
- Sumpavapol, P., Tongyongk, L., Tanasupawat, S., Chokesajjawatee, Luxanani, P., Visessanguan, W. (2010). *Bacillus siamensis* sp. nov., isolated from salted crab (poo-khem) in Thailand. *International Journal of Systematic Evolutionary Microbiology*, 60, 2364-2370. <https://doi.org/10.1099/ijms.0.018879-0>.
- Thi Pham, V.H.T., Jeong, S.W., Kim, J. (2015). *Psychrobacillus soli* sp. nov., capable of degrading oil, isolated from oil-contaminated soil. *International Journal of Systematic Evolutionary Microbiology*, 65, 3046-3052. <https://doi.org/10.1099/ijms.0.000375>.
- Thierry, S., Macarie, H., Iizuka, T., Geißdörfer, W., Assih, E.A., Spanevello, M., Verhe, F., Thomas, P., Fudou, R., Monroy, O., Labat, M., Ouattara, A.S. (2004) *Pseudoxanthomonas mexicana* sp. nov. and *Pseudoxanthomonas japonensis* sp. nov., isolated from diverse environments, and emended descriptions of the genus *Pseudoxanthomonas* Finkmann et al. 2000 and of its type species. *International Journal of Systematic Evolutionary Microbiology*, 54, 2245-2255. <https://doi.org/10.1099/ijms.0.02810-0>.
- Tohya, M., Watanabe, S., Teramoto, K., Tada, T., Kuwahara-Arai, K., Mya, S., Zin, K.N., Kirikae, T., Tin, H.H. (2020). *Pseudomonas yangonensis* sp. nov., isolated from wound samples of patients in a hospital in Myanmar. *International Journal of Systematic Evolutionary Microbiology*, 70, 3597-3605. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004181>.
- Thorat, V., Kirdat, K., Tiwarekar, B., DaCosta, E., Debbarma, P., Shouche, Y., Sathe, S., Goel, R., Lodha, T., Yadav, A. (2020). *Pseudomonas lalkuanensis* sp. nov., isolated from a bacterial consortium of contaminated soil enriched for the remediation of e-waste. *International Journal of Systematic Evolutionary Microbiology*, 70, 6468-6475. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004559>.
- Weisburg, W.G., Barns, S.M., Pelletier, D.A., Lane, D.J. (1991). 16S ribosomal DNA amplification for phylogenetic study. *Journal of Bacteriology*, 173, 697-703. <https://doi.org/10.1128/jb.173.2.697-703.1991>.
- Yoon, J.H., Oh, T.K. (2005). *Bacillus litoralis* sp. nov., isolated from a tidal flat of the Yellow Sea in Korea. *International Journal of Systematic Evolutionary Microbiology*, 55, 1945-1948. <https://doi.org/10.1099/ijms.0.63332-0>.

## Aproximación al patrimonio minero de los valles de Bielsa y Chistau (Huesca)

Ana ORTAS DEL RÍO <sup>(1)</sup>, Mariano OLIVAN ESTEBÁN <sup>(1)</sup>, Rafael RUIZ FERRANDO <sup>(1)</sup>, Amor OLOMI CALDERÓN <sup>(1)</sup>, Jordi BORRÀS TALLADA <sup>(1)</sup>, Miguel GIL CRUZANS <sup>(1)</sup>, José Ignacio CANUDO SANAGUSTÍN <sup>(2)</sup>, Isabel FANLO GONZÁLEZ <sup>(3)</sup>, Víctor VIÑALS YÚFERA <sup>(4)</sup>, Francisco LERA GARCÍA <sup>(4)</sup>, Rafael LARMA LACASTA <sup>(4)</sup>, José Luis VILLARROEL SALCEDO <sup>(4)</sup>, Juan José GENÉRELO LANASPA <sup>(5)</sup>, Pablo MARTÍN RAMOS <sup>(6)</sup>, José Antonio CUCHÍ OTERINO <sup>(6)</sup>

<sup>(1)</sup> Sección de Espeleología del Club Atlético Sobrarbe, C/ Bajo los Muros, Antiguas Escuelas 22330-Ainsa, Huesca. ana\_32@hotmail.com, marianooolivanes@gmail.com, susias.muro@gmail.com, aolomi@gmail.com, jborras@ecmbarcelones.com, fotomiguelg@hotmail.com

<sup>(2)</sup> Museo de Ciencias Naturales de la Universidad de Zaragoza, Pl. Basilio Paraíso, 5. 50005- Zaragoza. jicanudo@unizar.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna, 12. 50009 Zaragoza. fanlo@unizar.es

<sup>(4)</sup> Grupo de Tecnologías en Entornos hostiles. GTE. Universidad de Zaragoza. Edificio I3A. C/ Mariano Esquillor Gómez s/n, 50018 Zaragoza. victor@unizar.es, lera@unizar.es, escuain@escuain.top, jlvilla@unizar.es

<sup>(5)</sup> Archivo Histórico Provincial de Huesca. Diputación General de Aragón, C/ Vidal de Canellas, 2. 22001-Huesca jjgenerelo@aragon.es

<sup>(6)</sup> Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural, Escuela Politécnica Superior de Huesca. Carretera de Cuarte, s/n. 22071-Huesca. pmr@unizar.es, cuchí@unizar.es

---

### Resumen

Los valles de Bielsa y Chistau/Gistau, situados en la cabecera del río Cinca, en el Pirineo altoaragonés, presentan interesantes mineralizaciones relacionadas con la aureola metamórfica de varios batolitos graníticos que han sido explotadas desde hace siglos, dando lugar a un interesante patrimonio minero. Se pueden destacar tres mineralizaciones. El conocido genéricamente como hierro de Bielsa, usado en obras de El Escorial y el canal Imperial de Aragón. Se obtenía por el método de la forja catalana en varios puntos de estos valles, a partir de minas a cielo abierto, como las del monte Mener y Barleto. Diversas minas subterráneas de plomo/plata se encuentran en ambos valles. Las más importantes eran Ana y Robert-Luisa, conocidas como de Parzán. Abiertas ya en la antigüedad mediante fuego, posiblemente ya se utilizaron para el *argentum oscense* y las monedas medievales aragonesas. Estas minas tuvieron su último auge entre 1912-1928, bajo la *Société des mines de Parzán*, que exportaba sus concentrados a Francia mediante teleférico. Como es habitual, hay diversas minas secundarias. Una de ellas, señalizada para el turismo, se encuentra en las cercanías del Hospital de Plan, en el municipio de Chistén/Gistaín. En el barranco de Cobol, en San Juan de Plan, se encuentra una mineralización de cobalto y níquel. Explotado para pigmento cerámico, un episodio de picaresca bohemia dio lugar a una interesante intervención de William Bowles. Posteriormente, fueron explotadas para el níquel por la *Cobalt and Nickel Mining Company Limited*, a finales del XIX. Todas las minas están hoy cerradas. Ambos valles fueron visitados por naturalistas y geólogos franceses a mediados del siglo XVIII.

Junto a las impresionantes obras del camino maderero del puerto de la Madera y el inicio del túnel del puerto de la Pez, sugieren un inusitado interés por parte de Francia.

**Palabras clave:** Bielsa, Chistau, cobalto, hierro, plomo, mina.

## ***An approach to the mining heritage of the valleys of Bielsa and Chistau (Huesca)***

### **Abstract**

*The valleys of Bielsa and Chistau/Gistau, located at the headwaters of the Cinca river, in the Pyrenees of Alto Aragon, present interesting mineralizations related to the metamorphic aureole of several granitic batholiths that have been exploited for centuries, giving rise to an interesting mining heritage. Three mineralizations can be highlighted. The first was known generically as Bielsa iron, used in the works of El Escorial and the Imperial Canal of Aragon. It was obtained by the Catalan forge method, in several points of these valleys from open-pit mines, such as those of Mount Mener and Barleto. Several underground lead/silver mines are found in both valleys. The most important were Ana and Robert-Luisa, known as Parzán. Opened already in antiquity by fire, they were possibly already used for the Huesca argentum and the medieval Aragonese coins. These mines had their last boom between 1912-1928, under the Société des mines de Parzán, which exported its concentrates to France by cable car. As usual, there are several secondary mines. One of them, signposted for tourism, is located near the Hospital de Plan, in the municipality of Gistaín. In the Cobol ravine, in San Juan de Plan, there is cobalt and nickel mineralization. Exploited the cobalt for ceramic pigment, a bohemian picaresque episode gave rise to an interesting intervention by William Bowles. They were later mined for nickel by the Cobalt and Nickel Mining Company Limited in the late 19th century. All the mines are now closed. Both valleys were visited by French naturalists and geologists in the mid-18th century. Together with the impressive works of the Madera Pass logging road and the start of the La Pez Pass tunnel, they suggest an unusual French interest.*

**Keywords:** Bielsa, Chistau, cobalt, iron, lead, mine.

## **Introducción**

Durante los últimos años se asiste a un interés por el patrimonio minero aragonés explorado por diversos grupos espeleológicos e investigadores de la Universidad de Zaragoza. En esta línea, el Museo de Ciencias Naturales de la Universidad de Zaragoza está desarrollando un proyecto para recuperar la memoria del patrimonio minero aragonés. Por su parte, la Comarca del Sobrarbe y el Geoparque Sobrarbe-Pirineos sacaron a concurso una ayuda, en el año 2021, para estudiar el patrimonio minero de esta comarca altoaragonesa que fue obtenida por una combinación de investigadores del Museo de Zaragoza, la sección de espeleología del Club Atlético Sobrarbe (CAS), el Grupo Tecnologías en Entornos hostiles (GTE) de la Universidad de Zaragoza y otros profesores

de la misma Universidad. Durante el desarrollo del mismo se realizó un amplio número de consultas de documentación administrativa en el Archivo Histórico Provincial de Huesca y se firmó un convenio entre el Gobierno de Aragón y la Universidad de Zaragoza para ofrecer un apartado dedicado a la minería en el buscador DARA (<https://dara.aragon.es/opac/app/simple/mine>). El presente trabajo resume la información obtenida sobre la cuenca alta del río Cinca, en la provincia de Huesca.

En el Alto Aragón, en la línea fronteriza con Francia se estructuran los valles de las cabeceras de los Cinca y Cinqueta. El primero entorno a la localidad de Bielsa, junto con Espierba, Javierre, Parzán y Chisagüés. En el segundo están las localidades de San Juan de Plan, Plan, Chistén/Gistaín, Saravillo y los tres núcleos del valle lateral de la Comuna: Sin, Señés y Serveto. Ambos valles se juntan a la altura de la localidad de Salinas.

La geología está dominada por los plutones paleozoicos de Barrosa, Punta y Millares. Al norte hay afloramientos del Cámbrico y Ordovícico. Al sur, aparecen areniscas rojas del Pérmico y Triás, recubiertas por materiales calizos del Cretácico en el oeste y del Jurásico en el este (IGME, 1982a y b; IGME, 2019). La estructura puede consultarse en las mencionadas publicaciones y en Van Lith (1968). En la periferia de los granitos hay una serie de minas, citadas en documentos legales desde el siglo XII y con enfoque técnico desde el siglo XVIII (Bowles, 1782; Palassou, 1784; Asso, 1798; Maestre, 1845; Comisión del Mapa geológico de España, 1876; Mallada, 1878; Calderón, 1910, Buil, 1997; etc.). Algunas de estas minas han sido estudiadas con detalle geológico (Fanlo, 1994a y b; Yuste, López Ciriano y Fernández Nieto, 1995; Yuste, Subías y Fernández Nieto, 1997; Yuste *et al.*, 1998. Yuste 2001. De Felipe *et al.*, 2014), además de informes internos de varias empresas.

## Mineralizaciones y patrimonio minero

El hierro de Bielsa es citado desde la Edad Media (Pallaruelo, 1994; Nieto, 1996; Garcés, 2011). Se cita el uso de herramientas de este material en las obras del El Escorial y en el canal Imperial de Aragón. Hay que reseñar que no hay ningún estudio específico sobre este metal. En la actualidad hay muy pocos objetos identificados como de tal origen, excepto la reja de la Virgen de Pineta y otra reja de una casa, hoy en el museo de Bielsa.

Las minas más importantes se encontraban en el Monte Mener (figura 1), situado entre los valles laterales de Urdiceto y Tringonier. En su zona superior, hacia los 2200 m s.n.m. hay un pequeño *gossan* que se ha minado superficialmente, ofreciendo oligisto y hematites. A media ladera hay un socavón donde aparece pirita. El mineral se transportaba a lomos de caballería, probablemente burros en su mayoría, hasta Bielsa (1050 m s.n.m.) en un trayecto, ida y vuelta de unos 25 km (Ortas *et al.*, 2021). Hay otro Mener en el barranco de Barleto, en el límite entre Bielsa y Chistau, cuyas minas, aun no localizadas, parecen ubicarse hacia los 2500 m s.n.m. Es también plausible que hubiera otros lugares donde aprovisionarse de mineral. Así, en las proximidades de mina Ana se ha localizado una veta de mineral de hierro.



Figura 1. Mapa de Baccigalupi (1795) y localización de la mina del pico Mener.

El metal se obtenía mediante forja catalana, sin fundición total, con carbón vegetal y martinetes. Se citan al menos tres forjas en Bielsa, una localizada entre la serrería y el cuartel de la Guardia Civil, otra estaba aguas abajo. Hay recuerdo de los martinetes; en adición, una calle de Bielsa lleva el nombre de La Farga. Se cita también otra forja en el barrio de Javierre, en la entrada del valle de Pineta. En el valle de Chistau está el topónimo bien identificado en el puente de la pista de Viados, conocido como Puen d'el Molin o de la Fonderia. Además, hay documentos de una forja en Salinas, en lugar no identificado. En Collet, término de Serveto, en La Comuna, se han encontrado modestos trozos de fundido de hierro, que sugieren transporte. Desde luego, el proceso era caro. Además del arrancado de mineral a gran altura, al largo transporte de este, más el acopio de carbón vegetal y el procesado, había que hacer un nuevo transporte de los productos semielaborados, panes y barras, a mucha distancia por muy malos caminos, incluso algún puerto (Tella, Mataire). L'Ainsa, donde el camino se suavizaba, está hoy a 33 km de Bielsa, mientras que centros de consumo, como Barbastro y Zaragoza, están a 87 km y 200 km, respectivamente. El acceso a Francia, por los duros puertos de frontera es más corto, pero había que contar con la competencia del hierro del Ariège, sin mencionar los problemas políticos. Todo parece indicar que la producción cesó a inicios del siglo XIX, aunque Madoz (1847) aun lo cita. No queda prácticamente ningún resto interesante que pueda considerarse patrimonio industrial.

Diversas minas subterráneas de plomo/plata se encuentran en ambos valles, sobre todo en los valles laterales de Barrosa, Chisagüés y Hospital de Parzán. Las más importantes eran Ana y Robert-Luisa, conocidas como de Parzán. Abiertas ya en la antigüedad mediante

fuego, posiblemente se utilizaron para el *argentum oscense* citado por Tito Livio, y las monedas de plata medievales aragonesas. Estas minas tuvieron su último auge entre 1912-1928, bajo la *Societé des mines de Parzán*, que exportaba sus concentrados a Francia mediante teleférico. Como es habitual en zonas mineras, hay bastantes minas secundarias.

Mina Ana presenta un espectacular desarrollo organizado en dos partes. En la zona superior hay una explotación antigua, con galerías siguiendo un filón vertiente al norte, figura 2a, y abiertas parcialmente al fuego. Posiblemente estuviera ya trabajada en la época romana en función de la información recogida en Martín Ramos *et al.* (2020), Corella *et al.* (2021) y Cuchí *et al.* (2021). El inferior se organiza como una mina de monte, con 5 galerías horizontales principales, de las que solo 3, dos parcialmente inundadas, tienen hoy salida al exterior. Dan acceso a un impresionante socavón de más de cien

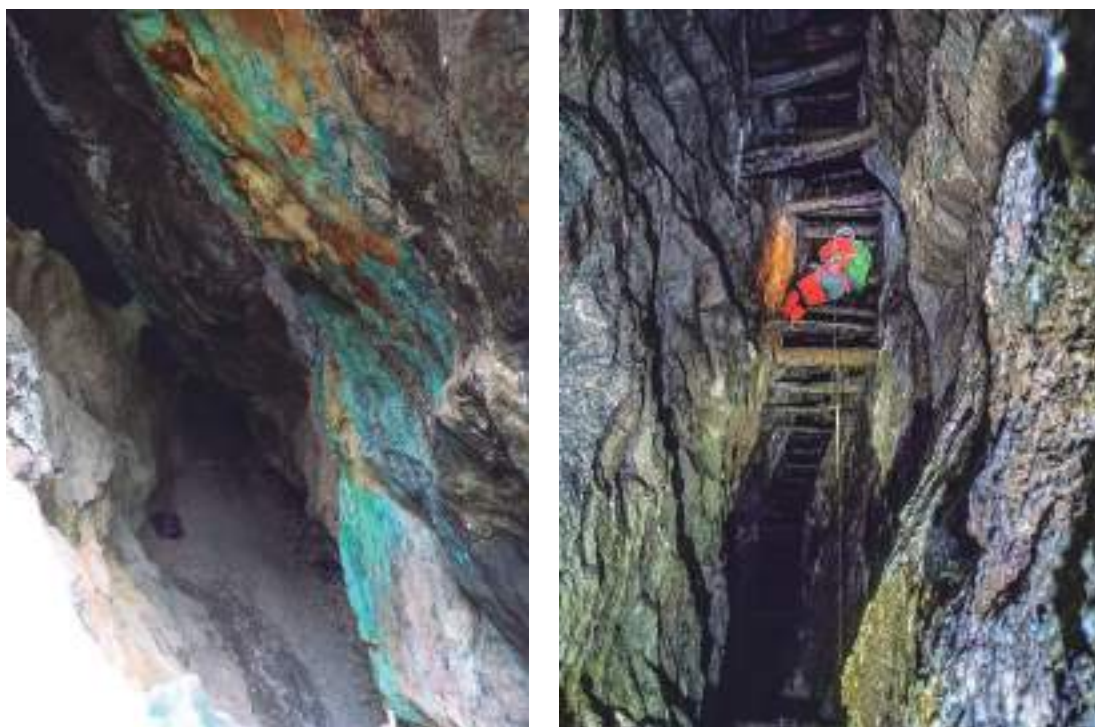


Figura 2. Mina Ana. Zona antigua (2a, izda) y moderna (2b, derecha)

metros de altura, unos 50 de largo y hasta 4 de ancho, figura 2b, vaciando un filón vertical de fluorita y galena, excavado por realce con andamiajes de madera. Datos históricos de Palassou (1784), Cervantes (1910) y actuales por pXRF certifican la presencia de plata. La mina se cerró en 1929, aunque hubo alguna tentativa de reapertura tras la última guerra civil, con labores de la empresa Sociedad Minero Metalúrgica de Boltaña, propiedad primero de José María Nuñez Isac y luego por Peñarroya (Calvo y Calvo, 2011). La mina es peligrosa, dado que el maderaje está podrido y fue ampliamente expoliada, según algunas fuentes, durante la llamada Bolsa de Bielsa en la guerra civil.



Figura 3. Vista aérea de la zona superior del filón de mina Robert. (3a, izquierda) y de una de las galerías (3b, derecha)

En la sierra de Liena, a la que se accede por Chisagüés, se encuentran las minas de Ruego, conocidas como mina Robert, organizada en dos sectores. El inferior, cerca de los restos del poblado minero, muy destruido, hay una serie de galerías que se consideran antiguas comparadas con las superiores que se abren en un filón que aflora en la superficie de la sierra (figura 3a, y 3b)). Una de estas galerías conecta con mina Luisa, situada en la cara noreste de la mencionada sierra. De esta, situada a 2400 m bajaba un cable, del que quedan diversas pilonas, restos de cable y vagonetas colgadas, hasta las instalaciones de concentración y oficinas de la empresa en el hospital de Bielsa que fueron también destruidas durante la guerra civil. De allí salía otro teleférico hasta el puerto de Salcorz hacia Moudang, hoy achatarrado.

Se ha señalado el interés patrimonial de estas estas minas sobre todo en los trabajos de Vivez (1997 a y b; 2001; 2002; 20042, a y b). Hay señalización en la zona de las oficinas, lavaderos y estación de transferencia del hospital de Bielsa. Mina Ana es peligrosa y de penoso acceso. Lo mismo se puede decir, en general de Robert-Luisa, aunque hay intención municipal de abrir alguna galería al turismo. Por otro lado, hay una pequeña mina acondicionada para el turismo en las cercanías del Hospital de Plan, en el municipio de Gistaín.

En el barranco de Cobol, en San Juan de Plan, se encuentra una mineralización de cobalto y níquel arsenical que ha tenido una dilatada e interesante historia desde el siglo XVIII, recogida en Solana (2020). Es posible que se explotara con anterioridad, dado que Matas *et al.*, (2021) encuentran cobalto con níquel y arsénico en azulejos antiguos de la seo de Huesca. En el siglo XVIII, el ingeniero William Bowles descubrió una curiosa estafa a las arcas reales; se minaba cobalto y se pagaba por plomo, por parte de una empresa centroeuropea (Bowles, 1782). Posteriormente, fue explotada por diversos empresarios españoles y franceses, que instalaron una fábrica en Saint Mamet, cerca de Luchón, destruida al inicio de la revolución francesa. La mina se sigue trabajando en el XIX, destacando la fase de la *Cobalt and Nickel Mining Company Limited* que, al no pagar a los trabajadores, dio origen al incidente de *Puen pecadors*. Desde finales del XIX, la mina, nominada San Carlos, está parada, aunque ha sido objeto de solicitudes de explotación.



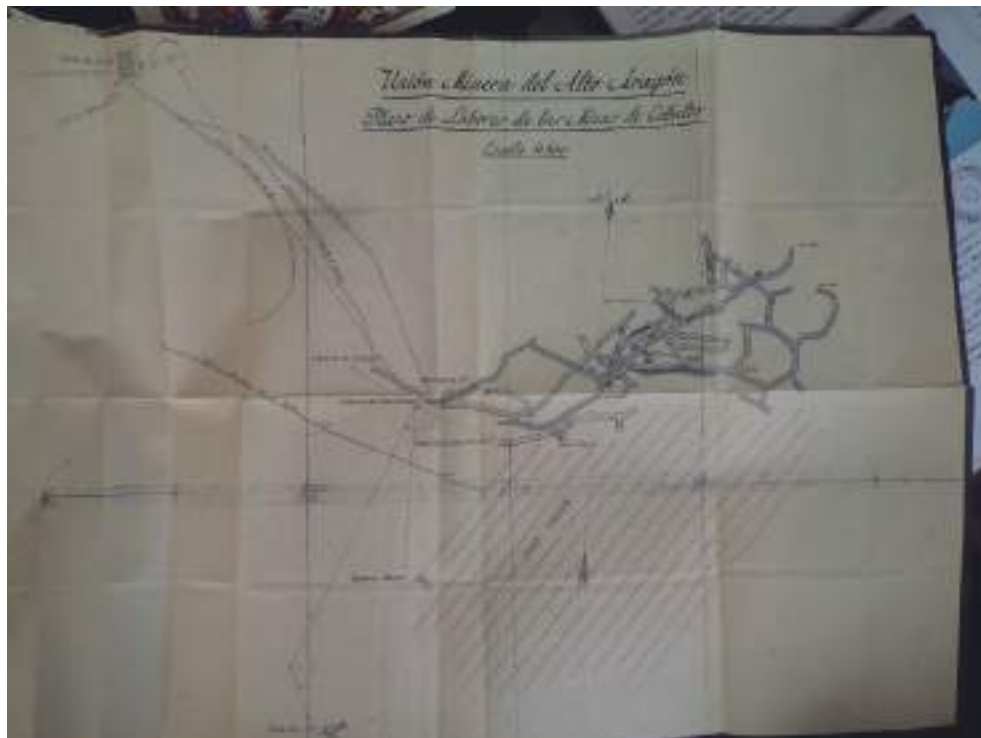


Figura 4. Topografía de la tercera galería de la mina de San Carlos. La realidad es más compleja.



Figura 5 (izquierda). Mineralización secundaria en mina San Carlos.



*Figura 6 (derecha). Restos del lavadero en barranco del Cobol. San Juan de Plan.*

Muy visitada por coleccionistas de minerales, dispone al menos de cinco galerías. Es muy peligrosa por laberíntica y fácil pérdida de orientación (figura 4), además del mal estado del maderaje y los continuos derrabes de material.

Aunque la mina, y sus minerales tienen un evidente interés, figura 5, el acceso a la mina es muy peligroso. El lavadero se encuentra completamente destruido, figura 6, salvo algún muro. No hay grandes escombreras y la mina ha sido prácticamente limpiada de equipamiento minero.

## **A modo de conclusiones**

Es evidente que los valles de Bielsa y Chistau han tenido una interesante historia minera de la que resta algún patrimonio, especialmente en las minas. La mayor parte de las mismas están en una situación que se puede calificar como de muy peligrosa y nada aptas para el turismo sin importantes inversiones.

Uno de los temas de cierto interés, relacionados con las minas de ambos valles, son las visitas específicas de naturalistas franceses durante la segunda mitad del siglo XVIII. El valle de Bielsa es el único valle español visitado específicamente por el abate Pierre Bernard Palassou (1745-1830), protogeólogo francés, en su larga investigación norpirenaica. En este valle, tras pasar el puerto de Bielsa, entre impresionantes precipicios, cita las minas de hierro (Mener) y plomo (probablemente mina Ana). Aunque afirma haber perdido sus notas, recuerda con detalle la proporción de plata en dos tipos de galena argentífera (Palassou, 1781). Otro visitante ilustre fue Guillaume-Chrétien de Lamoignon

de Malesherbes, político, naturalista, e infructuoso abogado de Luis XVI, y que también murió guillotinado. En 1764 realizó un maratónico viaje a San Juan de Plan, para ver la mina de cobalto, desde Luchon en solo cuatro días. A la ida pasó por el puerto de Plan (localmente llamado de Gistaín o de Chistén) y retornó por Sahún y Benasque, donde le pidieron papeles. Curiosamente, estando en San Juan, no se acercó a la mina al ser informado que estaba arruinada por un compatriota, que dirigía la farga local (Lamicq, 1990) Es dudoso que esto fuera cierto, porque unos años más tarde estas minas eran explotadas por una empresa francesa y el mineral concentrado en unas instalaciones junto a Bagnères de Luchon, destruidas al inicio de la revolución francesa (Solana, 2020).

El interés francés por estos valles era más amplio. La pugna marina entre Francia y Gran Bretaña obligó al primer país a realizar importantes talas en el Pirineo francés, con obras espectaculares como el impresionante *chemin de la mâture* en el valle de Aspe. Desde luego, los bosques del valle de Chistau atrajeron la atención de asentistas de los astilleros franceses. En el valle de Louron se inició en 1744 la construcción de un túnel, que debería tener más de 500 metros de longitud, a 2200 metros de altura y en un lugar bastante inaccesible, con el objetivo de transportar madera hacia Francia bajo el puerto de La Pez. Apoyado por Antoine Mègret d'Etigny, intendente de Auch, el promotor fue detenido años más tarde en Zaragoza, cuando fue a recabar la financiación pública española, supuestamente prometida, y una vez perforados 44 metros. Al mismo tiempo, en una curiosa redundancia, se realizó la pista forestal del puerto de la Madera, seguramente para transportar troncos de la val de Chistau a Francia, cuyo tobogán por la parte francesa aun fue visto, años más tarde por Louis François Élisabeth Ramond, barón de Carbonnières. Estas noticias dan pie para pensar que las actuaciones mencionadas podrían formar parte de un plan más amplio de expansión territorial del vecino país, dado que, por estas fechas, durante el reinado de Luis XV, Francia se anexionó Córcega y Lorena.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado, parcialmente por una ayuda de la Comarca de Sobrarbe-Geoparque. Se agradece la colaboración de la familia Vidallé de Bielsa y Parzán; de Eugenio Monesma, gran documentalista, de Roberto Serrano, alcalde de San Juan de Plan; Luis Ángel Escalona, del museo de Bielsa y numerosos vecinos de ambos valles. Agradecer la búsqueda de documentación del personal del Archivo Histórico Provincial de Huesca y de las bibliotecas de la Escuela Politécnica Superior de Huesca, del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza y del Instituto de Estudios Altoaragoneses.

## Referencias

- Asso, I. J. de. (1798). *Historia de la economía política de Aragón*. Imprenta de F. Magallón. Zaragoza. 487 p.
- Baccigalupi, L. (1795). Disposición de los Valles, y Puertos de la Frontera de Aragón. Servicio Geográfico del Ejército, Madrid. *Cartoteca Histórica. Huesca*, 23
- Bowles, W. (1782). *Introducción a la historia natural y a la geografía física de España*. Segunda edición. Imprenta real. Madrid. 573 p.
- Buil, L. (1997). *Viaje por el Alto Aragón*. Noviembre de 1794. La Val de Onsera. 251 p.
- Calderón, S. (1910). *Los minerales de España*. 2 tomos. Madrid. Imprenta de Mariano Arias. 416 + 561 p.

- Calvo, G., Calvo, M. (2011). *La sociedad minero metalúrgica de Peñarroya en el Pirineo de Huesca*. Actas XII Congreso internacional sobre patrimonio geológico y minero, 389-398
- Comisión del Mapa geológico de España, (1876). *Minerales de hierro de España*. Boletín de la Comisión del Mapa geológico de España. Imprenta de M. Tello. Madrid. 404 p.
- Corella, J. P., Sierra, M. J., Garralón, A., Millán, R., Rodríguez-Alonso, J., Mata, M. P., Vicente de Vera, A., Moreno, A., González-Samperiz, P., Duval, B., Amouroux, D., Vives, P., Cuevas, C.A., Adarnes, J.A. Wilhelm. B., Saiz-López, A. & Valero-Garcés, B. L. (2021). Recent and historical pollution legacy in high altitude Lake Marboré (Central Pyrenees): A record of mining and smelting since pre-Roman times in the Iberian Peninsula. *Science of The Total Environment*, 751, 141557.
- Cuchí, J. A., Alvarez, P., Martín-Gil, J., Moldovan, M., Aguilera, I., & Martín-Ramos, P. (2021). Mineral provenance of Roman lead objects from the Cinca River basin (Huesca, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 37, 102979.
- De Felipe, I., Fanlo, I., Mateo, E., & Subías, I. (2014). The Bizielle vein (valle de Gistain): A case of iron oxide transformations at the Pyrenees of Spain. *Geochemistry*, 74(1), 77-85.
- Fanlo, I. (1994a). *Los yacimientos de galena y fluorita de Ruego y Parzán (Bielsa, Pirineo aragonés)*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. 225 p.
- Fanlo, I. (1994b). Los yacimientos de galena y fluorita de Ruego y Parzán (Bielsa, Pirineo aragonés). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 14: 231-238.
- Garcés, C. (2011). Duendes, brujas y demonios en un libro adquirido por el IEA que perteneció a Lastanosa, publicado en 1621 por el médico aragonés Salvador Arvedines. *Argensola*, 121: 123-144.
- IGME (1982a). *Mapa geológico Nacional 1:50.000. Hoja 179. Bielsa*. 48 p. y un mapa.
- IGME (1982b). *Mapa geológico Nacional 1:50.000. Hoja 147 Lienas*. 26 p. y un mapa.
- IGME (2019). *Mapa geológico del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido*. 1:25.000.
- Lamicq, P. (1990). *Les voyages de "Monsieur Guillaume": Malesherbes dans les Pyrénées en 1767*. IV Le voyage d'Aragon. Pyrénées 163-164 (3-4) 247-281.
- Madoz, P. (1847). *Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de ultramar*. Tomo IX. Est. tipográfico-Literario Universal. Madrid, 672 p.
- Maestre, A. (1845). *Descripción geognóstica del Distrito Minero de Aragón y Cataluña*. Anales de Minas, t. III, Madrid
- Mallada, L. (1875). *Breve reseña geológica de la provincia de Huesca*. Imprenta T. Fortanet. Madrid. 64 p.
- Mallada, L. (1878). *Descripción física y geológica de la provincia de Huesca*. Imprenta y Fundación De Manuel Tello, 439 p, 1 mapa.
- Marsan, F. (1900). *Un projet de route transpyrénéenne pour relier directement Paris et Madrid à la fin du XVIII siècle*. Imprimerie Nationale, Paris. 35 p.
- Martín-Ramos, P., Aguilera, I., Martín-Gil, J., Álvarez, P., Moldovan, M., Arbués, M. J., Cuchí, J. A. (2020). Asignación de la mineralización-origen a piezas de plomo de época romana depositadas en el Museo de Huesca. *Lucas Mallada*, 99-113.
- Matas, B., Martín Ramos, P., Cuchí, J. A. (2021). Caracterización por XRF de una colección de azulejos de la catedral de Huesca. *Argensola*, 131: 119-128.
- Nieto, J.J. (1996). El proceso sidero-metarlúrgico altoaragonés: los valles de Bielsa y Gistaín en la Edad Moderna (1565-1800). *Llull*, 19(37): 471-508.
- Ortas, A., Canudo, J.I., Cuchí, J.A., Fanlo, I., Martín Ramos, P., Oliván, M., Ruiz, R., Borrás, J., Chiva, A., Gil, M. (2021). El hierro en el Alto Cinca: las minas del pico Mener. *Lucas Mallada*, 24 (en prensa).
- Ortiz de Villacián, J., (1929). Los filones de galena de Bielsa y Parzán. *Boletín Oficial de minas y metalurgia*, 150: 1069-1177.
- Palassou, P. B. (1784). *Essai sur la minéralogie des Monts Pyrénées*. Didot, Alex, Esprit. Paris. 124 p.
- Pallaruelo, S. (1994). El hierro en los valles de Bielsa y Gistau en el siglo XVI. *Revista del Centro de Estudios de Sobrarbe*, 1: 135-161.
- Ramond des Carbonnières, L.F.E. (1792-1795). *Carnets Pyrénéens*. Edición a cargo de P. Debofle. Monhelios. 99 p, más anejos.
- Solana, J. (2020). Las minas de cobalto de San Juan de Plan (San Chuan). *Rolde de estudios aragoneses*, 200
- Van Lith, J.G. J. (1968). Geology of the Spanish part of the Gavarnie Nappe (Pyrenees) and its underlying sediments near Bielsa (Province of Huesca). *Geologica ultraiectina*, 10: 1-64.
- Vives, Ph. (1997a). Un centro industrial en el término de Bielsa: el Hospital de Parzán. Actividades transfronterizas para la explotación del plomo argentífero desde finales del S. XIX hasta principios del s. XX. En *Relaciones históricas del Valle de Bielsa con Francia Ayuntamiento de Bielsa*. pp. 37-61.

- Vivez, Ph. (1997b). *Minas del Hospital de Parzán*. En Relaciones históricas del Valle de Bielsa con Francia Ayuntamiento de Bielsa, 63-95.
- Vivez, Ph. (2001). Los senderos del hierro y de la plata en los altos valles del Aure y del Cinca: ocio, negocio y cultura. *Tresorols*, 6: 40-46.
- Vivez, Ph. (2002). El camino del ferrocarril aéreo de la mina Luisa en el hospital de Parzán. *Aragón turístico y monumental*, 78 (354): 37-38.
- Vivez, Ph. (2004). ¿Qué más sabemos sobre las minas de Mener? Las minas de hierro del valle de Bielsa (Alto Aragón), siglos XIII a XIX. *Revista del Centro de Estudios de Sobrarbe*, 10: 63-78.
- Vivez, Ph. (2012a). *La revolución industrial frente al Monte Perdido: La empresa internacional Societé desde Mines de Parzan (1912-1928), valle de Bielsa, Sobrarbe, Aragón*. Actas XII Congreso internacional sobre patrimonio geológico y minero. Pp 10-24.
- Vivez, Ph. (2012b). *Excursión por el circo de Barrosa; minas de Parzán*. Actas XII Congreso internacional sobre patrimonio geológico y minero. III salidas al campo, 67-80.
- Yuste, A., López Ciriano, A., Fernández Nieto, C. (1995). Morfología y mineralogía de la mina Ana (Bielsa, Huesca). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 18 (2): 35-36.
- Yuste, A., Subías, I., Fernández-Nieto, C. (1997). El filón Ana (Bielsa, Huesca). Aspectos estructurales e implicaciones genéticas. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 20-A: 63-64.
- Yuste, A., Subías, I., López, A., Orozco, M y C. Fernández-Nieto (1998). Estudio estructural y mineralógico del filón Ana: distrito minero de Bielsa-Parzán (Alto Aragón). Datos preliminares. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 21: 29-46.
- Yuste, A. (2001). *Mineralizaciones filonianas de F-Pb de Bielsa (Pirineos aragoneses); papel de los fluidos sintectónicos en su génesis*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. 251 p.



## Caracterización molecular e isotópica de espeleotemas de tubos de lava de Lanzarote con interés para la astrobiología y conservación

Vera PALMA <sup>(1)</sup>, Nicasio Tomás JIMÉNEZ MORILLO <sup>(2)</sup>, José María De la ROSA ARRANZ <sup>(3)</sup>, Sara GUTIÉRREZ PATRICIO <sup>(2)</sup>, José Antonio GONZÁLEZ PÉREZ <sup>(3)</sup>, Beatriz CUBERO GARCÍA <sup>(3)</sup>, Ana Teresa CALDEIRA <sup>(1)</sup>, Francesco SAURO <sup>(4)</sup>, Ana Zélia MILLER <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Laboratório HERCULES, Universidade de Évora, Palácio do Vimioso, 7000-809 Évora, Portugal. vscpalma@uevora.pt, atc@uevora.pt

<sup>(2)</sup> Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development, Universidade de Évora, Pólo da Mitra, Ap. 94, 7006-554 Évora, Portugal. ntjm@uevora.pt

<sup>(3)</sup> Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS-CSIC), Av. Reina Mercedes 10, 41012 Sevilla, España. jmrosa@irnase.csic.es, sara.gutierrez@irnase.csic.es, jag@irnase.csic.es, bcubero@irnase.csic.es, anamiller@irnase.csic.es

<sup>(4)</sup> Department of Biological, Geological and Environmental Sciences, Italian Institute of Speleology, Bologna University, Via Zamboni 67, 40126, Bologna, Italy. cescosauro@gmail.com

---

### Resumen

Las cuevas volcánicas han atraído durante los últimos años el interés científico por la detección de cuevas similares en la Luna y Marte. La isla volcánica de Lanzarote (Canarias, España) alberga una extraordinaria variedad de cavidades formadas durante diferentes procesos volcánicos. De hecho, el tubo de lava La Corona es uno de los más grandes conocidos en la Tierra, y presenta innumerables analogías con los tubos de lava de la Luna y Marte. El objetivo principal de este trabajo, realizado en el marco del proyecto TUBOLAN, fue estudiar la composición molecular de la fracción orgánica, concretamente los compuestos lipídicos, aislados en espeleotemas de diferentes tubos de lava de la isla de Lanzarote, con el fin de entender como las firmas biológicas se preservan en el registro geológico y pueden servir de modelos para la búsqueda en un futuro próximo de vida microbiana en tubos de lava del planeta rojo. Para este estudio se han analizado 6 muestras de espeleotemas de 5 cuevas diferentes mediante técnicas de cromatografía de gases, espectrometría de masas, pirolisis analítica y espectrometría de relaciones isotópicas de carbono y nitrógeno (e.g., GC/MS, Py- GC/MS y EA/IRMS). La distribución observada de los alcanos lineales de bajo peso molecular se relacionó con un origen microbiano, hecho que fue confirmado por la presencia de ácidos grasos metilados de cadena corta (C<20). Por otro lado, la existencia de ciertos compuestos lipídicos de alto peso molecular considerados biomarcadores de vegetación superficial, mostró cierta influencia de la vegetación existente en la superficie sobre las cuevas. Estos compuestos pueden haber sido incorporados mediante procesos de lixiviación superficial. Estos resultados fueron confirmados mediante el estudio de los isótopos estables de carbono y nitrógeno. El valor medido de  $\delta^{13}\text{C}$  -24 ‰ en los extractos es característico de vegetación con fotosistema del tipo C<sub>3</sub>, mientras que valores de  $\delta^{15}\text{N}$  cercanos a 0 ‰ indicarían la presencia de fertilizantes inorgánicos, utilizados en las zonas de cultivo de la vid existentes sobre la cueva. El estudio de la composición lipídica y de isótopos estables

de la fracción orgánica de los espeleotemas de cuevas volcánicas de la Isla de Lanzarote puede ser de utilidad para identificar vestigios de vida (presente y pasada), así como las alteraciones sufridas, ya sea por cambios ambientales o antrópicos.

**Palabras clave:** biogeoquímica, biomarcadores, cuevas volcánicas, lípidos, materia orgánica.

## ***Molecular and isotopic characterisation of Lanzarote lava tube speleothems of astrobiological and conservation interest***

### **Abstract**

*Volcanic caves have recently attracted the scientific interest due to the detection of similar caves on the Moon and Mars. The volcanic island of Lanzarote (Canary Islands, Spain) is home to an extraordinary variety of cavities formed by different volcanic processes. The Corona lava tube is one of the largest known on Earth, and it features countless analogies to the lava tubes of the Moon and Mars. The main objective of this work, carried out within the framework of the TUBOLAN project, was to study the molecular composition of the organic fraction, specifically the lipid compounds, isolated in speleothems of different lava tubes of the island of Lanzarote, in order to understand how biological signatures are preserved in the geological record and can serve as models for the search for microbial life in lava tubes of the red planet. For this study, 6 samples of speleothems from 5 different caves have been analyzed using gas chromatography techniques, mass spectrometry, analytical pyrolysis and spectrometry of carbon and nitrogen isotopic ratios (e.g., GC/MS, Py-GC/MS and EA/IRMS). The characteristic distribution of linear alkanes of low molecular weight was related to a microbial origin, which was confirmed by the presence of short-chain methylated fatty acids (C<20). On the other hand, the existence of certain lipid compounds of high molecular weight, considered biomarkers of surface vegetation, suggests the influence of lipidic compounds from vegetation, which are incorporated in speleothem chemistry by surface leaching processes. These results were also confirmed by carbon and nitrogen isotope analysis, as the value of  $\delta^{13}\text{C}$  -24 ‰ is characteristic of C3 vegetation, while the  $\delta^{15}\text{N}$  close to 0 ‰ indicates the presence of inorganic fertilizers, possibly used in the vine cultivation areas above the cave. The study of the lipid composition and stable isotopes of the organic fraction of speleothems from volcanic caves of Lanzarote can be useful to identify biosignatures preserved in the rock record, as well as to reconstruct environmental changes and surface vegetation dynamics.*

**Keywords:** biogeochemistry, biomarkers, lipids, organic matter, volcanic caves.



## Introducción

Los biomarcadores lipídicos son moléculas orgánicas con un precursor de origen conocido y estable. Aunque se encuentran en todos los hábitats, estos compuestos son sintetizados por organismos vivos y pueden ser exclusivos de distintas especies. Por lo tanto, es factible relacionar determinados compuestos lipídicos con su origen. Independientemente de la especificidad taxonómica, los biomarcadores lipídicos también se pueden utilizar como *proxies* paleoambientales, ya que existe una correlación significativa con la temperatura, la salinidad y la disponibilidad de oxígeno, debido a que muchas especies pueden adaptarse a los cambios ambientales ajustando su composición lipídica. El estudio de este tipo de biomarcadores climáticos y ambientales se ha centrado tradicionalmente en ambientes marinos y terrestres, aunque recientemente, se ha puesto el foco en espeleotemas de cuevas kársticas. Sin embargo, el origen de los lípidos en las cuevas es poco conocido (Blyth *et al.*, 2016). Pueden ser el resultado de comunidades microbianas adaptadas a estos ecosistemas subterráneos, o de la biomasa de suelos superficiales suprayacentes (Xie *et al.*, 2003).

La isla volcánica de Lanzarote, localizada en el océano Atlántico y perteneciente al archipiélago de Canarias (España), alberga una impresionante variedad de cavidades formadas por diferentes procesos volcánicos. Teniendo en cuenta el clima árido de la isla y la escasez de suelo que cubre los campos de lava del Geoparque de Lanzarote, se considera como un análogo excepcional de la Luna y Marte, con ambientes subterráneos de interés para la búsqueda de compuestos moleculares, con un enorme potencial para los campos de la astrobiología y la paleoclimatología. Su estudio en los tubos de lava de la Tierra es crucial en nuestra búsqueda para determinar si hay o no vida más allá de la Tierra, así como en las condiciones ambientales en las que se ha desarrollado.

Este trabajo tuvo como objetivo principal investigar, por primera vez, la aplicabilidad de los biomarcadores lipídicos extraídos de espeleotemas de tubos de lava de Lanzarote para evaluar la presencia de vida en el registro geológico y las condiciones ambientales durante su formación. Para ello se han utilizado técnicas de espectrometría de masas, como EA/IRMS, Py- GC/MS y GC-TOF/MS, que han permitido obtener información sobre la composición isotópica y molecular de los depósitos minerales secundarios de los tubos de lava de Lanzarote. Estos datos pueden ser útiles para la búsqueda de posibles vestigios de vida presente o pasada en otros planetas.

## Materiales y métodos

### *Localización y muestreo*

En mayo de 2021 se llevó a cabo una campaña de muestreo, en el marco de proyecto de investigación TUBOLAN, en cinco tubos de lava de la isla de Lanzarote (Isla Canarias, España), con el permiso del Geoparque de Lanzarote y del Parque Nacional de Timanfaya. Combinando espeleología, microbiología, mineralogía y biogeoquímica, fueron recogidas muestras de depósitos de minerales secundarios en los siguientes tubos de



Figura 1. Localización de los tubos de lava muestreados en la isla de Lanzarote durante la campaña de muestreo realizada en mayo de 2021, en el marco del proyecto TUBOLAN.

lava de Lanzarote (figura 1): i) sección del tubo lávico de la Corona, Jameo de la Puerta Falsa (MCFF); ii) Cueva de los Naturalistas (CN); iii) Cueva Las Breñas (LB); iv) Cueva Paso-Esqueleto (PE, en el Parque Nacional de Timanfaya), y v) tubo Montaña Rajada (MR, en el Parque Nacional de Timanfaya).

Las cuevas muestreadas se seleccionaron para cubrir el mayor periodo de tiempo posible desde la formación de las cavidades. Para estos muestreos se tomó la mínima cantidad de muestra necesaria para los análisis para minimizar el impacto en los ecosistemas subterráneos. Se muestrearon nichos representativos de depósitos de minerales secundarios en condiciones asépticas, mediante el raspado con bisturís estériles de las superficies de espeleotemas y paredes de lava.

## Extracción de lípidos y análisis biogeoquímico

El estudio isotópico y molecular de diferentes fracciones lipídicas presentes en la fracción orgánica de los espeleotemas de las 5 cuevas estudiadas en la Isla de Lanzarote (figura 1) se realizó siguiendo los procedimientos analíticos de la figura 2. La caracterización isotópica de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) y nitrógeno ( $\delta^{15}\text{N}$ ) se llevó a cabo siguiendo el protocolo descrito por Miller *et al.* (2016). Para ello se empleó un analizador elemental (EA), con un reactor de combustión, acoplado a través de un ConFlo IV a un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas (IRMS, ThermoFisher Scientific). La caracterización molecular de

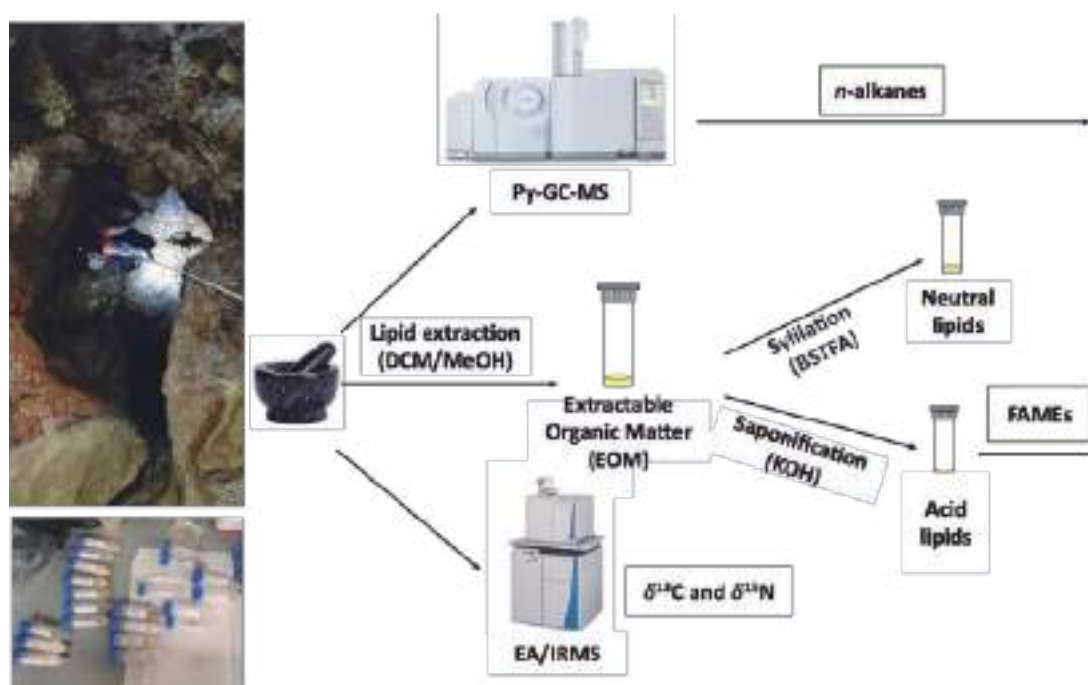


Figura 2. Esquema simplificado de la metodología empleada en la caracterización isotópica y molecular de espeleotemas de los tubos de lava de Lanzarote.

la serie homóloga de alcanos de cadena lineal, obtenido mediante pirólisis analítica (Py-GC/MS, Frontier Lab y Shimadzu), se realizó monitorizando directamente el ion con  $m/z=85$ . Por el contrario, la fracción de ácidos grasos fue analizada empleando el protocolo descrito por Jiménez-Morillo *et al.* (2017). Para ello se realizó la extracción secuencial de la materia orgánica extraíble empleando diferentes disolventes orgánicos, tras lo cual se realizó la acidificación y metilación ( $\text{BF}_3/\text{MeOH}$  (14 %)) de los ácidos grasos presente en las muestras. Los ácidos grasos metilados (FAMES) fueron analizados mediante cromatografía gaseosa acoplada a espectrometría de masas (GC/MS). La asignación de los compuestos se basó en la comparación con los espectros de masas estandarizados de diferentes bibliotecas de espectros de masas (NIST 14 y WILEY 7).

## Resultados y discusión

La figura 3 muestra el análisis de varianza (one-way ANOVA) de los valores isotópicos de  $\delta^{15}\text{N}$  (figura 3A) y  $\delta^{13}\text{C}$  (figura 3B) de las muestras de espeleotemas de las 5 cuevas seleccionadas. La composición isotópica de nitrógeno fue significativamente diferente entre algunas cuevas, observándose valores cercanos a 0 ‰, lo que puede indicar la presencia de fertilizantes sintéticos empleados en las actividades del cultivo de vid, que por percolación puede estar infiltrándose dentro de la cueva y quedando retenido en los espeleotemas (Miller *et al.*, 2022). Sin embargo, el valor 0 ‰ de nitrógeno isotópico en

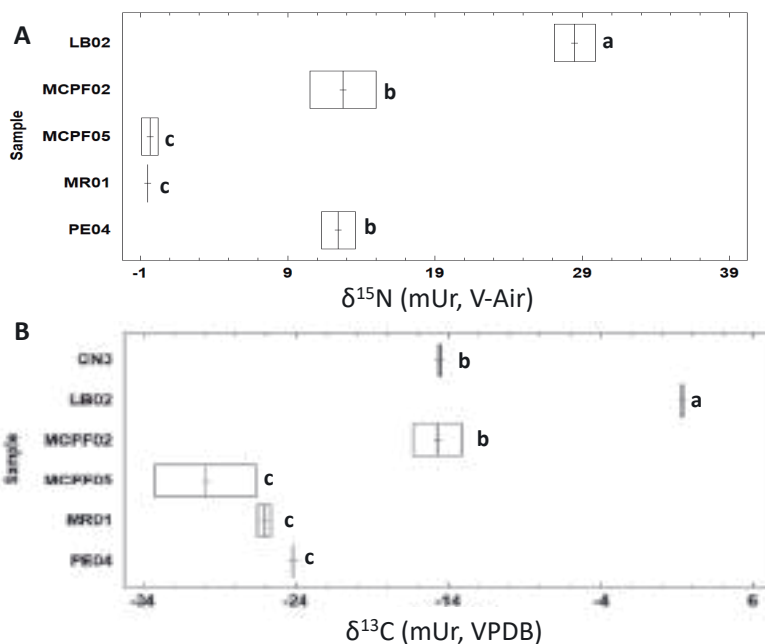


Figura 3. Gráfica de caja y bigotes de los valores  $\delta^{15}\text{N}$  (A) y  $\delta^{13}\text{C}$  (B). Las cajas con diferente letra indican la existencia de diferencias significativas (one-way ANOVA; prueba de Tukey,  $p = 0,05$ ).

estas muestras puede tener relación con algún microorganismo simbiote que permite la captación de N atmosférico (Fry, 2006). También se observan valores intermedios de  $\delta^{15}\text{N}$  (~ 12 ‰) para las muestras MCPF03 y PE04. Este valor puede estar relacionado con una actividad microbiana elevada, ya que los microorganismos asimilan mejor el isótopo ligero ( $^{14}\text{N}$ ), dejando un residuo isotópicamente más pesado (Szpak, 2014). Por último, la muestra LB02 presenta el valor significativamente más elevado de nitrógeno isotópico (aproximadamente 29 ‰). Este valor puede tener su origen en el empleo de fertilizantes orgánicos (ganado), restos de algún animal en estado de descomposición, o bien debido a un impacto antropogénico dentro de la cueva, ya que este valor de  $\delta^{15}\text{N}$  es también característico de residuos humanos (Miller *et al.*, 2022).

En relación al carbono isotópico (figura 3B), se observa la existencia de 3 grupos de muestras significativamente diferentes. Las muestras MCPF05, MR01 y PE04 presentaron valores de  $\delta^{13}\text{C} < -24$  ‰, lo que significa que la fracción orgánica preservada en ellos tiene el valor característico de organismos fotosintéticos del tipo C3 (vegetación superior). Esto puede significar que hay un aporte de biomasa superficial que está siendo infiltrada dentro de la cueva (Miller *et al.*, 2020, 2022). Por otro lado, se observa la existencia de muestras con valores de carbono isotópico más pesados (~ -14 ‰) que puede ser debido a la existencia de una materia orgánica muy alterada, producida por actividad microbiana (Miller *et al.*, 2022). Por otro lado, este valor puede tener su origen en la existencia de vegetación del tipo crasulácea, la cual puede adaptar su fotosistema dependiendo de las condiciones ambientales (Fry, 2006). Sin embargo, también puede existir la mezcla de

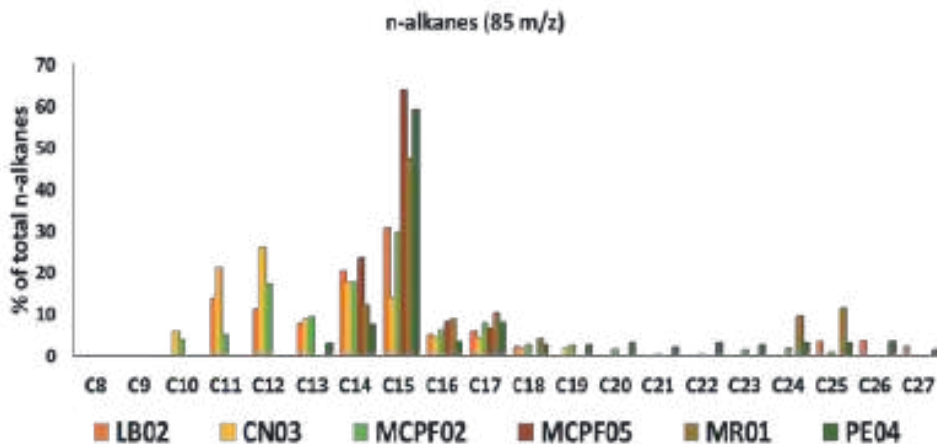


Figura 4. Abundancia relativa de alcanos lineales (m/z 85), identificados en los pirocromatogramas de las 6 muestras de espeleotemas estudiadas.

biomasa vegetal de plantas de tipo C3 (~ -25 ‰) con plantas con fotosistema C4 (~ -5 ‰), dando un valor medio próximo a -15 ‰ (Miller *et al.*, 2022). Por último, la muestra LB02 presenta un valor isotópico positivo, lo cual es debido a la presencia de carbonatos en su matriz, cuyo valor de  $\delta^{13}\text{C}$  es igual a 0 ‰.

La figura 4 presenta las abundancias relativas de la serie homóloga de alcanos lineales (m/z 85) de las 6 muestras de espeleotemas recogidas en 5 tubos de lava de Lanzarote. Se puede observar que existe un predominio de los alcanos lineales de bajo peso molecular (< C21), lo que indica un origen microbiano (Xie *et al.*, 2003). También se observa que no existe una preferencia en la paridad de estos compuestos, es decir, no existe un predominio de los alcanos lineales impares sobre los pares y viceversa. Por tanto, la combinación de estos dos resultados sugiere que el origen principal de la materia orgánica preservada en los espeleotemas es microbiano. Sin embargo, no se puede descartar la existencia de un aporte de materia orgánica superficial, ya que también se observa la presencia de alcanos lineales de alto peso molecular (figura 4). Estos compuestos tienen un origen muy característico y es la biomasa vegetal que se desarrolla en la superficie de la cueva. Estos alcanos lineales de alto peso molecular han sido empleados como biomarcadores vegetales (Eglinton y Eglinton 2008). Cabe destacar que la muestra MR01 presenta un máximo en el alcano C25 (Pentacosano), el cual ha sido empleado como biomarcador de especies vegetales herbáceas/arbustivas (Bull *et al.*, 2000). Este resultado concuerda con la vegetación superior observada, ya que por las características climáticas y topográficas no existen especies arbóreas en esta región.

Con respecto a la fracción de ácidos grasos (figura 5), la distribución de estos compuestos metilados (FAMES) presenta un máximo en los de bajo peso molecular (< C20), con un máximo en los ácidos hexadecanoico y octadecanoico (ácido palmítico y ácido esteárico, respectivamente). Este patrón de distribución es característico de las comunidades bacterianas (Blyth *et al.*, 2011; Xie, 2005). Al igual que con los alcanos lineales, también

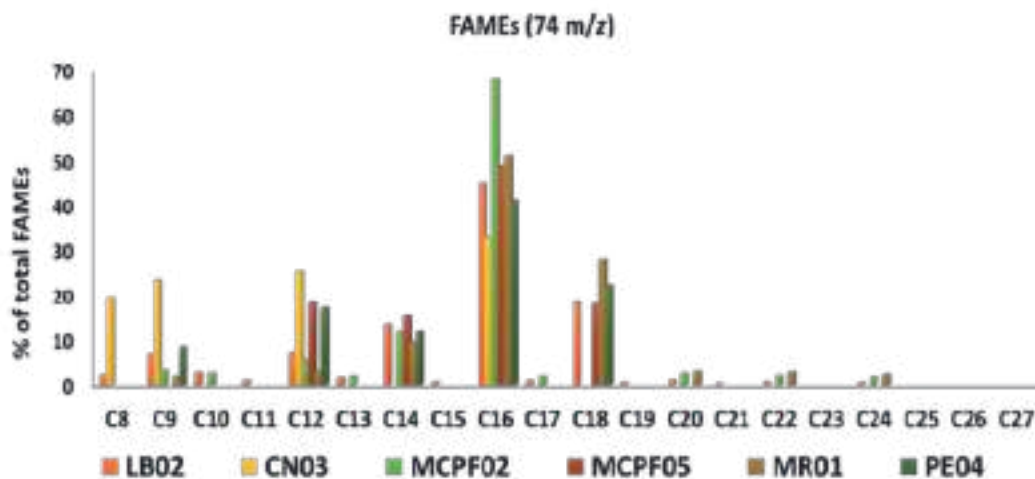


Figura 5. Abundancia relativa de ácidos grasos metilados (FAMES, m/z 74), identificados en los cromatogramas de las muestras de espeleotemas de cuevas volcánicas de Lanzarote.

se observaron FAMES de alto peso molecular (> C20) y con predominancia par en algunas muestras de espeleotemas, lo que vuelve a resaltar el hecho de que puede existir una contribución significativa de biomasa superficial que puede estar infiltrándose dentro de la cueva (Eglinton y Eglinton 2008).

Los resultados de la caracterización isotópica de la fracción orgánica total y de la composición molecular de la fracción lipídica de las muestras de espeleotemas de cuevas volcánicas de Lanzarote han permitido identificar las posibles fuentes de origen, así como conocer las diferentes alteraciones producidas por factores ambientales y antropogénicos (uso de diferentes tipos de fertilizantes). Este trabajo ha demostrado que el estudio isotópico y molecular de la fracción orgánica preservada en los espeleotemas puede ser de gran utilidad para la búsqueda de posibles vestigios de vida presente y pasada preservada en espeleotemas de cuevas volcánicas y su adaptación a alteraciones ambientales y antropogénicas (paleoclimatología).

## Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto de investigación TUBOLAN PID2019-108672RJ- I00 y del contrato Ramón y Cajal (RYC2019-026885-I), financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación MCIN/AEI/10.13039/501100011033. Además, este trabajo ha recibido apoyo de la Fundação para a Ciência e Tecnologia de Portugal (FCT), en el marco del proyecto MICROCENO (PTDC/CTA-AMB/0608/2020), y del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) a través del proyecto intramural PIE\_20214AT021. Los autores también agradecen al Parque Nacional Timanfaya y al Geoparque de Lanzarote su cooperación imprescindible para poder llevar a cabo la toma de muestras en los tubos de lava. Se agradece al espeleólogo Gustavo Santana, por su inestimable colaboración durante la campaña de exploración en la Cueva de las Breñas.

## Referencias

- Blyth, A.J., Baker, A., Thomas, L.E., Van Calsteren, P. (2011). A 2000-year lipid biomarker record preserved in a stalagmite from north-west Scotland. *Journal of Quaternary Science*, 26(3), 326–334.
- Blyth, A. J., Hartland, A., Baker, A. (2016). Organic proxies in speleothems—New developments, advantages and limitations. *Quaternary Science Reviews*, 149, 1–17.
- Bull, I., Nott, C.J., van Bergen, P.F., Poulton, P.R., Evershed, R.P. (2000). Organic geochemical studies of soils from the Rothamsted classical experiments—VI. The occurrence and source of organic acids in an experimental grassland soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 1367–1376.
- Eglinton, T.I., Eglinton, G. (2008). Molecular proxies for paleoclimatology. *Earth and Planetary Science Letters*, 275(1), 1–16.
- Fry, B. (2006). Stable isotope ecology. *Springer*, New York, NY
- Jiménez-Morillo, N.T., Spangenberg, J.E., Miller, A.Z., Jordán, A., et al. (2017). Wildfire effects on lipid composition and hydrophobicity of bulk soil and soil size fractions under *Quercus suber* cover (SW-Spain). *Environmental Research*, 159, 394-405.
- McDermott, F., Schwarcz, H., Rowe, P. J. (2006). Isotopes in speleothems. In: *Isotopes in palaeoenvironmental research*, pp. 185-225, Springer.
- Miller, A.Z., De la Rosa, J.M., Jiménez-Morillo, N.T., Pereira, M.F.C., González-Pérez, J.A., Calaforra, J.M., Saiz-Jiménez, C. (2016). Analytical pyrolysis and stable isotope analyses reveal past environmental changes in coralloid speleothems from Easter Island (Chile). *Journal of Chromatography A*, 1461, 144-152.
- Miller, A.Z., Jiménez-Morillo, N.T., Coutinho, M.L., Gazquez, F., Palma, V., et al. (2022). Organic geochemistry and mineralogy suggest anthropogenic impact in speleothem chemistry from volcanic show caves of the Galapagos. *iScience*, 25, 104556.
- Schouten, S., Hugué, C., Hopmans, E. C., Kienhuis, M. V. M., Sinninghe Damsté, J. S. (2007). Analytical Methodology for TEX86 Paleothermometry by High-Performance Liquid Chromatography/Atmospheric Pressure Chemical Ionization-Mass Spectrometry. *Analytical Chemistry*, 79(7), 2940-2944. <http://doi.org/10.1021/ac062339v>.
- Schwarcz, H. (2013). Carbonate Stable Isotopes - Speleothems. In S. A. Elias C. J. Mock (Eds.), *Encyclopedia of Quaternary Science (Second Edition)* (pp. 294-303). Amsterdam: Elsevier.
- Szpak, P., 2014. Complexities of nitrogen isotope biogeochemistry in plant–soil systems: implications for the study of ancient agricultural and animal management practices. *Frontiers in Plant Science*, 5, 1–19.
- Xie, S., Yi, Y., Huang, J., Hu, C., Cai, Y., Collins, M., Baker, A. (2003). Lipid distribution in a subtropical southern China stalagmite as a record of soil ecosystem response to paleoclimate change. *Quaternary Research*, 60(3), 340–347.
- Xie, S., Huang, J., Wang, H., Yi, Y., Hu, C., Cai, Y., Cheng, H. (2005). Distributions of fatty acids in a stalagmite related to paleoclimate change at Qingjiang in Hubei, southern China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 48(9), 1463–1469.





# **Turismo Villanúa: evolución, resiliencia e innovación en tiempos de pandemia. Experiencia en la cueva de las Güixas de Villanúa (Huesca)**

Yolanda PALOMO ARRABAL

Directora de la Cueva de las Güixas, Turismo Villanúa, S.L.U. Camino de la Fuente, 1. 22870 Villanúa (Huesca).  
cuevas@villanua.net

---

## **Resumen**

La cueva de las Güixas, se encuentra en Villanúa, población del pirineo Aragonés, perteneciente a la comarca de la Jacetania, enclavado en el Valle del Aragón, a 953 metros de altitud, a los pies del macizo de Collarada. En la actualidad la localidad cuenta con 450 habitantes censados, aunque en temporada alta acoge unos 6.000 visitantes, por lo que la cueva de las Güixas es un recurso muy importante para sus habitantes. Debido a la situación demográfica, desde los inicios de su gestión el personal fijo de la cueva se ha visto afectado, por cierres temporales o reducciones de jornada laboral. Estas debilidades han forzado a la dirección de la cueva a desarrollar una estrategia de supervivencia, para las épocas de poca afluencia de visitantes, con la puesta en marcha de actividades creativas, e innovadoras, poniendo en valor el factor humano y su identidad cultural, con la investigación sociocultural, para la recuperación de la tradición oral. Con la situación extraordinaria de PANDEMIA por la COVID-19, la dirección de la cueva de las Güixas, apostó por continuar con su modelo de gestión sostenible, adaptándolo a los continuos cambios, aprovechando todas y cada una de las oportunidades, sin perder la sonrisa, tan necesaria en tiempos de crisis. Hoy en día, la cueva de las Güixas, ha vuelto a la "nueva" normalidad, con cifras similares a las del 2019. Fortalecidos y convencidos de que debemos tener capacidad de adaptación organizacional y resiliencia, para hacer frente a estas y otras posibles crisis. Tras la PANDEMIA hay una necesidad de conectar con la tierra y nuestra responsabilidad, como gerentes y directores turísticos es aprovechar esta oportunidad y cubrir las necesidades de nuestros visitantes, desarrollando estrategias de promoción turística, sostenibles, creativas, inclusivas e innovadoras, que promuevan a su vez, el respeto por el medioambiente, para garantizar el futuro a las generaciones venideras.

**Palabras clave:** cuevas, pandemia, resiliencia, turismo, Villanúa.

## ***Villanúa Tourism: evolution, resilience and innovation in times of PANDEMIA. Experiences in the cave of Las Güixas of Villanúa (Huesca)***

### **Abstract**

*The cave of the Güixas, is located in Villanúa, a town in the Aragonese Pyrenees, belonging to the region of Jacetania, nestled in the Aragon Valley at 953 meters altitude, at the foot of the Collarada massif. The town currently has 450 registered inhabitants, although during the high season it receives some 6,000 visitors, making the Güixas cave a very important resource for its inhabitants. Due to the demographic situation, since the beginning of its management, the permanent staff of the cave has been affected by temporary closures or reductions in working hours. These weaknesses have forced the cave's management to develop a survival strategy for times of low visitor numbers, with the implementation of creative and innovative activities, placing value on the human factor and its cultural identity, with socio-cultural research for the recovery of the oral tradition. With the extraordinary situation of PANDEMIA by COVID-19, the management of the Güixas Cave decided to continue with its sustainable management model, adapting it to the continuous changes, taking advantage of each and every one of the opportunities, without losing the smile, so necessary in times of crisis. Today, the Güixas cave has returned to the "new" normal, with figures similar to those of 2019. Strengthened and convinced that we must have organizational adaptability and resilience to face these and other possible crises. Behind the PANDEMIA there is a need to connect with the land and our responsibility, as tourism managers and directors is to seize this opportunity and meet the needs of our visitors, developing tourism promotion strategies, sustainable, creative, inclusive and innovative, which promote in turn, respect for the environment, to ensure the future for generations to come. Introducción e historia de la cueva de las Güixas*

### **Introducción**

La cueva de las Güixas, se encuentra en Villanúa, población del pirineo Aragonés, perteneciente a la comarca de la Jacetania, enclavado en el Valle del Aragón a 953 metros de altitud, a los pies del macizo de Collarada. Para acceder a la cavidad, se debe recorrer un tramo del Camino de Santiago y antiguo Summus Portus romano (Somport), durante unos 7 minutos. La cueva ha estado ocupada durante distintos periodos, desde el eneolítico hasta nuestros días como demuestran los restos hallados en el interior que datan del 3000 a. C. hasta SIV d. C. También existen manuscritos con los procesos, estatutos y testamentos junto a las leyendas que cuentan que las brujas utilizaban la cueva como lugar de reunión y celebración de rituales en los siglos XV al XVII (Bru, 2006; Dueso 2015; Garcés 2015) y fue refugio para los habitantes de la villa en la etapa Medieval y tardo romana como demuestra el hallazgo de una moneda de oro acuñada en el siglo IV d. C. Finalmente, la cueva sirvió de refugio en la guerra civil y más tarde fue prisión de los conocidos batallones de castigo, acogiendo a los presos de guerra. Además de su interés histórico y geológico, la cueva de las Güixas tiene mucha importancia ecológica por los



*Figura 1. Foto de la cueva de las Gúixas, durante la gestión del SIPA en 1929*

quirópteros que viven en el interior llegando a contabilizar hasta 9 especies distintas, lo cual ha motivado la inclusión de este emplazamiento en la Red Natura 2000 europea como Lugar de Interés Comunitario (LIC).

La inauguración de su visita turística fue gracias al SIPA (Sindicato de Iniciativa y Propaganda de Aragón) en el año 1929, cerrando esta en 1936 por la guerra civil. Entre 1945 y 1986 se volvió a abrir, pero de manera intermitente por la precariedad de las instalaciones. En 1996 tras la instalación de un sistema eléctrico se abre una nueva fase de explotación y desarrollo turístico de la cueva a cargo de la empresa Sargantana hasta el 2011. En 2009 se inaugura el centro de interpretación subterránea, dentro del proyecto europeo "impulsados" cuyo objetivo principal es crear una red transfronteriza que unirá; museos, centros de interpretación y oficinas de turismo del Valle del Aspe y la Jacetania al mismo tiempo que ofrece una visita interactiva para los visitantes que no pueden acceder a la cueva. Un año después, se adecúa un espacio en el edificio del mismo centro de interpretación como Oficina de Turismo. En noviembre de 2011, el ayuntamiento de Villanúa asume la gestión de la cueva a través de la empresa municipal Turismo Villanúa. (figura 1).

## **Evolución en la gestión de la cueva de las Gúixas**

Villanúa es una pequeña población que cuenta con 450 habitantes censados, aunque en temporada alta acoge unos 6.000 visitantes, por lo que la cueva de las Gúixas es un recurso socioeconómico muy importante para sus habitantes. Desde los inicios de la gestión con Turismo Villanúa, después de realizar un DAFO, estudio de las Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades para ajustar la estrategia comercial de marketing

a seguir, observamos que hay una debilidad importante ya que debido a la situación demográfica, por encontrarse en un entorno rural, el turismo de la cueva, es un producto de temporada con un elevado número de visitantes en verano, Semana Santa, Navidad y puentes festivos, pero sin apenas visitantes en el resto del año. Ni siquiera en la temporada de esquí aumenta el número, ya que éstos vienen preferentemente a esquiar y es difícil atraerlos al finalizar la actividad, por lo que desde la dirección de la cueva se apuesta por la labor didáctica con la puesta en marcha de actividades relacionadas con la geología, biología e historia, pensadas para los centros escolares y educativos para estas épocas de pocos visitantes, semanas blancas y final de curso. También en la labor cultural, haciendo hincapié en las brujas de Villanúa, para las agencias de viajes y familias ya que es un producto emergente que despierta mucho interés, y en Villanúa es uno de los enclaves con más casos de mujeres ajusticiadas por brujas (un total de 15 casos documentados) y existe un nexo de unión entre estas mujeres y la cueva.

El equipo humano de la cueva se ha visto afectado laboralmente con reducciones de jornada debido a la poca afluencia de público o por las propias características de la misma. Al tratarse de una cueva activa, ha sufrido cierres temporales por las inundaciones y por la poca afluencia de visitantes en temporada baja. Estas debilidades han forzado a la cueva a desarrollar una estrategia de supervivencia, con la puesta en marcha de actividades sostenibles, viables e innovadoras, para impulsar el desarrollo turístico de la cueva en las épocas de poca afluencia de visitantes, con la puesta en marcha de actividades creativas, innovadoras y sostenibles, recuperando la tradición oral y poniendo en valor el factor humano y su identidad cultural, (figuras 2 y 3).

Este tipo de gestión tan didáctica requiere que el equipo humano esté altamente cualificado para alcanzar los objetivos marcados por la empresa, por lo que estamos en formación continua, tanto la dirección como el personal laboral fijo discontinuo. Para



*Figura 2. Una visita teatralizada en el interior de la cueva de las Güixas, 2017.*

facilitar este aprendizaje se imparten cursos de interpretación de la cueva de las Güixas desde la propia empresa, periódicamente, y se facilita en la medida de lo posible, la participación en jornadas técnicas, geológicas, cursos externos, participación en Ferias y Congresos, etc. En la selección del personal se valora tanto los conocimientos y formación adquiridos de geología, biología, etc. propios del desempeño laboral de las funciones, como las habilidades como guía turístico, comunicativas y de interpretación, pero sobre todo la actitud de los aspirantes a guías, ya que pasan a ser actores-anfitriones de Villanúa y su historia.

## **Evolución de las actividades de la cueva de las Güixas para su impulso turístico**

Son muchas las actividades que se organizan desde a lo largo del año para el impulso y desarrollo de la cueva; actividades de educación medioambiental, con el conocimiento de los quirópteros de la cueva, senderos interpretativos y puesta en valor del patrimonio cultural y natural, semana de la prehistoria, visita a los Dólmenes o el casco histórico de la localidad. Pero hay que destacar las que se realizan dentro del programa de la Semana de las Güixas, y "Halloween", ya que ha superado con creces la expectativa de



Figura 3. Cartel Jacetania mágica 2019.



*Figura 4. Imagen de la Oficina de Turismo – CIN con la adaptación a la situación de pandemia, en el año 2020.*

la dirección, con un aumento de visitantes 5 veces mayor en tan solo unos días, que en todo el mes en años anteriores. A pesar de su juventud, hoy en día, estas actividades se han posicionado como referente turístico sostenible e innovador a nivel nacional, siendo las más demandadas por los visitantes, que año tras año repiten, por lo que es muy importante la evolución e innovación de las mismas sin perder la autenticidad. Creada en 2015, la Semana de las Güixas, se organiza a finales de agosto o principios de septiembre en donde se pretende, por un lado, recuperar la memoria histórica y la tradición oral de las brujas más importantes de Villanúa, a través de actividades de exterior y visitas temáticas y teatralizadas en la cueva de las Güixas y, por otro lado, alargar la temporada estival, ya que sufríamos un descenso enorme de visitantes. En estas jornadas, se comienza con una charla por parte de algún escritor, colaborador o experto en etnología del Alto Aragón, para darle sentido a las actividades, le siguen visitas teatralizadas infantiles y para adultos, cuenta-cuentos, pasacalles y se finaliza con un espectáculo musical, a poder ser de la zona, para que el producto sea lo más viable posible, buscando siempre nuestra identidad cultural y colaborando en el desarrollo sociocultural del Valle.

También queremos destacar la evolución e innovación en las visitas de autor en la cueva de la Güixas que realiza nuestro colaborador Nacho Navarro, redactor del programa televisivo Cuarto Milenio, que presenta Iker Jiménez y que aborda temas relacionados con el misterio. Este tipo de visitas son más exclusivas, pensadas para un público adulto, interesado por el mundo de lo desconocido, en donde el redactor del programa saca a la luz el lado más misterioso y oculto de la cueva, acompañado por un guía con experiencia para darle valor añadido a la visita con las explicaciones técnicas de la cavidad. La acción se inicia gracias al interés del propio redactor por la historia de las brujas de Villanúa en 2016, en donde salimos en el programa televisivo Cuarto Milenio y un año más tarde, a través de la agencia de viajes Gozarte de Zaragoza, expertos en visitas temáticas, surge una visita de autor con Nacho. Esta visita tuvo una gran acogida, por lo que decidimos incluirla en los años siguientes, innovando y evolucionando ya que al igual que los visitantes atraídos por la semana de las Güixas, éstos suelen repetir la experiencia



*Figura 5. Imagen de la sala multiusos del CIN con la adaptación a la situación de pandemia, en el año 2020.*

vivida año tras año. En esta acción, aunque también es viable, sostenible e innovadora, se pretende sobre todo cubrir la expectativa de otro tipo de visitante o del visitante habitual de la cueva, pero desde otro punto de vista. Es por este motivo que la actividad evoluciona de ser una visita de autor en la cueva de las Güixas en 2017, a visita de autor en la cueva y Dolmen D'As Güixas en 2018, a su culminación con Jacetania Mágica en 2019. La idea surge aprovechando que acudían visitantes de todos los puntos de España e incluso del extranjero, creamos un producto de cooperación turística junto a la Estación de Canfranc y la Ciudadela de Jaca, con la visita a la cueva de las Güixas y el Dolmen de Villanúa, para terminar al atardecer en la ermita de Orante. Todos los enclaves turísticos, al igual que la cueva de las Güixas, tienen un punto misterioso y oculto que desvela a la perfección el redactor y el visitante aprovecha su estancia en el Valle para visitarlos todos en un solo día. Al realizar más de una visita, se abaratan costes y el producto tiene un valor añadido. Se convierte en un producto "VIP", con el acompañamiento de la dirección de la cueva que toma el papel de anfitrión, para coordinar, supervisar y tomar buena nota de todas las posibles errores y sugerencias detectadas en la nueva actividad. En este tipo de actividades, además, se crean unas cooperaciones y sinergias muy interesantes, entre todos los enclaves turísticos implicados.

Gracias a todo este trabajo de investigación, innovación y evolución de las actividades propuestas, junto al equipo humano de la cueva y la difusión a través de los medios de comunicación y redes sociales, la cueva de las Güixas sufre una expansión extraordinaria, duplicando el número de visitantes en tan solo cinco años, esto supone una media de unos 3.000 visitantes más anuales.

En el año 2020 iniciamos la actividad con mucha ilusión y con nuevas propuestas; en enero recogemos la medalla a la excelencia turística que otorga la Asociación de Cuevas Turísticas de España (ACTE), por la innovación en este tipo de propuestas, premio compartido con la cueva de Oñati. También participamos en la Feria Internacional del Turismo (FITUR) que se celebra anualmente en Madrid, en el Stand de Aragón, junto a la

Ciudadela de Jaca y Museo Diocesano, gracias a la propuesta de cooperación propuesta por la dirección de la cueva, a través de la Asociación Turística del Valle del Aragón (ATVA); destacar una actividad nueva e innovadora en Navidad con nuestro colaborador Mariano Lavida, uno de los profesionales de mayor prestigio y trayectoria dentro del arte de la magia a nivel nacional. En esta actividad, el mago iniciará la visita. Contando que es un descendiente directo de las chamanas, brujas, hechiceras y magas de la cueva de las Güixas; un brujo del siglo XXI. No se trata de realizar trucos de magia en la cueva, sino de hacer en la cueva una visita mágica, innovadora, llena de misterio y humor que finalizará con unos juegos de cartomancia en la chimenea de la cueva. Estas visitas estarán acompañadas por su ayudante (guía experta y aspirante a maga), para ayudar, respaldar y aconsejar en todo momento al mago, con el propósito de darle a la visita y a la cueva de las Güixas un valor añadido, como siempre con las explicaciones técnicas de una guía experta, al mismo tiempo que analizamos los posibles errores que podamos encontrar para darles solución inmediata sobre la marcha. En febrero del mismo año, asistimos a las jornadas técnicas de ACTE, en Mendukilo, para compartir experiencias e intercambiar ideas y dar apoyo a nuestras compañeras del norte de la península. Estamos en un momento de crecimiento y expansión maravilloso y de repente, a mediados de marzo tenemos que cerrar por la situación de pandemia por la COVID-19.

Es una situación extraordinaria que rompe con todos los esquemas, pero lejos de quedarnos parados, la dirección de la cueva de las Güixas apuesta por continuar con su modelo de gestión sostenible, adaptándolo a los continuos cambios, aprovechando todas y cada una de las oportunidades, sin perder la sonrisa, tan necesaria en tiempos de crisis.

Lo primero, esperar y recopilar toda la información necesaria sobre la nueva situación de crisis sanitaria y elaborar un plan de contingencia con unos protocolos de actuación de la



Figura 6. Fotografía de Álvaro Calvo, seleccionada por la Diputación de Huesca para una exposición itinerante por los pueblos del Pirineo dentro del festival "En el Camino de Santiago".



cueva de las Güixas, oficina de Turismo y Centro de Interpretación, flexibles a los numerosos cambios y que nos garantice todas las medidas de seguridad y sanitarias; que incluya una información clara, precisa al mismo tiempo que ajustamos la visita turística a la nueva situación, incluyendo en el inicio de la misma, las instrucciones a seguir y comunicando las novedades de manera firme y profesional, con el fin de transmitir seguridad en todo momento. Así que adaptamos la oficina de Turismo-CIN, con todas las medidas de seguridad y sanitarias, eliminamos la visita al centro de interpretación, ya que nos resultaba difícil garantizar las medidas sanitarias; la sala multiusos (figura 5) hizo su función, con el aforo correspondiente, para cursos y charlas y anulamos todas las actividades que supongan un reclamo de visitantes, como la Semana de las Güixas, prehistoria, etc.

Y lo siguiente elaborar un nuevo DAFO, pero como no hay tiempo que perder y dado la situación extrema no perdemos el tiempo en las amenazas, debilidades ni fortalezas,



Figura 7. Imágenes de la entrega de los premios Edelweiss en FITUR 2021

todo son debilidades e incertidumbre, por lo que nos vamos a quedar tan solo con las oportunidades y vamos a aprovecharlas al máximo, no hay tiempo para nada más y lo vamos a hacer con la mejor de nuestras sonrisas, con amor, con actitud y alegría; y con profesionalidad y seguridad, para transmitirlo a nuestros visitantes. Hay que estar a la altura de las circunstancias, si nos visitan es porque confían en nosotros, no podemos defraudarles.

Innovación y resiliencia para tomar la crisis como un reto a superar y adaptarnos lo antes posible, haciendo uso de la creatividad que nos caracteriza y ahondar en los aspectos positivos, para no caer en el desánimo. Lo bueno es que no empezamos de cero, sino que empezamos de nuevo, ya tenemos una trayectoria tan solo es hacer una criba y quedarnos con las actividades que ajustan a la nueva realidad, pero lo primero de todo es tomar conciencia real de la situación y adaptarnos lo antes posible nosotros y nuestro

espacio de trabajo, en nuestro caso no solo tenemos la cueva, sino que también hay que adaptar la oficina de Turismo y el Centro de Interpretación de la cueva de las Güixas.

Una vez adaptado los espacios y el equipo humano a la nueva situación, solo nos queda aprovechar todas y cada una de las oportunidades que nos surjan para continuar con nuestra línea de trabajo. En verano del 2020 no realizamos actividades que supongan un reclamo turístico, pero creamos una actividad novedosa, con nuestro colaborador habitual Nacho Navarro. Viajes al Inframundo, en donde se propone una visita a oscuras en el interior de la cueva, dando rienda suelta a los sentidos para acercarnos a nuestros principios, cuando el ser humano ocupaba las cavernas, tan necesario en tiempos de pandemia, conectar de nuevo con la Tierra. También aprovechamos la oportunidad que nos brinda Álvaro Calvo, fotógrafo de Huesca que se pone en contacto con la dirección de la cueva, ya que quiere plasmar la realidad de la pandemia con un reportaje fotográfico en el que, entre otras imágenes, ha pensado en fotografiar la realidad de la cueva de las Güixas en Halloween, para mostrar la recuperación de la tradición oral, con una actividad en el cementerio viejo de Villanúa. La noche de las almetas y una visita teatralizada a la cueva con Narbona D'Arcal de Cénarbe, primera bruja del Valle, juzgada en Zaragoza por la Inquisición en 1498. Este reportaje ha conseguido numerosos reconocimientos y ha hecho que Villanúa y sus brujas vuelen hasta Estados Unidos, ya que la actividad salió en una revista de New York y más tarde en Francia. De lo local a lo global. Este año 2 de las fotografías, han sido seleccionadas por la Diputación de Huesca para una exposición itinerante por los pueblos del Pirineo dentro del festival "En el Camino de Santiago" (figura 6).

Cerramos 2020 con un descenso de unos 20.000 visitantes, como estaba previsto regresando a cifras del 2012 y aun así arrancamos 2021 con mucha ilusión a pesar de los numerosos cambios y las noticias aterradoras. Dado la poca afluencia de visitantes, aprovechamos para enviar documentación de las actividades de promoción y marketing de la cueva a los concursos y premios que pensamos podría encajar y así fue como quedamos finalistas en los premios Edelweiss 2020, que organizó por primera vez en el Cluster de Turismo Sostenible de Aragón. En esta ocasión la organización de los premios nos pide una colaboración teatralizada en la entrega de los mismos en FITUR de 2021, dada la situación de pandemia podíamos poner un toque de humor a través de las dos brujas más importantes del Valle del Aragón, Guirandana de Lay de Villanúa juzgada por la justicia ordinaria en 1461 y Narbona D'Arcal de Cénarbe, juzgada por la Inquisición en 1498. Una oportunidad fantástica para que nuestras brujas vuelen a la capital y puedan contar su historia. Así lo hicimos y ganamos el premio en la categoría de atractivos turísticos, lo cual fue un reconocimiento enorme a nuestro trabajo (figura 7).

En la recogida del premio, como no podía ser de otra manera, aprovechamos la ocasión para comunicar que: "estamos en el año internacional del karst y si algo nos ha enseñado la pandemia es que tenemos que cuidar la tierra y nuestro modelo de gestión hacia un turismo sostenible, viable e innovador, respetuoso con el medio ambiente", aprovechando todos los recursos que tenemos a nuestro alcance.

Queremos aprovechar para agradecer todo el apoyo obtenido por nuestros socios y amigos de ACTE, que nos visitaron y apoyaron en el evento. Gracias a cuevas de Mendukilo



*Figura 8. Imagen de una visita teatralizada en la cueva de Campanet: Diálogos en la oscuridad, con Juan José Durán y Yolanda Palomo, en el año 2022.*

y Pulpí, que se acercaron a darnos todo su cariño, a comunicación de ACTE que cubrió la noticia y a la directiva de ACTE por todo su apoyo como siempre en especial a su vicepresidente Juan José Durán, que nos acogió en el IGME, para los ensayos previos al evento y nos aconsejó como siempre para estar a la altura de un evento tan importante. (figura 8).

En verano no hay Semana de Güixas, pero si evolucionamos la visita de autor, en esta ocasión aprovechando el 275 aniversario de Goya, con la creación de una visita temática en el interior de la cueva, mostrando las pinturas negras del pintor zaragozano con obras como Aquelarre o Vuelo de brujas. Las pinturas se proyectan en las paredes de la cueva, al mismo tiempo que el redactor nos deleita con las explicaciones de estas. Entre la luz tenue y las imágenes gigantes sobre las paredes irregulares de la cavidad, todo toma un ambiente mágico y cautivador que dejó totalmente hechizados a los visitantes.

En septiembre de 2021 participamos en las jornadas de Mallorca organizadas por ACTE y la cueva de Campanet como anfitrión en las jornadas de cuevas vivas 2021, aprovechando el año internacional del karst, "las cuevas turísticas durante la pandemia de la COVID-19". "Un antes y un después". La dirección de cueva de las Güixas tuvo el honor de participar en la mesa redonda, sobre buenas prácticas de ciencia y gestión frente a la pandemia en las cuevas turísticas españolas, que coordinó Juanjo Durán. También ofreció una conferencia sobre el desarrollo de nuevas actividades para la visita turística durante la pandemia, con el propósito de compartir las experiencias vividas y su directora, Yolanda Palomo, tuvo el gran honor de realizar una teatralización junto a Juanjo Durán: "Diálogos en la

oscuridad, una visita mágico -científica" que pretendía aunar el mundo de la ciencia y de lo mágico, al mismo tiempo que se rescataba la memoria de personajes muy importantes en el mundo subterráneo un tanto desconocidos; esta actividad fue un proyecto piloto, sin apenas ensayo, pero con mucha actitud. Se intentó mostrar cómo realizar una actividad sostenible e innovadora, en este caso la actividad no tiene precio ya que fue una pequeña muestra de que el conocimiento a través de la diversión es posible y como dijo Einstein "en tiempos de crisis, tan solo la creatividad supera al conocimiento".

## Conclusiones

El objetivo principal de la cueva de las Güixas durante la crisis sanitaria por la COVID-19, ha sido adaptar las instalaciones y al equipo humano para afrontar la nueva situación y recibir al visitante post-COVID de manera segura y profesional. Para ello hemos elaborado un plan de contingencia con unos protocolos de actuación, para evitar en lo posible el riesgo de contagio, pero sin dejar de trabajar hacia un turismo sostenible.

Hoy en día, la cueva de las Güixas ha vuelto a la "nueva" normalidad, con cifras similares e incluso superiores a las de 2019. Fortalecidos y convencidos de que debemos tener capacidad de adaptación organizacional y resiliencia, para hacer frente a estas y otras posibles crisis. Tras la pandemia hay una necesidad de conectar con la Tierra y nuestra responsabilidad, como gerentes y directores turísticos es anticiparnos estas necesidades y aprovechar todas y cada una de las oportunidades desarrollando estrategias de promoción turística, sostenibles, creativas, inclusivas e innovadoras, que promuevan a su vez, el respeto por el medioambiente, para garantizar el futuro a las generaciones venideras. De lo local a lo global, poniendo en valor el factor humano y su identidad cultural.

## Referencias

- Bru, L. (2006). *Brujas en el Pirineo Fantástico*, ISBN 10: 8495846497, 126 p.
- Dueso, J. (2015). *Leyendas de brujas en el Pirineo fantástico*. Create Space Independent Publishing Platform, ISBN-10: 1508693560, 182 p.
- Garcés, C. (2015). *La Mala Semilla. Nuevos casos de brujas*. Tropo Editores. ISBN: 978-84-96911-70-3, 450 p.

# **Reserva Natural Cueva de Estalactitas de Israel. Dirección y Gestión**

Gabriela RESHEF SCHWARZ

Directora Reserva Natural Cueva de Estalactitas, Am Ve Olamo 3 (Jerusalem, Israel)  
gabrielar@npa.org.il

---

## **Resumen**

La Reserva Natural Cueva de Estalactitas de Israel (Cueva Soreq) situada en las Montañas de Judea, fue descubierta de manera fortuita por una explosión en la cantera Har Tuv en el año 1968. La Cueva Soreq es la única reserva natural de Israel dedicada al turismo subterráneo. Recibe más de 200.000 visitantes al año. En los últimos años la iluminación de la cueva ha sido completamente renovada, para minimizar el efecto causado por el mal verde. El tratamiento de limpieza de espeleotemas afectados por el mal verde o *lampenflora* fue sustituido por peróxido de hidrógeno diluido en lugar de hipoclorito, comprobando que el primero es menos perjudicial para los espeleotemas. Se realiza un monitoreo permanente de las condiciones climáticas de la cavidad, incluyendo humedad, CO<sub>2</sub>, y temperatura; controlando cada uno de los parámetros obtenidos. El actual aparcamiento para visitantes se encuentra sobre el techo de la cueva. Dada la preocupación de que éste pudiera afectar la filtración de agua, se decidió promover el traslado de los aparcamientos. La cueva está situada en medio de dos canteras abandonadas y en las cercanías de otra aún activa. El aparcamiento, y el edificio de entrada a la cueva serán trasladados a la Cantera Sur y, una vez finalizados los trabajos, el antiguo aparcamiento será removido permitiendo la recuperación natural del espacio. La restauración ecológica de la cantera norte está en progreso. La restauración se concentra en la recuperación del ecosistema natural con vegetación autóctona, traída de otras reservas naturales de la región. Se incluirá también un jardín geológico, piscinas naturales de invierno y un puente colgante que unirá las dos canteras recuperadas con la entrada a la cueva. Para proteger a la cueva durante la construcción del puente colgante, se colocaron sensores que midieron las vibraciones causadas por excavadoras y explosiones de canteras. Estos sensores proporcionaron datos útiles para la planificación de los trabajos de construcción. La Autoridad de Parques Nacionales de Israel es la encargada de la dirección y preservación de la cueva y depende directamente del Ministerio del Medio Ambiente de Israel.

**Palabras clave:** iluminación, limpieza, lampenflora, restauración de canteras, sensores.

## ***Stalactite Cave Nature Reserve, Israel. Direction and Management***

### ***Abstract***

*The Stalactite Cave Nature Reserve of Israel (Sorek Cave) located in the Judean Mountains, was discovered by chance during an explosion of the Har Tuv Quarry in 1968. Soreq cave*

*is the only nature reserve in Israel that dedicated to the underground tourism. It receives more than 200,000 visitors a year. In recent years, the cave lights have been completely renewed, in order to minimize lampenflora. The cleaning treatment of speleothems affected by green algae (or lampenflora) was replace by diluted hydrogen peroxide instead of hypochlorite, proving that the former is less harmful to the speleothems. Permanent monitoring of the climatic conditions of the cavity is carried out, including humidity co2 and temperature, and the control of each of the parameters obtained. The current parking lot for visitors is located on the roof of the cave, hence might affect the water seepage. Therefore, we promote the change of the parking place. The cave is located in the center of two abandoned quarries and in the vicinity of another still active. The parking lot and the entrance building to the caves will be move to the southern quarry and once the works are finished, the old parking will be remove allowing the natural recovery of the space. Ecological restoration of the northern quarry is in progress. This restoration focuses on the recovery of the natural ecosystem with native vegetation brought from other nature areas in the region. It will also include a geological garden, natural winter pools and a suspension bridge that will link the two restored quarries with the entrance to the cave. In order to protect the cave during the building of the bridge, we placed sensors measuring the shocks caused by bulldozers and quarry explosions. These sensors provided useful data for the planning of the construction work. The Israel National Parks Authority is in charge of the management and preservation of the cave and reports directly to the Israeli Ministry of the Environment.*

**Keywords:** *cleaning, lampenflora, lighting, quarry restoration, sensors.*

## **Introducción**

La Reserva Natural Cueva de Estalactitas de Israel (Cueva Soreq) (figura 1) es parte de un complejo de cuevas alineadas, ubicadas en el borde occidental de las montañas de Judea. A diferencia de otras cavidades, la Cueva Soreq (figura 2) no tiene una abertura natural, sino fortuita, por una explosión de la Cantera Har Tuv en el año 1968 (Even, 1983).

La Reserva Natural Cueva de Estalactitas ocupa una superficie de 25,2 hectáreas. Que fueron declaradas reserva natural entre los años 1975 y 1995.

La cueva está situada a unos 400 metros sobre el nivel del mar (figura 1).y, como otras cuevas que se encuentran en la zona, son el resultado de los procesos de disolución y precipitación de las rocas calizas y dolomíticas que conforman las montañas de Judea. (Bar-Matthews *et al.*, 1988)

El clima en el área es mediterráneo, con veranos cálidos y secos e inviernos húmedos y frescos, con un promedio de lluvias de 525 mm/año.

El área total de la Cueva tiene aproximadamente una superficie total de unos 4800 m<sup>2</sup> y un volumen de unos 25000 m<sup>3</sup>.



Figura 1. Situación geográfica de la Reserva Natural Cueva de Estalactitas de Israel.



Figura 2. Cueva Soreq vista a la galería principal (APN).

## Canteras Har Tub

La cueva se encuentra en medio de dos canteras (figura 8 y 9) que fueron abandonadas para el trabajo minero desde el descubrimiento en el año 1968. Fueron los trabajadores de la Cantera Har Tuv quienes durante una explosión de rutina encontraron la cavidad e informaron a las autoridades de su existencia.

La explotación de cantera, que estuvo activa años antes del descubrimiento de la cavidad, provocó que se desviara el sentido del flujo de agua al interior de la cavidad. Actualmente, se puede apreciar gran actividad de goteo, especialmente en invierno (figura 10).

La cueva se enfrenta a explosiones permanentes de las canteras vecinas activas desde que los trabajos de minería comenzaron (figura 11). Hasta el momento y según los resultados de las pruebas pertinentes (figura 12) no se ha podido comprobar un efecto dañino de las vibraciones producidas que las explosiones pudieran o pudieron tener en el pasado tener sobre la cavidad (Palchan y Ben-David (2021).

## Turismo subterráneo y su influencia

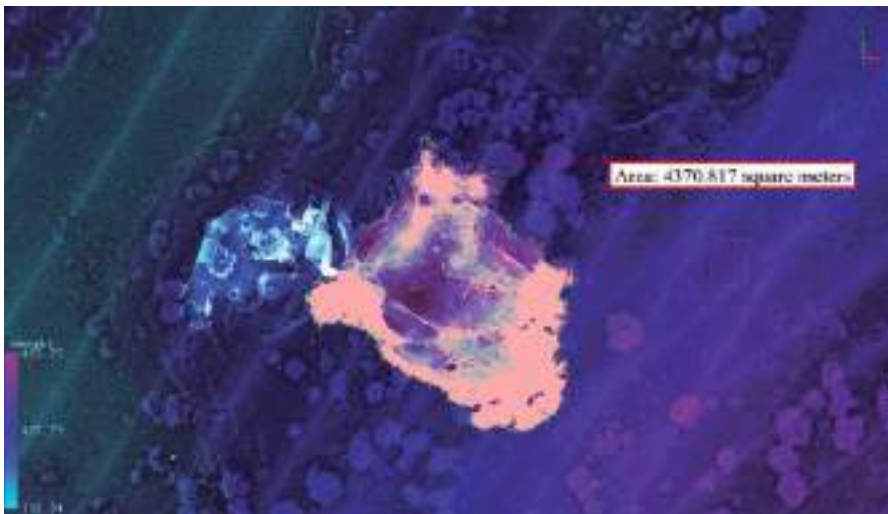


Figura 3. Vista aérea por escaneo laser (Lidar) Área total de la cueva (Enso).

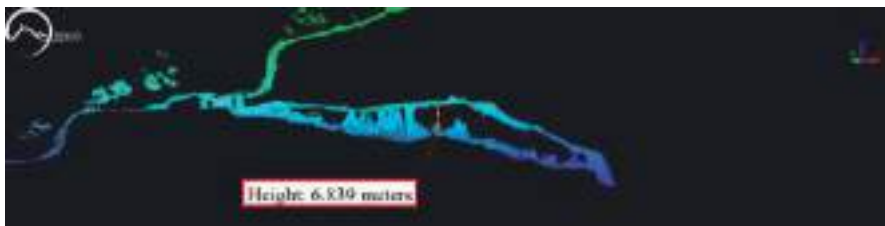
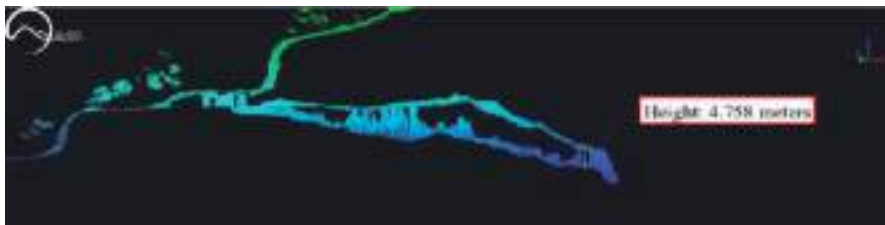


Figura 4. Punto más bajo entre el piso y techo de la cavidad (Lidar-Enso).

Figura 5. Punto más alto entre el piso y techo (Lidar-Enso).





Figura 6. Corte donde se aprecia la capa de roca entre la cueva y la superficie externa. (Enso)



Figura 8 (izquierda). Cantera abandonada Sur (E.Gutman).

Figura 9 (derecha). Cantera Abandonada Norte (E.Gutman).



Figura 10. Actividad de goteo. (fotos: I.Abecassis y I.Tzimring).

La cueva fue abierta al público en el año 1977 (figura 13). Durante los tres primeros años fue visitada por más de 350.000 visitantes al año.

No cabe duda de que la entrada de visitantes incide en los procesos físico-químicos que allí tienen lugar. Con el objetivo de mantener las condiciones climáticas lo más similares posible a las originales, la atmósfera de la cueva se controla por medio de un sistema de vigilancia constante.



*Figura 11. Vista de la actividad de cantera en los alrededores de la cueva (foto: APN).*



*Figura 12. Geólogos colocando sismógrafos en diferentes puntos de la cueva.*



*Figura 13. Primera visita organizada año 1977 (foto: Sa Levi).*

El sistema consta de siete estaciones de medición repartidas por toda la cavidad. En cada estación de medición se instalaron tres sensores: CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad. Las estaciones transfieren los datos a una computadora cada 60 minutos. Dichos datos se almacenan en archivos diarios y son analizados regularmente por el equipo científico de la cueva.

Los puntos máximos de concentración de CO<sub>2</sub> están relacionados con el período de vacaciones, días festivos, y fines de semana, cuando la cueva recibe una gran cantidad de visitantes.

En el año 2019 se recibieron 220.000 visitantes, entre ellos turistas extranjeros, familias y estudiantes de todas las edades. En el año 2020 y debido a la pandemia, se implementó un sistema de reserva de visitas también para el visitante no perteneciente a grupos organizados, (hasta el momento solo se registraban los grupos mayores de 20 personas) permitiendo así controlar de forma más efectiva el ingreso de visitantes al interior de la gruta con un máximo de visitas de hasta 1600 visitantes al día, en grupos de máximo cincuenta visitantes cada 15 minutos.

En la reserva se cuenta con un equipo de trabajo que consta de 20 trabajadores entre guías, cajeros, trabajadores de mantenimiento y gestores.

La visita a la cueva está compuesta por un video explicativo de 10 minutos de duración, siendo el recorrido autoguiado por un camino circular de hormigón que fue construido sobre pilares antes de la apertura oficial y que guía al visitante por las diferentes galerías sin poner en peligro las zonas más sensibles de la cavidad. La duración del circuito es de unos 30 minutos, donde se puede apreciar y disfrutar de la gran variedad, riqueza y belleza de los espeleotemas que pueblan la Cueva Soreq (figura 14).

## La lucha contra el mal verde

La erradicación del mal verde en las cuevas turísticas es una preocupación y ocupación permanente de científicos y gestores, tratando siempre de buscar y utilizar métodos más

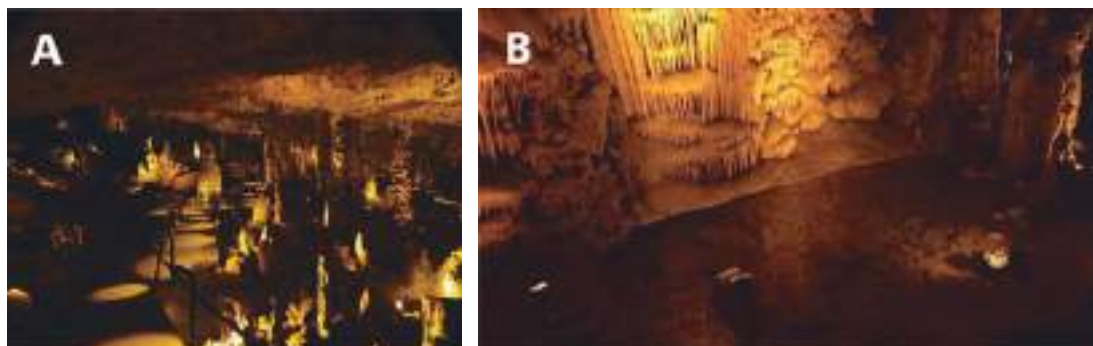


Figura 14. A) Profusión de espeleotemas en Cueva Soreq. B) Vista del lago principal (foto: A Lichak).

efectivos y menos dañinos para los espeleotemas y la fauna subterránea existente dentro de la cueva.

La luz artificial instalada dentro de las cuevas habilitadas para el turismo subterráneo favorece la aparición y crecimiento de colonias de lampenflora.

Durante años la limpieza de las formaciones en la Cueva Soreq fue realizada con diferentes técnicas como luz ultravioleta, lavado de la superficie afectada con oxidantes, alguicidas, inhibidores de la fotosíntesis y otros. Sin embargo, estos métodos fueron infructuosos.

Es por esto que, en el año 2020 en mitad de la pandemia, la dirección de la cueva decidió contactar al Profesor Aaron Kaplan, investigador de los procesos de la fotosíntesis de la Universidad Hebrea de Jerusalén, quien se dedicó a investigar la manera de eliminar el mal verde por intermedio del uso de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en concentraciones muy bajas.

En el proyecto de rehabilitación de los espeleotemas afectados se realizó primeramente un mapeo general de la cueva con su localización, realizando el mismo en la oscuridad ayudados por linternas individuales, logrando así detectar áreas que con la iluminación artificial de la cueva no hubieran sido visibles.

En el mapeo se detectaron estalactitas y estalagmitas afectadas con colonias activas de microorganismos fotosintéticos y algunas formaciones dañadas por el efecto de los años de tratamiento no efectivo, donde era casi imposible eliminar la mancha verde de la formación.

Aprovechando el hecho de que, en general, las cianobacterias son relativamente sensibles al estrés oxidativo, en lugar de usar una alta concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> que provoque la muerte necrótica (inmediata) de las células en superficie, se aprovechó la actividad biológica para inducir la muerte celular de todo el filamento, debido a la exposición prolongada al bajos niveles de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

El producto percola entre los filamentos eliminando incluso aquellas células que nunca experimentaron un contacto directo con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. (Sukdnik y Kaplan, 2021.)

Se tomaron muestras antes (figura 15a y 16a) y después del tratamiento, llevando las pruebas al laboratorio donde se vio la eficiencia del método en la eliminación de las colonias. En la figuras 15b y 16b se comprueba la eficiencia del tratamiento con las pruebas de laboratorio e *in situ*. Las manchas se limpiaron con un rociado controlado de hipoclorito al 3%.

En otro esfuerzo por mejorar el proceso de conservación de la cavidad la iluminación artificial fue renovada totalmente. Se instaló un sistema de alto rendimiento y bajo costo de mantenimiento, con luz Led color ámbar de 1800 °K. con protección para humedad IP67. Al mejorar el sistema de limpieza y la orientación de los puntos de luz se ha logrado un mejor control sobre la proliferación del mal verde.

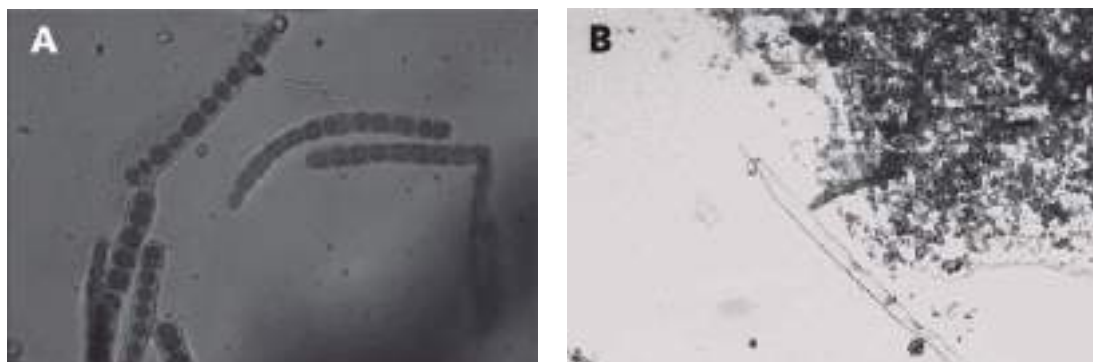


Figura 15. A) Colonia de cianobacterias antes del tratamiento. B) Después del tratamiento donde se pueden ver los filamentos sin vida (Kaplan, 2022) (foto: I. Abecassis).

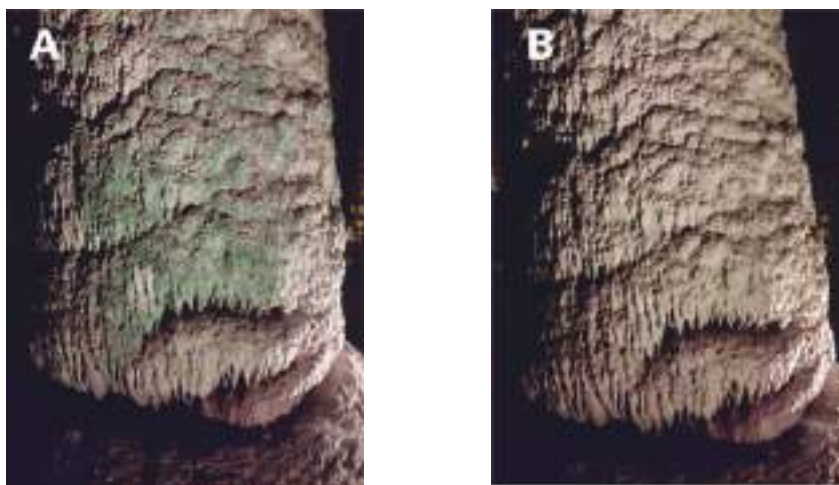


Figura 16. A) Estado del espeleotemas antes de tratamiento. B) después del tratamiento (foto: A. Arad).

## Proyectos futuros

Restauración de las dos canteras abandonadas: El aparcamiento, y el edificio de entrada a la Cueva serán trasladados a la Cantera Sur y una vez finalizados los trabajos, el antiguo aparcamiento será removido permitiendo la recuperación natural del espacio. Se espera que al remover el asfalto del aparcamiento superior mejore con los años el flujo de agua al interior de la cavidad (figura 17)

El nuevo aparcamiento contará con 350 lugares de estacionamiento más un lago natural de invierno. Un puente colgante unirá el nuevo aparcamiento con la entrada a la cueva, que se espera sea una atracción turística por sí misma.

La restauración ecológica de la cantera norte se encuentra en progreso. La operación está a cargo de la cantera vecina. El material utilizado para el relleno son residuos de los trabajos de minería de la propia cantera (figura 18).



*Figura 17. Vista del aparcamiento superior (foto: APN).*

## **Algunas reflexiones**

La Reserva Natural Cueva de Estalactitas de Israel es la única cueva turística en la que el visitante entra en contacto con las bellezas naturales que el mundo subterráneo kárstico ofrece.



*Figura 18. Vista de los trabajos de restauración de la cantera norte. (foto: APN).*

La gran variedad de formaciones que pueblan las casi cinco hectáreas de la cavidad, y la densidad en la apariencia de las mismas hacen de la cueva una maravilla natural.

La Autoridad de Parques Nacionales es la encargada de la dirección y preservación de la cueva, trabajando siempre para lograr el perfecto balance entre las necesidades de los visitantes y la extrema responsabilidad de proteger el tesoro natural para las próximas generaciones.

## Agradecimientos

Al Instituto Geológico de Israel por el constante trabajo en conjunto. Autoridad de Reservas Naturales y Parques Nacionales- Distrito Central. Al ACTE Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.

## Referencias

- Bar-Matthews, M., Ayalon, A., Matthews, A. (1989). Estudios mineralógicos y petrográficos de los sedimentos de la cueva Soreq, Beit Shemesh (informe resumido), Instituto Geológico de Israel, Jerusalén.
- Even, H., (1983) Tesis, Composición química e isotópica del agua en la región del Alto Haadozi en el grupo Yehuda, Cueva Soreq, de las Montañas Yehuda Universidad Hebrea de Jerusalem (traducción del idioma hebreo)
- Palchan, D., Ben-David, R., Coddington, J., Aksinenko, T., Reshef Schwarz, G., Kurzon, I (2021). Informe: Safety distances from a speleothem cave for construction: Soreq cave Israel. Mediterranean Geosciences Union Congress, 27-30 (en prensa).
- Durán Valsero, J.J., Pagés Rodríguez, R., Jordá Bordehore L. (2021) Informe construcción del nuevo aparcamiento y accesos a la cueva de estalactitas de Israel. ACTE - Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (informe inédito).
- Sukenik, A., Kaplan A. (2021) -Cyanobacterial Harmful Algal Blooms in Aquatic Ecosystems: A Comprehensive Outlook on Current and Emerging Mitigation and Control Approaches, *Microorganisms*, 9, 1472. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071472>.





# Cuevas turísticas litorales y cambio global: el impacto de las oscilaciones del nivel del mar sobre el sistema hidrogeológico y la problemática legal

Pedro Agustín ROBLEDO ARDILA <sup>(1)</sup>, Rebeca ÁLVAREZ ALONSO <sup>(1)</sup>,  
Juan José DURÁN VALSERO <sup>(2)</sup>, Sergio Raúl DURÁN LAFORET <sup>(3)</sup>,  
Raquel MORALES GARCÍA <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Administración Periférica del Estado, Jarrer Felicia Fuster, 7. 07006, Palma de Mallorca. pa.robledo@igme.es, r.alvarez@igme.es

<sup>(2)</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Calle Ríos Rosas 23, 28003, Madrid. jj.duran@igme.es, rmorales@igme.es

<sup>(3)</sup> Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA), Edificio de Investigación Ada Byron, Arquitecto Francisco Peñalosa, 18, 29010, Málaga. sduran@uma.es

---

## Resumen

En general, las cavidades son elementos geoambientales muy sensibles a cualquier variación atmosférica del exterior. Sin embargo, el impacto del cambio global en cuevas turísticas no ha sido abordado desde una perspectiva aplicada. Las cuevas turísticas son un excelente laboratorio ya que, por un lado, tienen buena accesibilidad y muchas de ellas tienen monitorizados los parámetros ambientales más importantes (CO<sub>2</sub>, temperatura, humedad). En España, hay cuevas turísticas de interior y cuevas litorales. Estas últimas cuentan en muchos casos con lagos endokársticos que pueden ser buenos indicadores de las oscilaciones marinas regionales, con efecto directo sobre las oscilaciones freáticas y la hidroquímica del agua subterránea. Al ser cuevas habilitadas al turismo, muchas infraestructuras están cercanas al agua de los lagos, por lo que, podría verse afectada la visita si estas zonas llegaran a inundarse. Por ejemplo, en Menorca, la Cueva de S'Aigua, tiene el mirador del lago a una altura de unos 1,20 m sobre la lámina de agua. Aunque las oscilaciones actuales alcanzan un rango de entre 40 y 50 cm de amplitud máxima, sin embargo, la tendencia general del nivel freático entre 2016 y 2021 es ascendente, así como la temperatura del agua que en el mismo periodo ha subido 0,3 °C de media. El progresivo aumento puede suponer, en un futuro a medio plazo, la inundación del mirador, con las correspondientes consecuencias sobre las vistas. Otras cuevas en Mallorca, como las del Drac o las del Hams, tienen pasarelas o zonas de visita muy cercanas al agua. Además, la modificación en la hidroquímica del agua puede suponer un impacto sobre los ecosistemas acuáticos endokársticos. Igualmente se pueden modificar sensiblemente algunas características del sistema de la atmósfera de la cueva. Estos cambios alteran el modelo espeleogenético de las aguas actuales que son precipitativas y pueden cambiar a aguas disolutivas, e impedir la formación de espeleotemas freáticos y epifreáticos y pueden llegar a hacer desaparecer algunos ya formados. Por otro lado, una subida del nivel del mar en cavidades litorales puede afectar a la naturaleza legal que establece la Ley de Costas de 1988, modificando el actual Dominio Público Marítimo Terrestre (DPMT). Esto llevaría consigo la revisión de la titularidad en una situación legal cuanto menos desconocida o muy compleja.

**Palabras Clave:** cambio global, cuevas litorales, divulgación científica, nivel freático, turismo subterráneo

## ***Coastal tourist caves and Global Change: the impact of sea level oscillations on the hydrogeological system and legal issues***

### ***Abstract***

*In general, caves are geoenvironmental elements that are very sensitive to any atmospheric variation from the outside. However, the impact of global change on tourist caves has not been addressed from an applied perspective. Tourist caves are an excellent opportunity to study the impact of global change since, on the one hand, they are easily accessible and many of them have the most important environmental parameters (CO<sub>2</sub>, temperature, humidity) monitored. In Spain, there are interior tourist caves and coastal caves. In many cases, the latter have endokarstic lakes that can be good indicators of regional marine oscillations, with a direct effect on piezometric oscillations and the hydrochemistry of groundwater. Being caves enabled for tourism, many infrastructures are close to the water of the lakes, so the visit could be affected if these areas were to flood. For example, in Menorca, the Cueva de S'Aigua has a viewpoint of the lake at a height of about 80 cm above the level of water. The current oscillations have a maximum amplitude range between 40 and 50 cm, so an increase in this range would mean the flooding of the viewpoint. Other caves in Mallorca such as Drac or Hams have walkways or visitor areas very close to the water. In addition, the modification in the hydrochemistry of the water would impact on the macro and micro endokarst aquatic ecosystems. Some characteristics of the cave's atmospheric system can even be significantly modified. These changes alter the speleogenetic model, from the current precipitating waters to generate dissolving waters, more acidic that cause greater dissolution, stop the formation of phreatic and epiphreatic speleothems and can even make some already formed disappear. Another change associated with the rise in sea level is related to the protection of the coastline established by the 1988 Coastal Law, through the Terrestrial Maritime Public Domain (DPMT); according to which, land subject to flooding by the sea belongs to this coastal protection DPMT, with review of ownership in a legal situation that is at least unknown or very complex.*

**Keywords:** *coastal caves, global change, phreatic level, scientific outreach, tourism.*

## **Introducción**

Las cuevas litorales, turísticas o no, son buenos ejemplos para analizar las oscilaciones del nivel del mar y su impacto sobre los lagos subterráneos. Un ejemplo representativo, es la Cueva de S'Aigua, en la isla de Menorca, situada bajo la urbanización Cala Blanca,

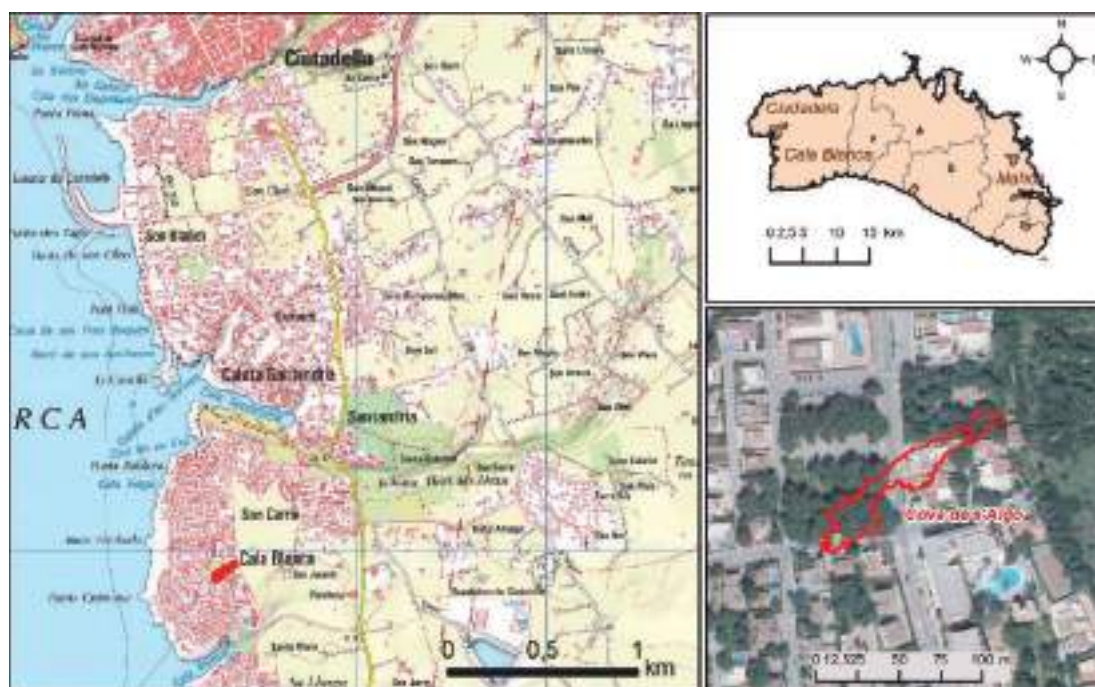


Figura 1. Situación de la Cueva de S'Aigua en la urbanización de Cala Blanca (Ciutadella, Menorca).

muy próxima al mar. La localidad de Cala Blanca se ubica al oeste de la isla, en el término municipal de Ciutadella, a unos 2,5 km al sur de esta ciudad (figura 1).

Se trata de un sector de costa acantilada y calas de gran atractivo turístico donde el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) viene realizando desde hace años, en colaboración con el Consell Insular de Menorca (CIM), diversos estudios de los aspectos geoambientales de la Cueva de S'Aigua, en relación con su reciente apertura al turismo.

La Cueva de S'Aigua se encontraba bastante modificada por la acción del hombre al haber sido acondicionada antiguamente, aunque en 2021 ha sido rehabilitada y acondicionada con criterios modernos para su visita turística. Se trata de una cueva de dimensiones modestas, de desarrollo horizontal, con un lago interior y una cierta cantidad y variedad de espeleotemas, con más de 200 m de longitud de galerías. Fue explorada por primera vez en el año 1955 por el equipo de Búsquedas Espeleológicas del Centro Excursionista de Cataluña (CEC), con la colaboración de espeleólogos locales.

Durante estas primeras exploraciones se recuperaron algunas cerámicas talayóticas y clásicas, así como restos óseos humanos que se depositaron en el ayuntamiento de Ciutadella para su museo municipal. Se ha realizado el levantamiento topográfico detallado de la planta de la cueva y de las secciones transversales a la dirección principal de la cavidad (IGME y CIM, 2017). En su habilitación, se han instalado sensores de medida en continuo del nivel del agua y de diversos parámetros del aire. Los primeros miden, además, oscilaciones de la lámina de agua, la conductividad eléctrica, la temperatura y la

concentración salina del agua. Los segundos registran el CO<sub>2</sub> atmosférico y la temperatura ambiental de la cueva.

## Marco geológico e hidrogeológico

Menorca es la isla más nororiental del archipiélago balear, que constituye la parte emergente del denominado Promontorio Balear en el Mediterráneo occidental. Desde el punto de vista geológico, la isla de Menorca se compone de dos regiones bien diferenciadas: la región de Tramuntana, al norte, formada de materiales paleozoicos (esquistos del Silúrico, calizas del Devónico, turbiditas siliciclásticas del Carbonífero y areniscas y pelitas rojas del Pérmico), materiales del Mesozoico (areniscas y dolomías del Triásico y Jurásico y calizas del Cretácico) y rocas del Terciario inferior; y la región de Migjorn al sur, compuesta por rocas carbonáticas del Mioceno superior que de forma discordante recubren el sustrato Paleozoico, Mesozoico y Paleógeno (Pomar *et al.*, 2002) (figura 2).

Las rocas miocenas superiores (Tortonense inferior a Messiniense) de la región de Migjorn presentan una disposición subhorizontal. Localmente, la sucesión del Mioceno

superior se apoya sobre sedimentos del Mioceno medio (Obrador *et al.*, 1983, y 1992), conglomerados y calcarenitas de origen bioclástico.

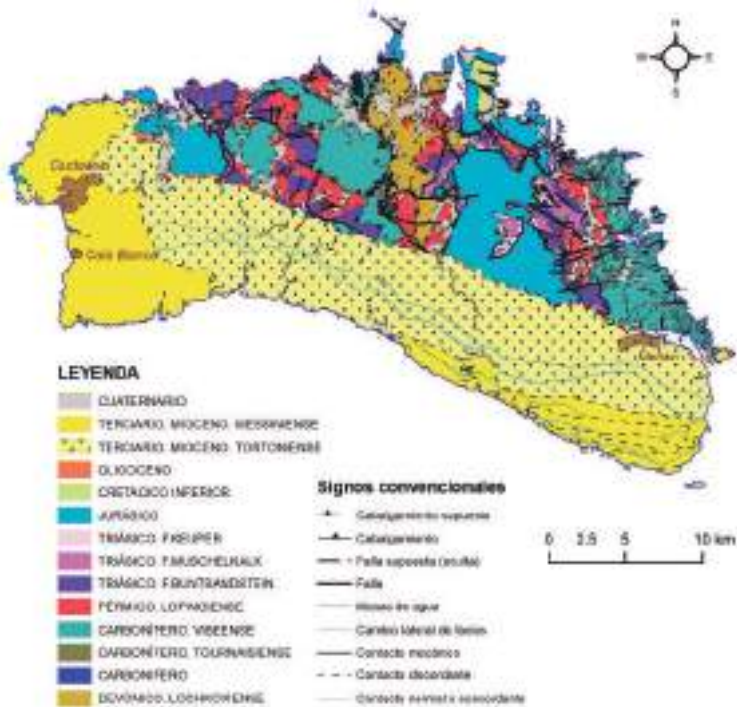


Figura 2. Mapa geológico de la isla de Menorca. Fuente: GEODEIIGME.



Figura 3. Distribución de las Masas de Agua Subterránea en la isla de Menorca.

La Cueva de S'Aigua, se desarrolla en materiales que pertenecen al Mioceno superior, del denominado Complejo Arrecifal, compuesto por sedimentos calcareníticos de grano grueso, bioclastos, rodolitos, fragmentos de corales y algas rodofíceas, equínidos y moluscos.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la Cueva de S'Aigua se ubica en la Masa de Agua Subterránea (MAS) de Ciudadella (ES110MSBT1901M3), compuesta litológicamente por los materiales miocenos descritos, que constituyen un acuífero libre y costero (figura 3). En esta masa de agua, las cotas de los niveles piezométricos presentan poca variación interanual, con una depresión de los niveles más importante en los pozos de abastecimiento cercanos a la localidad de Ciudadella.

No obstante, hay que destacar que los niveles freáticos son coincidentes en la mayoría de las cavidades con el nivel del mar. Las profundidades de niveles freáticos en este sector están entre los 14 y los 9 m. Los valores máximos registrados en ión cloruro durante 2014 fueron de 2.550 mg/L (Robledo, 2014; García *et al.*, 2014), lo que indica presencia de agua salobre consecuencia de la intrusión de agua de mar. La evolución interanual muestra un aumento del valor promedio de 6 mg/L, consecuencia del incremento puntual del valor máximo registrado en los pozos de Es Caragolí, utilizados para el abastecimiento a la localidad de Ciudadella, relativamente próximos a la zona donde se ubican las cavidades. Por el contrario, los valores de nitratos en este sector no superan los 40 mg/L (Robledo, 2014; García *et al.*, 2014), lo que indica poca actividad agraria en la zona, por otro lado, propia de estos entornos de la isla.

La facies hidroquímica predominante es mixta, de tipo bicarbonatada-clorurada sódico-cálcica en toda la masa de agua subterránea, si bien debido a la fuerte salinización por intrusión marina en el sector occidental, en los alrededores de Ciudadella, existen zonas con facies netamente cloruradas sódicas (Morales *et al.*, 2018).

## Metodología de estudio

Para el control del nivel del agua del lago existente en el interior de la cavidad y de los parámetros fisicoquímicos, se ha instalado un *datalogger* en la zona sur del lago, cerca del mirador donde termina el camino habilitado para la visita turística. Se trata de un sensor CTD Keller PR-36XiW multiparamétrico para monitorización de aguas subterráneas (temperatura, nivel, conductividad y valores de salinidad total). Utiliza una interfaz Modbus, compatible con los sistemas de telemetría, incluso para la conexión de varios sensores en red. Se programó para medidas horarias y tomó registros entre noviembre de 2015 y junio de 2021. Además, para la verificación de la presión atmosférica en relación



*Figura 4. Zona del lago donde se han instalado los sensores que registran los datos de nivel, temperatura, conductividad y salinidad.*

con la presión del agua, se instaló también un El BaroSCOUT que monitoriza y registra la presión atmosférica, con el fin de compensar las lecturas de nivel de agua y así conseguir medidas precisas de columna de agua. Finalmente, para obtener registros precisos se transformaron los datos de oscilación del nivel freático a cota piezométrica. Los datos se han tratado mediante el software Aqua4Plus, mediante el cual se pueden obtener gráficos y combinar series de datos si fuera necesario.

## Resultados

Los datos obtenidos con relación a las oscilaciones del nivel freático de la cavidad muestran una tendencia en ascenso entre los años 2016 y 2021, diferenciándose dos

grandes periodos: los años 2016 y 2017, y los años 2019 y 2020 (figura 5). Durante el primer periodo los niveles piezómetros se mueven en cotas comprendidas entre 60 y 80 cm s.n.m. con una sensible subida sostenida a partir del segundo semestre de 2017. En cuanto al segundo periodo, los niveles están entre 80 y 120 cm s.n.m. lo que significa un ciclo con niveles mucho más altos que el primero.



Figura 5. Evolución de los niveles piezométricos entre 2016 y 2021

En cuanto a la conductividad eléctrica del agua y la salinidad se observan también dos grandes ciclos, que son coincidentes con los anteriores (figuras 6 y 7). En el primero, los valores se mueven entre 12000  $\mu\text{S}$  y 25000  $\mu\text{S}$ . En el segundo periodo los valores están por encima de 25000  $\mu\text{S}$  desde mediados de 2019 y alcanzan valores máximos de 30000  $\mu\text{S}$  (figura 6). Sin embargo, durante febrero-marzo de 2020 los valores de conductividad descienden hasta prácticamente 10000  $\mu\text{S}$  (figura 6). La salinidad sigue un patrón similar, con una réplica de los periodos indicados. Durante el primer periodo se mueve entre valores de 6 y 14 psu, pero durante finales de 2019 y 2020 alcanza entre 15 y 18 psu (figura 7).

La temperatura del agua muestra, igualmente, el mismo patrón, con dos ciclos diferenciados, 2016-2017, con valores entre 19,15 °C y 19,30 °C, y 2020, con valores que superan los 19,40 °C, alcanzado un máximo del 19,50°C (figura 8). La amplitud máxima de variación es de 0,55 °C.

En el caso de los datos de los niveles freáticos y la conductividad eléctrica durante 2018 no han podido representarse todavía debido a un problema de calibración del sensor. No



Figura 6. Relación evolutiva entre los niveles piezométricos y la conductividad en el periodo 2016 y 2020.



Figura 7. Relación evolutiva entre los niveles piezométricos y la conductividad en el periodo 2016 y 2020





Figura 8. Evolución de la temperatura en la Cueva de S'Aigua entre 2016 y 2020

obstante, la revisión preliminar muestra una tendencia ascendente durante todo el año y principios del 2019.

## Interpretación de los resultados

Como se observa nítidamente en las figuras descritas anteriormente, las oscilaciones de nivel freático siguen un patrón claramente ascendente desde 2016 hasta finales de 2020. Esta evolución tiene una relación directa con dos vectores muy importantes; 1) las precipitaciones y 2) procesos de intrusión salina de agua de mar. En cuanto al primero, la precipitación (figura 9), en el que se observa que, sobre todo el año 2018, pero también finales del 2019 y una buena parte de 2020 han sido muy periodos lluviosos, con relación a años anteriores. No obstante, los registros de conductividad y salinidad muestran como regla general una tendencia ascendente durante los años registrados.

*A priori*, las subidas del nivel piezométrico del lago de la cueva en relación al aumento de las precipitaciones debería dar lugar a un descenso en la conductividad y concentración de sal. A este factor, se une que, durante el año 2020 la extracción de agua mediante bombes descendió de forma muy importante debido a la pandemia, ya que la actividad turística prácticamente fue nula. Si se observa en detalle, en ambos periodos descritos esta relación inversa si se produce, y los ascensos del nivel piezométrico están acompañados de un descenso de los valores de conductividad y concentración de sal.

Sin embargo, la tendencia general de todo el periodo analizado en su conjunto es un incremento continuo y muy importante de la conductividad y de la concentración de sal,

coincidiendo con la subida del nivel piezómetro del lago de la cueva. Por ello, parece que esta subida del nivel del lago no está ligada fundamentalmente a las precipitaciones, sino sobre todo a un importante proceso de intrusión de agua de mar. Este hecho particular puede tener como elemento de control la temperatura, que también experimenta una subida constante desde 2016 y que sube de media en torno a 0,5 °C.

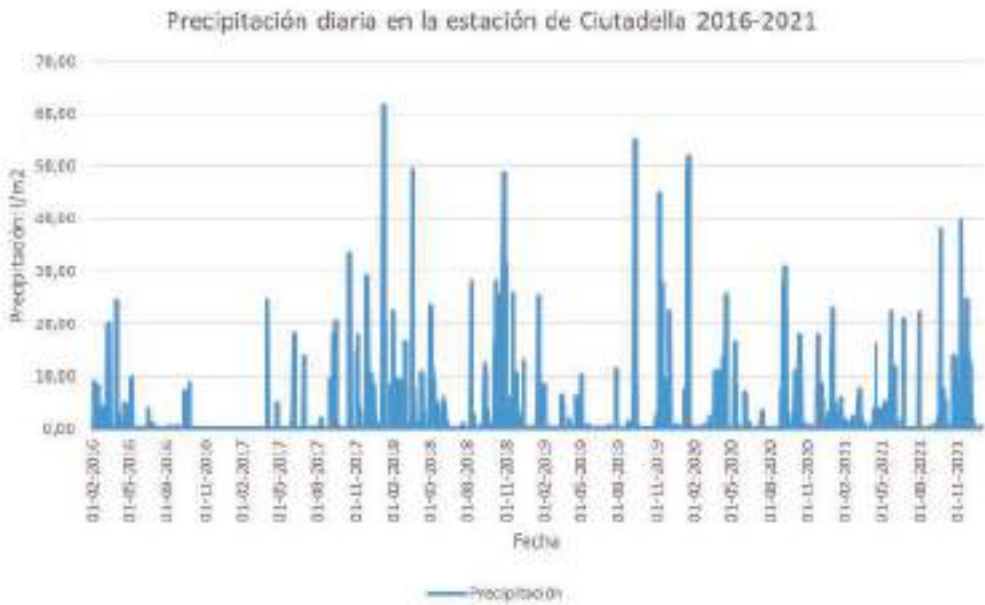


Figura 9. Precipitación mensual entre 2016 y 2021 en la estación de meteorológica de Ciutadella, Menorca

## Impacto de la subida del nivel del mar en las cuevas turísticas; el ejemplo de la Cueva de s'Aigua

De acuerdo con los resultados obtenidos, el ascenso del nivel freático en la cueva, *a priori* ligado a procesos de intrusión salina, de agua marina, afecta de forma muy importante al sistema hidrogeológico de la propia cueva y como consecuencia al acuífero. Por un lado, se están produciendo cambios significativos en la fisicoquímica del agua, con un incremento sostenido de valores de conductividad, salinidad y temperatura. Este hecho puede, por un lado, afectar al sistema ambiental acuático, donde determinados seres vivos, (sobre todo microorganismos) cuya subsistencia depende del aporte de agua dulce en un sistema de aguas salobres pueden ver comprometida su existencia.

Por otra parte, un agua cada vez más salada, también afecta a los procesos geoquímicos de precipitación y disolución, porque puede estar produciéndose un cambio del sistema hidrogeoquímico que hasta ahora era básicamente precipitativo, a un agua más agresiva y,

por tanto, disolutiva. Este cambio puede afectar tanto a la formación de nuevos espelotemas como al deterioro de los que ya están formados, ya sean epifreáticos o bien formaciones vadosas sumergidas que se conservan en condiciones hidroquímicas menos agresivas.

El avance de la interfase en la cueva es un indicador directo de la calidad del agua del acuífero. La masa de agua de Ciutadella, en la que se encuentra la cueva, está viendo mermada las reservas hídricas disponibles por una pérdida de calidad del agua y este proceso continuo puede llegar a afectar a los abastecimientos urbanos, en los pozos cercanos a la cueva.

Si siguen las subidas del nivel freático del lago de la Cueva de S'Aigua con esta tendencia rápida, también pueden llegar a superar, a medio plazo, la zona de visita del lago en la que se encuentra un mirador de tramex con barandilla de acero inoxidable. Esto modificaría tanto el recorrido de la vista actual como el tiempo de visita en la cueva, además de que sería necesario una intervención constructiva para evitar que la inundación de esta parte de la visita afectara al sistema de iluminación de la cavidad.

Por último y como define la normativa de la Ley de Costas de 1988, el Dominio Público Marítimo Terrestre estaría cambiando también de forma muy rápida, lo que debería ser contemplado en el marco de una problemática legal que afecta especialmente a zonas insulares como Menorca en particular y todo el archipiélago balear, en general. De acuerdo con la naturaleza de la ley y los artículos 2 y 3, estos cambios afectarían a la delimitación del actual Dominio Público Marítimo Terrestre.

## **Conclusiones**

De acuerdo con los datos obtenidos de los sensores en el agua del lago de la Cueva de S'Aigua, se deduce que:

1. Desde 2016 hasta 2020, se ha registrado un ascenso del nivel freático sostenido en el lago de la cueva.
2. El ascenso del nivel freático parece estar ligado más estrechamente al avance de la interfase de agua dulce-agua salada, como consecuencia de una posible subida también del nivel medio del mar.
3. Este ascenso sostenido en los últimos años ha dado lugar a un cambio de la fisicoquímica del agua, con un incremento de la conductividad eléctrica, la concentración de sal y una subida de la temperatura media del agua del lago de la cueva.
4. La subida del nivel freático puede afectar tanto al hábitat acuático y a la biodiversidad, como dar lugar a un cambio en los procesos geoquímicos de disolución y precipitación. Esto puede deteriorar el patrimonio geológico de la cavidad y el desarrollo de nuevos espeleotemas epifreáticos.

5. Por otra parte, se pueden ver comprometidos los recursos hídricos disponibles por una pérdida de calidad del agua de abastecimiento debido a estos procesos de salinización en acuíferos costeros.
6. Aunque todavía estamos ante un estudio preliminar, parece que esta subida del nivel piezométrico del agua del lago de la cueva está asociada al cambio climático y la subida progresiva del nivel del mar.

Además, se abre una problemática en la relación entre cuevas litorales y la delimitación del Dominio Público Marítimo-Terrestre, que en algún momento deberá ser abordada.

## Referencias

- CIM e IGME. 2017. Informe técnico: anteproyecto compartido para la apertura al público de la cueva de s'Aigo, Cala Blanca, Menorca. Diciembre 2017. Fondo documental IGME.
- Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.
- López García, J.M. y Cantón Avila, J.L. 2012. Islas Baleares. En: *Nuevas aportaciones al conocimiento de los acuíferos costeros. Estado de la intrusión marina en los acuíferos costeros españoles.* (López Geta, J.A. y Fernández Ruiz, L. eds.). Vol. 2, 153-182. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- López, J.M., Cantón, J.L. y Palmer, E. 2014. *Memoria de actividades de las redes de control de aguas subterráneas en las Islas Baleares (Proyecto ATMIH).* Fondo documental IGME. 21 p.
- Morales, R., Durán, J.J y Robledo P.A. 2018. Estudio hidroquímico de las aguas endokárticas de la Cueva de s'Aigua, Cutadella, Menorca. En: *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad* (Robledo P.A. Coord). VII Congreso Español sobre Cuevas Turísticas y II Congreso Iberoamericano. 55-68 pp.
- Obrador, A., Pomar, L., Rodríguez- Perea, A. y Jurado, M.J. 1983. Unidades deposicionales del Neógeno menorquín. *Acta Geológica Hispánica*, 18 (2): 87-97.
- Obrador, A., Pomar, L. y Tarberner, C. 1992. Late Miocene breccia of Menorca (Balearic Islands): a basis for the interpretation of a Neogene ramp deposit. *Sedimentary Geology*, 79: 203-223.
- Pomar, L., Obrador, A. y Westpha, H. 2002. Sub-wavebase cross-bedded grainstones on a distally steepened carbonate ramp, Upper Miocene, Menorca, Spain. *Sedimentology*, 49: 139-169.
- Robledo, P.A. 2014. Informe científico-técnico sobre el estudio de las alternativas para la puesta en valor de la Cueva de s'Aigua y de la Cova de Na Megaré, Cala Blanca. T.M. de Ciutadella (Menorca). Fondo documental IGME, 26 p.

## **Mina Cueva Victoria, Cartagena: una visita minero-paleontológica**

Andrés ROS VIVANCOS <sup>(1)</sup>, María José MADRID BALANZA <sup>(1)</sup>, Ángel ALCARAZ BERNAL <sup>(1)</sup>, Luis GIBERT BEOTAS <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Ayuntamiento de Cartagena, C/ Jara 3, 30201 Cartagena. andres.ros@ayto-cartagena.es, mariajose.madrid@ayto-cartagena.es, angel.alcaraz@ayto-cartagena.es

<sup>(2)</sup> Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona. Martí Franquès s/n, 02028 Barcelona. lgibert@ub.edu

### **Resumen**

La mina Cueva Victoria se encuentra situada al este de Cartagena, en el cerro de San Ginés, el Estrecho, Cartagena. Es una antigua mina de hierro y manganeso que tuvo su explotación a desde 1878 hasta 1952. Presenta un gran valor espeleológico y mineralógico por sus depósitos de calcita que conservan un completo registro del clima del pasado y de minerales como la barita naranja. Además, en su interior se encuentra un relleno fosilífero del Pleistoceno, que fue descubierto en 1958 y excavado a partir de 1978. El yacimiento forma parte del patrimonio paleontológico de la Región de Murcia y está reconocido como geosite. La cueva original estuvo habitada por hienas del Pleistoceno, dejando una importante acumulación de restos. Su registro fósil es excepcional por la gran diversidad de especies encontradas. Hasta el momento 105 especies de vertebrados han sido documentadas, siendo un lugar clave para la reconstrucción y migraciones de la fauna del Pleistoceno inferior. El Ayuntamiento de Cartagena está realizando el acondicionamiento y musealización para su apertura al público, con recorridos por la mina, cueva y el yacimiento paleontológico que compatibilizará la excavación con las visitas e instalando recreaciones de la fauna del Pleistoceno que habitó la cueva.

**Palabras clave:** cueva, mina, musealización, yacimiento, paleontología, Cueva Victoria.

### ***Cueva Victoria Mine, Cartagena: A mining-palaeontological tour***

#### **Abstract**

*The Victoria Cave Mine is located east of Cartagena on the hill of San Gines, El Estrecho, Cartagena. It is an old iron and manganese mine that was exploited from 1878 to 1952. It is of great speleological and mineralogical value due to its calcite deposits that preserve a complete record of the climate of the past and rare minerals such as orange barite. It also contains a Pleistocene fossiliferous fill, which was discovered in 1958 and excavated from 1978 onwards. The site is part of the palaeontological heritage of the Region of Murcia and is recognised as Geosite. The original cave was inhabited by Pleistocene hyenas, leaving an important accumulation of remains. Its fossil record is exceptional for the great diversity of species found, so far 105 species of vertebrates have been documented, being*

*a key place for the reconstruction and migrations of the fauna of the Lower Pleistocene. The City Council of Cartagena is carrying out the conditioning and musealisation for its opening to the public, with tours of the mine, cave and palaeontological site that will make the excavation compatible with visits and installing recreations of the Pleistocene fauna that inhabited the cave.*

**Keywords:** *cave, mine, musealisation, archaeological site, palaeontology, Victoria cave.*

## Historia

Cueva Victoria se encuentra situada en el Monte Miral, Estrecho de San Gines, dentro del término municipal de Cartagena. Su entorno fue declarado Bien de Interés Cultural en 2017 (BIC Monte Miral, 2017).

Cueva Victoria es también una antigua mina de hierro y manganeso explotada entre los años 1878 y 1952 (Pérez de Perceval *et al.*, 2015), lo que cubre un periodo significativo dentro de la larga historia de la minería en la sierra de Cartagena y La Unión (figura 1). Presenta también un gran valor desde el punto de vista de la espeleología, pues los mineros se cruzaron con galerías y salas naturales y sus depósitos de calcita conservan un completo registro del clima del pasado (Budsky *et al.*, 2015).

Las labores mineras pusieron al descubierto un importante yacimiento de fauna cuaternaria que permanecía oculto bajo una capa de calcita. Las primeras noticias sobre la presencia de restos óseos aparecen publicadas en la prensa local en 1958 (Pérez-Adán, 2021). En el año 1970 se publica un trabajo sobre la cueva-mina Victoria con referencias al yacimiento en el I Congreso Nacional de Espeleología (Valenzuela, 1970). En 1978 Juan Pons y Salvador Moya (Pons *et al.*, 1978) publican un trabajo sobre carnívoros del yacimiento, iniciándose a partir de esta fecha excavaciones periódicas por distintos equipos hasta el momento actual.

A partir de 2008 el Ayuntamiento de Cartagena inicia un proyecto de acondicionamiento y puesta en valor para usos de investigación paleontológica y turística, instalando un sistema de andamios que permite excavar el resto del yacimiento, dejado por los mineros, y que se encuentra en el techo.

Paralelamente se inician otros trabajos de investigación: estudios de los cambios de polaridad magnética, estudios del clima a través de los espeleotemas, e intervienen un gran número de investigadores que culminan sus trabajos en una extensa monografía sobre Cueva Victoria (Gibert *et al.*, 2015a).

## Mina Cueva Victoria

Se desconocía la existencia de la cueva hasta la llegada de los mineros. Estos empezaron las labores excavando trincheras siguiendo los filones de mineral (figura 2) (Villasante,



Figura 1. Plano de Cueva Victoria sobre foto aérea (arriba). Entrada a la cueva (abajo).

1912) hasta enlazar con la cueva natural. La entrada original, desconocida, es posible que quedara colapsada y oculta por rellenos de la ladera de la montaña. En su interior se han encontrado importantes concentraciones de hierro y manganeso a lo largo.

En 1871 se registran las minas Victoria y Joaquina por D. Antonio Martínez Bernal, iniciando los trabajos en 1878. El yacimiento es importante para la zona y según describe Villasante (1912), "uno de los criaderos más interesantes de esta clase en el Distrito ha sido el de las minas "Victoria" y "Joaquina"(...). Tiene este criadero una corrida de 600 metros, presentándose casi toda ella mineralizada y con espesores variables que en algunas zonas han llegado a 50 metros". Los trabajos mineros tuvieron continuidad hasta el año 1952 que pasó a manos de Minas Celdrán (Pérez de Perceval et al., 2015).

Cueva Victoria es una antigua mina de hierro y manganeso, donde se explotaron tanto mineralizaciones hidrotermales primarias, como mineralizaciones secundarias de relleno kárstico. Está formada por un complejo conjunto de cavidades, donde se pueden diferenciar excavaciones artificiales mineras y cavidades kársticas naturales, más o menos retocadas por la actividad minera. La paragénesis mineral consiste en óxidos e

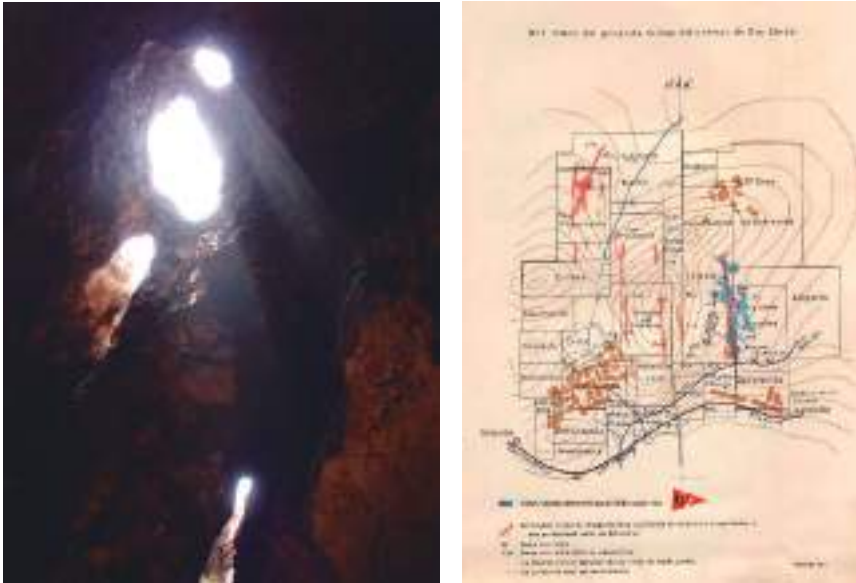


Figura 2. Trincheras iniciales mineras en techo (izquierda). Plano del grupo de minas del Cabezo de San Ginés; en azul la Cueva Victoria (derecha) (Villasante, 1912).

hidróxidos de hierro y manganeso, que contienen generalmente proporciones variables de Ba, Zn, Pb, Ca, correspondientes a especies como romanechita, hollandita, calcofanita, coronadita y otras. Van acompañadas además de abundante baritina, calcita, y localmente de carbonatos de Zn. Los contenidos de hierro y manganeso son relativamente bajos, siendo las leyes medias del mineral extraído del 24% de Fe y del 17% de Mn (Manteca *et al.*, 2015).

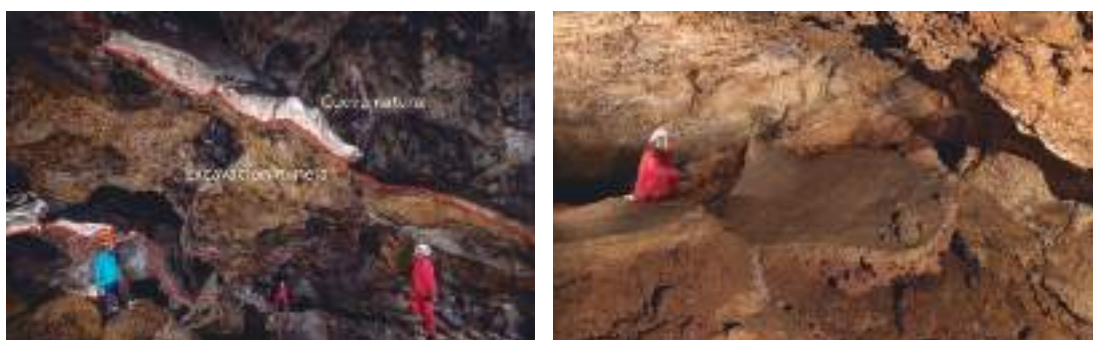
La cueva original se ha visto considerablemente alterada por las labores mineras, a pesar de esto, aún conserva vestigios de galerías y salas naturales que han permitido reconstruir en parte su estado original (Ros *et al.*, 2015). Valenzuela (1970) publica la primera descripción del karst de Cueva Victoria en el I Congreso Nacional de Espeleología, describiendo la cavidad junto a un plano de esta.

Los tramos naturales de la cavidad se enlazan con las labores mineras y fueron utilizados por los mineros como paso hacia nuevas galerías. Las galerías llevan una dirección Sur-Norte, siguiendo las brechas de mineral que aparece rellenando grietas y fracturas de la roca caliza. Los mineros excavaron galerías en dirección Este-Oeste para cruzarse con las brechas de mineral de dirección Sur-Norte (figura 2) y poder extraerlo, una de ellas, la galería Minera que se está habilitando para el turismo, recorre más de 300 m internándose en la montaña sin que aparezcan galerías naturales, en base a esto la cueva discurre a través de las fracturas de dirección Sur-Norte en la ladera de la montaña sin llegar a adentrarse en esta. Si parece ser que a más profundidad aparecen nuevas galerías, lo que podría representar la presencia en zonas inferiores de karst hipogénico Hay descrito,





*Figura 3. Galería minera de dirección Este-Oeste para cruzarse con las brechas de mineral de dirección Sur-Norte (izquierda). Galería natural con morfologías hipogénicas (derecha).*



*Figura 4. Galería natural excavada por los mineros, en la zona superior resto de la cavidad natural (izquierda). Galería natural fracturada por las labores mineras bajo el suelo (derecha).*

durante las labores mineras, un pozo minero que a los 90 m intersectó una gran sala inundada de agua, con óxidos de hierro-manganeso (Villasante, 1912).

La cavidad parece haber tenido varios procesos de rellenos kársticos, en un primer momento a la red de galerías con acceso desde el exterior y que fue el momento de ocupación de las hienas, y posteriormente este yacimiento quedó cubierto con una fina capa de calcita, esta ha podido ser datada por paleomagnetismo (Gibert *et al.*, 2015b), esta capa selló el yacimiento, al igual que la entrada natural, desconocida, hasta la llegada de los mineros, que empezaron las labores excavando en trincheras hasta llegar las galerías naturales (figura 2), estas labores fueron profundizando en la cavidad hasta sobrepasar los suelos naturales, excavando grandes volúmenes para extraer el mineral (figura 4). La cueva natural se entrecruza con las galerías mineras quedando restos identificables de

las mismas con numerosas morfologías hipogénicas, y espeleotemas epigénicos (figura 3 y 4).

## El yacimiento

La Cueva-Mina Victoria (Cartagena, Región de Murcia) alberga un conocido yacimiento paleontológico que forma parte del Bien de Interés Cultural (BIC Monte Miral, 2017) incoado como "Sitio Histórico del Monte Miral" (figuras 1 y 2). Sus valores geológicos y paleontológicos han propiciado su inclusión en el proyecto Global Geosite (IUGS y UNESCO). Además de este reconocimiento y figura de protección, el yacimiento paleontológico se encuentra recogido en diferentes inventarios de ámbito local, regional y nacional. La cueva Victoria ha sido recientemente valorada científicamente siguiendo la valoración científica de FOPALI, obteniendo un valor científico de 27 puntos sobre 40 indicativo de un valor Medio alto a Alto (Aberasturi *et al.*, 2019).

Cueva Victoria fue dada a conocer a la comunidad científica en 1970 por Arturo Valenzuela, quien la presentó en el I Congreso Nacional de Espeleología como un karst fósil, destacando sus minerales, pero describiendo también los restos de vertebrados fósiles (Valenzuela, 1970). A finales de los 70 y principios de los 80, Joan Pons investigó su fauna fósil, en colaboración con miembros del Institut de Paleontologia de Sabadell,



Figura 5. Croquis de los estratos de brecha fosilífera dejadas tras las intensas labores mineras. Dibujo de un original de J. Gibert ©.

publicando una serie de trabajos sobre carnívoros fósiles (Pons, 1978). En estos años se presenta públicamente el primer resto humano, una falange, junto con una serie de supuestas industrias líticas sobre hueso que despiertan un interés añadido al yacimiento (Carbonell *et al.*, 1981, Gibert, 1984), generando alguna controversia, despejando estas dudas en 2015 avalado por estudios científicos de estos restos humanos (Ribot *et al.*, 2015).

En 1984 se inician campañas de excavación con cierta regularidad, dirigidas por el Dr. José Gibert. Los trabajos se realizan con cierta dificultad, pues los restos de los estratos originales dejados por los mineros se encuentran en el techo (figura 5). A pesar de estas dificultades, entre los años 1985 a 1999 se publican varios estudios sobre la fauna de Cueva Victoria, interpretaciones de su edad, estudios anatómicos de la falange humana y el descubrimiento de *Theropithecus* (Gibert *et al.*, 1999). También se publican nuevos modelos sobre la dispersión de mamíferos en el Pleistoceno inferior que destacan la importancia del estrecho de Gibraltar como ruta alternativa a la dispersión de África a Europa, Cueva Victoria presenta varios taxones del Norte de África destacando el *Theropithecus Osvaldi* así como una amplia fauna africana que confirma esta ruta alternativa del estrecho (Gibert *et al.*, 2015c).

A partir de 2008, gracias a la financiación de la Consejería de Cultura, y el Ayuntamiento de Cartagena, las excavaciones dan un salto cualitativo, ya que se instala un andamio con el que se puede acceder a la parte superior de la brecha de relleno, la más rica en fósiles, pero situada a varios metros del suelo (figura 5). El andamio permite por primera vez un trabajo completo y detallado, iniciándose una excavación sistemática y metodológica, cartografiando los fósiles para obtener también información tafonómica. A partir de ese momento se añaden piezas importantes a la colección situadas en un contexto estratigráfico y tafonómico, entre ellas nuevos restos de *Theropithecus*, que se publican en el *Journal of Human Evolution* (Gibert *et al.*, 2015c).

Gracias al andamio se puede también muestrear la pared a diferentes niveles estratigráficos para llevar a cabo un estudio paleomagnético, así como realizar dataciones radiométricas en el espeleotema superior (Gibert *et al.*, 2015b). Los resultados permiten refinar la edad de la asociación fósil, situándola entre 850.000 y 900.000 años, coincidiendo con la primera gran caída del nivel del mar que tiene lugar en el Cuaternario, hecho que refuerza las hipótesis de una dispersión de fauna de África a Europa a través de Gibraltar.

Cueva Victoria ha sido un cubil de hienas (*Pachycrocuta brevirostris*) habitado durante largo tiempo que han dejado una importante acumulación de restos óseos, los cubiles de hienas en cavidades habitados durante largos periodos por estas, dejan una gran acumulación de huesos, recientes estudios en otros cubiles como el de la cueva Umm Jirsan (Arabia Saudí) pone de manifiesto una extensa acumulación de huesos de varios cientos de metros y una continuidad de habitáculo de varios miles de años (Stewart *et al.*, 2021).

En Cueva Victoria se han identificado más de 105 especies de vertebrados (Ferrández-Cañadell *et al.*, 2015 anexo) entre los que se encuentran, las hienas *Pachycrocuta*



Figura 6. Andamio instalado para las excavaciones paleontológicas que permite llegar a los investigadores los estratos originales del yacimiento.



Figura 7. Brecha de fósiles excavado insitu, grandes mamíferos (izq). Acumulación de fósiles de bloque desprendido del techo (der).

brevirostris, apareciendo numerosos restos, entre ellos dientes de leche y zonas de acumulaciones de coprolitos, destacan números mamíferos de gran tamaño *Mammuthus* cf. *meridionalis*, la presencia de varios tipos de caballos, *Equus altidens altidens*, *Equus suessenbornensis* una nueva especie de cérvido, *Megaloceros novocarthaginiensis*, distintos tipos de carnívoros, *Canis arnensis*, *Xenocyon (Lycaon) lycanoides*, una nueva especie de canido *Cuon Rossi* (Ferrández-Cañadell *et al.*, 2015; Pons *et al.*, 1978).

Cueva Victoria es el único yacimiento de Europa con presencia del cercopitécido africano *Theropithecus oswaldi* (Gibert *et al.*, 1995, 1999a,b; Ferrández *et al.*, 2014), lo que tiene relevancia para la interpretación de las rutas de dispersión de los mamíferos, incluidos los homínidos, durante el Pleistoceno inferior (Gibert *et al.*, 2015-c), situando el yacimiento de cueva Victoria como un lugar clave para el estudio de las migraciones del Norte de África, actualmente continua en proceso de excavación y estudio (figuras 6 y 7).

La presencia de *Homo* en Cueva Victoria se sustenta en una falange (Gibert *et al.*, 1984), como todos los fósiles de homínidos fueron cuestionadas en su momento, sin rigor



*Figura 8. Trabajos de acondicionamiento y seguridad en la mina Victoria (izq).  
Actuaciones de seguridad y acondicionamiento de galerías y techos en Victoria II (der).*

científico y finalmente ampliamente rebatidas y aceptadas académicamente (Ribot et al., 2015).

## **Proyecto turístico**

En 2008 el Ayuntamiento de Cartagena inicia un proyecto de acondicionamiento de Cueva Victoria para usos turísticos y científicos (Gibert *et al.*, 2013), se pretende musealizar parte de la cavidad-mina y a la vez potenciar los trabajos de investigación y excavación paleontológica, siendo un referente de la fauna del Pleistoceno.

Para ello se llevan a cabo varias iniciativas, por un lado, centralizar la colección de fósiles del Museo Arqueológico de Cartagena como centro de referencia e investigación de la fauna extraída del yacimiento de Cueva Victoria y lugar expositivo de las piezas originales.

Una acción en las localidades próximas a la cavidad, el Estrecho, El Beal y el Llano del Beal como lugares de integración con el yacimiento de Cueva Victoria, se realizan actividades con la población escolar para mostrar el yacimiento y se incluyen estas poblaciones en un plan juvenil de arte callejero (Berrocal *et al.*, 2018) con el argumento de la fauna de Cueva Victoria con una amplia repercusión en estas localidades.



*Figura 9. Zona de excavación y paso de visitantes (izq).  
Andamio de excavación paleontológica y pasarela visitantes (der).*

Por último, acondicionar cueva Victoria para que pueda ser visitable, musealizando parte de la cueva y mina como centro de interpretación de la fauna del Pleistoceno.

En la cueva inicialmente se instala un andamio en la zona del yacimiento para permitir a los paleontólogos llegar a la brecha original (figura 6), lo que da un cambio significativo a las excavaciones con resultados que son recogidos en la monografía de la revista Mastia 11- 12-13 de 2015.

El proyecto incluye un plan director que es redactado en el año 2018 (Laine *et al.*, 2018) y se realizan diversas actuaciones para la seguridad de la mina, malla en techos, contención de taludes, desvíos de aguas, etc (figura 8). Tras unos años sin actividad en 2020 se retoma le proyecto y se encarga a la empresa Tecminsa la redacción del proyecto y musealización.

El proyecto se realiza en base al acondicionamiento para las visitas de parte de la mina, zonas de la cueva y adecuar el yacimiento para compatibilizarlo con los trabajos de excavaciones paleontológicas y los visitantes (figura 9). Se recupera una antigua vivienda minera, situada encima de la cueva, para centro de recepción e interpretación.

El proyecto recreará el pleistoceno con reproducciones de paneles y maquetas en el interior de la cavidad para conocer la vida de la fauna que habitó el yacimiento (figura 7), destacando las hienas. Recorre espacios mineros, como una antigua galería minera de 150 m de recorrido simulando la iluminación de la época y los trabajos que allí se realizaban. El paso por galerías naturales permitirá conocer como fue la cueva original, y a través de los estudios de los espeleotemas, la evolución de clima en esta zona de Europa.

## **Conclusiones**

Cueva Victoria es una cavidad descubierta por lo mineros y que estuvo habitada por las hienas *Pachycrocuta brevirostris*, dejando una gran acumulación de huesos. El yacimiento se dio a conocer en el año 1970 (Valenzuela, 1970), realizándose posteriormente diferentes

intervenciones esporádicas lideradas por Juan Pons Moya en las que se recupera fauna fósil (Pons *et al.*, 1978). La identificación de una falange humana (Gibert *et al.*, 1984) propicia el inicio de un proyecto de investigación dirigido por el Dr. J. Gibert hasta el año 2007, tras su fallecimiento, dos colaboradores de J. Gibert (C. Ferràndez y L. Gibert) deciden actualizar todo el conocimiento disponible sobre la cavidad, continuando las excavaciones e investigaciones reuniendo un amplio equipo de investigadores. Así, se realiza una exposición sobre el yacimiento, "Cueva Victoria – Out of Africa", junto a la publicación de una monografía (Mastia, 2015 vol. 11-12-13) y varias publicaciones científicas en revistas internacionales. Destacan la identificación de más de 105 especies y algunos taxones como el *Theropithecus oswaldi* única referencia en Europa, situando a Cueva Victoria como un yacimiento clave para las migraciones de fauna y entre ella los homínidos del Norte de África por el Estrecho.

El elevado grado de conocimiento de este enclave y la posibilidad de musealizar el mismo, estableciendo una oferta de ocio y turismo en la zona han llevado al desarrollo del reciente borrador del Plan director de la cueva (Laine *et al.*, 2018). El contexto único de una amplia colección de fauna y la creación de un centro de referencia en el Museo Arqueológico de Cartagena para el estudio de la fauna original encontrada en cueva Victoria, el marco de las poblaciones cercanas a la cueva-mina y ligadas a la minería. El acondicionamiento y apertura al público de esta importante cavidad-mina y yacimiento paleontológico situará a esta zona como un lugar excepcional para el turismo y los investigadores.

Recientemente, la Cueva-Mina Victoria ha sido valorada patrimonialmente, en 2017 se cataloga como BIC dentro del entorno Monte Miral (BIC Monte Miral, 2017) y en 2019 ha sido valorada científicamente siguiendo la valoración científica de FOPALI, obteniendo un valor científico de 27 puntos sobre 40 indicativo de un valor Medio alto a Alto (Aberasturi *et al.*, 2019), reconocida como LIG- GEOSITE (Jordá, 2007).

## Referencias

- Aberasturi, A., Fierro, I., Navarro, J., Bueno, E., Romero, G., Ros, A. (2019). El valor científico de la Cueva-Mina Victoria (Cartagena, Murcia): un espacio donde el patrimonio natural y cultural se dan la mano. *I Simposio anual de Patrimonio Natural y Cultural ICOMOS*, España, Madrid.
- Berrocal, M.C., Ros, A. (2018). Street Art y Patrimonio. Campaña de divulgación del patrimonio paleontológico de Cueva Victoria a través del arte callejero en el paisaje urbano de la Diputación de El Beal (Cartagena). *I Congreso Arte, Naturaleza y Paisaje en el Mediterráneo*, Ojos (Murcia).
- BIC Monte Miral (2017). *Bien de interés cultural, con categoría de Sitio Histórico, a favor del Monte Miral o cabezo de San Ginés, en el término municipal de Cartagena*. BORM: 38, 16 febrero 2017.
- Budsky, A., Scholz, D., Gibert, L., Mertz-Kraus, R. (2015). 230Th/U-dating of the Cueva Victoria flowstone sequence: Preliminary results and palaeoclimatic implications. *Revista Mastia*, 11-12-13, 101-109. Cartagena.
- Carbonell, E., Estévez, J., Moya-Solas, S., Pons-Moyà, J., Agustí J., Villalta F. (1981). Cueva Victoria (Murcia, España): lugar de ocupación humana más antiguo de la Península Ibérica. *Endins*, 8, 47-57.
- Ferràndez-Cañadell, C., Ribot, F., Gibert L. (2014). New fossil teeth of *Theropithecus oswaldi* (Cercopithecoidea) from the Early Pleistocene at Cueva Victoria (SE Spain). *Journal of Human Evolution*, 74, 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2014.02.020>.
- Ferràndez-Cañadell, C., Gibert, L. (2015). Introducción. Cueva Victoria, un yacimiento de vertebrados del Pleistoceno inferior. *Revista Mastia*, 11-12-13, 17-45. Cartagena.
- Gibert, J., y Pons-Moyà, J. (1984). Estudio morfológico de la falange del género *Homo* de Cueva Victoria (Cartagena, Murcia). *Paleontología i Evolucio*, 18, 49-55.

- Gibert, J., Leakey, M., Ribot, F., Gibert, L., Arribas, A., Martínez B. (1995). Presence of the Cercopithecoid genus *Theropithecus* in Cueva Victoria (Murcia, Spain). *Journal of Human Evolution*, 28, 487-493. <https://doi.org/10.1006/jhev.1995.1036>.
- Gibert, J., Palmqvist, P., Ribot F., Santamaría, J.L. (1999a). Presencia de *Theropithecus* y *Homo* sp. en el Pleistoceno inferior de Cueva Victoria. *Memorias de Arqueología Región de Murcia*, 8, 12-23.
- Gibert, J., Campillo, D., Eisenmann, V., García Olivares, E., Malgosa, A., Roe, D.A., Walker, M.J., Borja, C., Sánchez, F., Ribot, F., Gibert, L., Albadalejo, S., Iglesias, A., Ferrández, C., Maestro, E. (1999b). Spanish late Pliocene and early Pleistocene hominid, paleolithic and faunal finds from Orce (Granada) and Cueva Victoria (Murcia). *Human Evolution*, 14, 29-46. <https://doi.org/10.1007/BF02436195>.
- Gibert, L., López, J., Mármol, A., Ros, A., (2013). Cueva Victoria. Proyecto de recuperación del entorno minero, espeleológico y paleontológico. *XIV Congreso sobre Patrimonio Geológico y Minero*. Castrillón (Asturias).
- Gibert, L. Ferrández-Cañadell, eds. (2015a). Geología y Paleontología de Cueva Victoria. *Revista Mastia*, 11-12-13. Cartagena.
- Gibert, L., Scott, G. (2015b). Edad del yacimiento de Cueva Victoria y su relación con otros yacimientos de la Península Ibérica. *Revista Mastia*, 11-12-13. Cartagena.
- Gibert, L., Scott, G., Scholz, D., Budsky, A., Ferrández, C., Ribot, F., Martín, R., Lería, M. (2015c). Chronology for the Cueva Victoria fossil site (SE Spain): Evidence for Early Pleistocene Afro-Iberian dispersals. *Journal of Human Evolution*, 90, 183-197.
- Jordá Pardo, J.F. (2007). BE004 Cueva Victoria. LIG.
- Laine, G., Gómez, B., Jordá, R. (2018). Plan director Cueva Victoria, Ayuntamiento de Cartagena. (Inédito).
- Manteca, J.I., Piña, R. (2015). Las mineralizaciones ferro-manganesíferas de la mina-cueva Victoria y su contexto geológico. *Revista Mastia*, 11-12-13, 59-74. Cartagena.
- Pérez-Adán, L.M. (2021). Los verdaderos descubridores de Cueva Victoria, El Estrecho Cartagena. *Publicaciones digitales CENM-Naturaleza*, [www.cenm.es](http://www.cenm.es).
- Pérez de Perceval, M.A., Manteca, J.I., López-Morell, M.A. (2015). Historia de la minería de Cueva Victoria. *Revista Mastia*, 11-12-13, 47-58. Cartagena.
- Pons, J., Moyá, S. (1978) La fauna de carnívoros del Pleistoceno medio (Mindel) de la cueva Victoria (Cartagena, España). *Acta Geológica Hispánica*, XIII: 54-58.
- Ribot F., Ferrández-Cañadell, C., Gibert, L. (2015). Los primates de Cueva Victoria. *Revista Mastia*, 11-12-13, 433-452. Cartagena.
- Ros A., Llamusí, J.L. (2015). Reconstrucción y génesis del karst de Cueva Victoria. *Revista Mastia*, 11-12-13, 111-126. Cartagena.
- Stewart, M., Andrieux, E., Clark-Wilson, R., Vanwezer, N., Blinkhorn, J., Armitage, S., Omari al, A., Zahrani, B., Alqahtani, M., Al-Shanti, M., Zalmout, I., Al-Mufsarreh, Y., Asharekh, A., Boivin, N., Petreaglia, M., Groot, H. (2021). Taphonomy of an excavated striped hyena (*Hyaena hyaena*) den in Arabia: implications for paleoecology and prehistory. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 13, 139. <https://doi.org/10.1007/s12520-021-01365-6>.
- Valenzuela, A. (1970). Un kart fósil y depósitos minerales de origen kárstico el sureste de la zona Bética. *I Congreso Nacional de Espeleología*, 61-77. Barcelona.
- Villasante, F. (1912). Criaderos de hierro en España. Tomo I Criaderos de la provincia de Murcia. *Memorias del Instituto Geológico*, Madrid.



# **Documentación geométrica tridimensional mediante métodos avanzados en cavidades complejas: el caso de la Cueva de las Estegamitas (La Araña, Málaga)**

Miguel Ángel RUIZ TEJADA <sup>(1)</sup>, Marta CRIADO VALDÉS <sup>(1)</sup>,  
Juan José DURÁN VALSERO <sup>(2)</sup>, Sergio Raúl DURÁN LAFORET <sup>(3)</sup>,  
Raquel MORALES GARCÍA <sup>(2)</sup>, Eulogio PARDO IGÚZQUIZA <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> eGeoMapping, Calle Arrastaria, 21. 28022, Madrid maruiz@egeomapping.com mcriado@egeomapping.com

<sup>(2)</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Calle Ríos Rosas, 23. 28003, Madrid  
jj.duran@igme.es r.morales@igme.es e.pardo@igme.es

<sup>(3)</sup> Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEIHUMA), Calle Arquitecto Francisco Peñalosa, 18. 29020, Málaga seduran@uma.es

---

## **Resumen**

Para la captura de datos tridimensionales en entornos naturales subterráneos complejos, como es el caso de una cueva hipogénica de morfología laberíntica, la aplicación de las nuevas tecnologías en fotogrametría y LiDAR terrestre para la captura masiva de datos es uno de los métodos más idóneos, tanto para la investigación como para la gestión y divulgación del patrimonio, en este caso de carácter geológico. En este trabajo se presentan los resultados de la actuación llevada a cabo en dos fases del registro, tratamiento de datos y difusión de la Cueva de las Estegamitas, descubierta recientemente en el interior de una cantera de caliza en la localidad de La Araña, Málaga. La experiencia derivada de los trabajos llevados a cabo en su interior, para la captura de datos nos han servido para proponer una metodología de trabajo para este tipo de entornos, mediante el uso de diferentes tipos de sensores. Los resultados no sólo serán aprovechables para la investigación y gestión, sino también para la confección de productos dirigidos a la conservación de cuevas, tanto las no habilitadas como las turísticas, y a la divulgación de sus valores geológicos mediante plataformas y soportes digitales.

**Palabras clave:** fotogrametría, láser escáner, modelos 3D, sistemas de información, topografía

## ***Three-dimensional geometric documentation by advanced methods in complex caves: the case of the Cueva de las Estegamitas (La Araña, Málaga)***

### **Abstract**

*For the three-dimensional data capture in complex natural underground environments, as is the case of a maze-like cave with hypogenic morphologies, the application of new*

*technologies in photogrammetry and terrestrial LiDAR for the massive data capture are the most ideal methods, both for scientific research and scientific divulgation of the geologic heritage. The results of the activities carried out during two phases of data capture and discussion of the information in the Stegamites Cave (Cueva de las Estegamitas), recently discovered in a limestone quarry in La Araña (Málaga, Spain), are presented in this work. The experience following the activities carried out inside the cave for the data capture, have been useful for the proposal of a new methodology for these types of environments, using different sensors. The results are usable as tools for research and management, as well as usable for the development of produces towards cave conservation, both for show caves and other caves, and the scientific divulgation of their geological values using platforms and digital media.*

**Keywords:** 3D models, information systems, laser scanner, photogrammetry, topography

## Introducción

La caracterización espacial de la Cueva de las Estegamitas (La Araña, Málaga) ha sido una de las piezas clave del trabajo de investigación multidisciplinar llevado a cabo durante tres meses del año 2022. Para ello, y debido a la necesidad de disponer de diversas bases topográficas de manera rápida para el desarrollo de las actividades científicas, se han llevado a cabo diferentes técnicas para el levantamiento topográfico de la cavidad, obteniendo diferentes productos finales.

En este trabajo se presentan los resultados de dos fases de trabajo mediante tecnologías de última generación aplicadas a la obtención de modelos 3D del ámbito subterráneo natural: láser escáner 3D y cámara fotogramétrica.



Figura 1. Localización de la Cueva de las Estegamitas en la provincia de Málaga.

## Localización

La cueva de las Estegamitas se encuentra en el barrio de La Araña, en el extremo oriental del término municipal de Málaga (figura 1). Se emplaza en un macizo rocoso carbonático denominado el Cantal Chico, una zona con un gran desarrollo de karstificación, tradicionalmente conocida por presentar abundantes cavidades.

Los materiales carbonáticos en los que se abre la cavidad corresponden al complejo Málagaide de la Cordillera Bética y son de edad Jurásica, con removilizaciones olistotrómicas terciarias. En el entorno de la cavidad se alternan facies masivas y brechificadas, con abundantes mineralizaciones de pirolusita (óxidos de manganeso).

El origen de la cavidad es hipogénico; la disolución estuvo ligada a la posición de la interfase entre el agua dulce continental y el agua salada de origen marino, en una época con el nivel del mar en una posición más elevada que la actual. Es una cavidad de tipo flank margin cave, caracterizada por presentar un trazado laberíntico con abundantes galerías entrecruzadas, que dificultan de manera notable el trabajo de levantamiento topográfico de la cavidad al presentar una geometría muy complicada.

## Documentación geométrica mediante topografía tradicional

El levantamiento topográfico de la cavidad fue llevado a cabo por los espeleólogos del Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga (GES de la SEM), quienes realizaron a su vez dos grupos de trabajo distintos. Uno de los grupos de trabajo se ha dedicado a la elaboración de topografía mediante métodos tradicionales, clinómetro y distanciómetro, acompañado de abundantes fotografías para el tratamiento de datos en gabinete donde se han incorporado a un entorno SIG para su salida gráfica. Además, un segundo equipo de trabajo, con la finalidad de avanzar más rápidamente en la toma de medidas del desarrollo y de los volúmenes de la cavidad, ha empleado software topográfico (Topodroid) mediante técnicas 3D para obtener un modelo tridimensional sencillo de la cavidad (figura 2).



Figura 2. Modelo tridimensional aproximado de la Cueva de las Estegamitas.

Ambos métodos de trabajo son habituales en los estudios espeleológicos y en la exploración de cavidades; sin embargo, en esta cavidad se han realizado, además, de manera complementaria, trabajos de documentación geométrica mediante técnicas pioneras, que se desarrollan en profundidad a continuación.

## **Documentación geométrica con láser escáner 3D (TLS) y fotogrametría**

Para la captura de datos tridimensionales en entornos complicados como una cueva, la aplicación de las nuevas Geotecnologías en Fotogrametría y LiDAR terrestre para la captura masiva de datos se describen como unos de los métodos más idóneos, tanto para la investigación como para la gestión del patrimonio, en este caso geológico. El rápido avance de estas tecnologías en los últimos años ha propiciado el desarrollo de nuevos equipos TLS y fotogramétricos, con mayor alcance y más elevada capacidad de captura masiva de datos, lo que ha empujado al campo informático a crear nuevos softwares capaces de procesar este volumen ingente de información espacial cada vez más rápidamente.

Los láser escáneres 3D son sistemas activos de detección remota que permiten mediciones de alta resolución de coordenadas de puntos en superficies dependiendo de la distancia entre la superficie mapeada y el instrumento, lo que da como resultado una gran cantidad de puntos 3D que representan las superficies. Los grandes conjuntos de datos capturados por TLS se denominan «nubes de puntos», y contienen siempre las coordenadas XYZ de cada punto y también un valor de intensidad (i) del rayo láser reflejado. También es posible colorear los puntos para una mayor representación asignando los tres valores RGB como atributos adicionales.

La fotogrametría es la técnica que permite convertir imágenes en 2D en modelos 3D con la capacidad de reflejar las características geométricas del objeto fotografiado. Uno de sus resultados finales obtenidos es un modelo 3D con una textura fotorrealista y una geometría idéntica al modelo original, lo que denominaremos en adelante «gemelo digital». Los modelos tridimensionales obtenidos mediante esta técnica tienen grandes ventajas con respecto a las formas tradicionales de representación, tanto en el ámbito científico como en el de la difusión.

Muchas de las limitaciones y problemas que se presentan en la realización de la topografía de una cueva por los métodos tradicionales se pueden abordar mediante el uso de TLS y fotogrametría y agilizar los trabajos a la hora de elaborar dibujos espeleo-geológicos de manera manual delante del objeto original.

## **Proceso de registro de datos**

En el intento de hacer una correcta medición, captura y restitución tridimensional de los elementos reales de la cueva, se planteó el uso de dos metodologías no invasivas diferentes,

aunque complementarias, con la intención de conseguir un equilibrio entre lo visual y la precisión del dato geométrico, intentando suplir los inconvenientes o potenciar las ventajas que cada una de ellas tiene sobre la otra.

El empleo de la fotogrametría y el láser escáner permite obtener gemelos digitales muy precisos y de una alta vistosidad gracias a imágenes de alta resolución. Estas dos técnicas se emplearon durante la misma jornada de trabajo, de forma simultánea, debido a las condiciones de acceso en tiempo y forma existentes en el día de la toma de datos.

La cámara fotogramétrica tiene tiempos de escaneado muy inferiores a los tiempos del láser escáner (20 segundos frente a 9 minutos en las mismas condiciones de toma). Además, las imágenes que obtiene tienen mayor resolución que las obtenidas con el láser, muy importante para el resultado final del recorrido virtual que se quiere hacer. Aunque la precisión geométrica obtenida con la cámara es muy buena para el entorno de una cueva, no cabe duda de que la precisión y resolución geométrica obtenida con el láser escáner es muy superior. Como ejemplo, la nube de puntos obtenida de la Sala de Día con la cámara es de unos 8 millones de puntos mientras que la nube de puntos obtenida con el láser escáner es de 65 millones de puntos. A nivel de transporte y peso en las condiciones de trabajo de una cueva son muy similares. Un problema de la cámara frente al láser es la distancia entre los estacionamientos, con la cámara debe ser inferior a los 4 metros debido a las características ópticas del montaje de sus cámaras internas, además de influir notablemente las condiciones de iluminación en el propio entorno de trabajo.



*Figura 3. Trabajos con cámara fotogramétrica*



*Figura 4. Estacionamientos realizados durante la toma de datos con la cámara Matterport.*

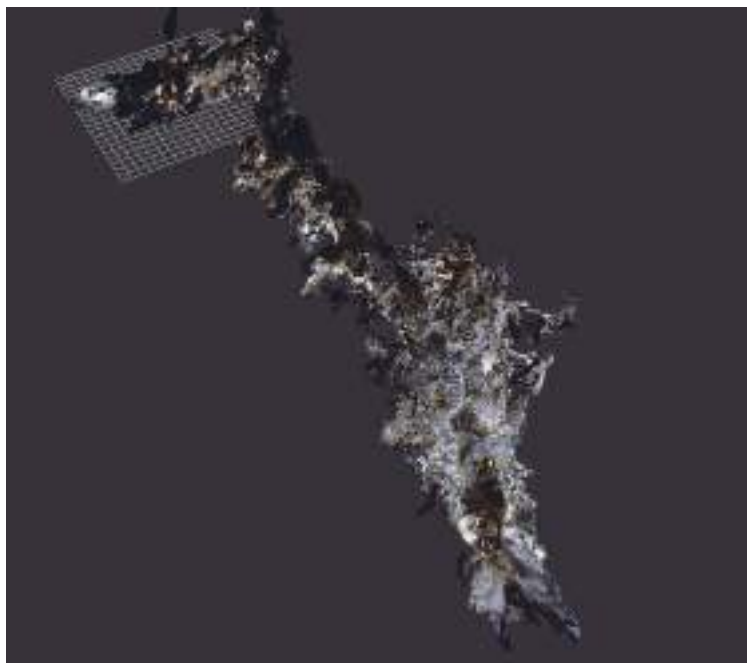
## **Generación tridimensional empleando cámara fotogramétrica**

La cámara fotogramétrica empleada ha sido la Matterport Pro2, capaz de escanear y generar un modelo 3D en pocos minutos y obteniendo imágenes panorámicas 360º de alta resolución de 134 MP por fotograma. Esta cámara es idónea para compartir, promocionar, inspeccionar o analizar un espacio real en un entorno visual 3D mediante un gemelo digital exacto mediante archivos 3D con formato OBJ y/o ficheros de nube de puntos XYZRGB, con una precisión dimensional estimada del 99%.

La experiencia previa en el uso de esta cámara había sido en entornos más sencillos, con suelos estables, iluminación más homogénea, y con la posibilidad de girar el operador alrededor de la cámara durante el proceso de escaneado. En esta ocasión se ha trabajado en un entorno desconocido, sin iluminación, con suelo inestable en algunos tramos y sin la posibilidad de girar alrededor de la cámara o con la complicación de no poder ocultarse tras una pared.

Con este equipo se ha escaneado hasta ahora, desde la entrada de la cueva hasta la denominada Sala de Día, en total unos 250 metros. Para capturar los datos geométricos de este tramo se realizaron 32 estacionamientos a lo largo del recorrido natural de la cavidad. En cada estacionamiento se colocaron los puntos de luz que permitían obtener una iluminación homogénea en todo el recorrido, punto muy importante para la correlación de imágenes que debe realizar la cámara. Los escaneados se fueron controlando en tiempo real mediante la aplicación integrada en una tablet.

Una vez que capturados todos los datos se procesaron mediante el uso de algoritmos de postprocesado implementados por propio fabricante, obteniéndose el gemelo digital inmersivo 3D de la cueva. Las imágenes, previa a su incorporación al visor, son equilibradas radiométricamente con correcciones de contraste y brillo.



*Figura 5. Nube de puntos obtenida con cámara fotogramétrica.*



*Figura 6. Recorrido virtual realizado con Matterport. El recorrido virtual se puede ver en el enlace:  
<https://my.matterport.com/show/?m=mMq6BUxomEf>.*



*Figura 7. Trabajos con láser escáner BLK360 de Leica.*

Con el uso de esta cámara se obtienen dos productos derivados, el recorrido virtual de la cueva y una nube de puntos en varios formatos de intercambio. Previo a su difusión, se pueden realizar procesos de edición para indicar el inicio del recorrido o incluir geotags con información adicional textual, gráfica o sonora que permita ampliar la información visual.

## **Generación tridimensional empleando láser escáner 3D**

El escáner láser terrestre (TLS) es un instrumento que se emplea para capturar la geometría y color de cualquier objeto o entorno cercano a partir del almacenamiento masivo de datos. Estos datos, en forma de nube de puntos, se obtienen a través de la medición de distancias y ángulos mediante un rayo de luz láser, que se combina con cámaras fotográficas, para registrar también la información del rango visible. Los datos se utilizarán posteriormente para formar un modelo tridimensional del objeto. Es decir, que con la tecnología del escáner láser se puede transformar un objeto real en uno virtual, y manipular éste a través de un software especializado. Como resultado final se obtiene una nube de puntos 3D compuesta por cientos de miles de mediciones individuales en un sistema de coordenadas XYZ que en sí mismas componen un modelo tridimensional de los objetos registrados.

Para el escaneado de la cueva se utilizó el láser BLK360 de Leica por ser el más pequeño y ligero de su clase y por su facilidad de uso, características muy importantes para trabajar en un entorno como esta cueva. Este equipo, de momento, es el único que admite la



plataforma de Matterport con su cámara modelo MC, por lo que cámara y láser pueden trabajar conjuntamente de forma no simultánea en la captura de la cavidad.

El registro de datos se realiza a través de una tablet mediante la aplicación Leica Cyclone Register (BLK Edition), que los recibe mediante el puerto bluetooth desde el escáner en tiempo real, realizando una alineación preliminar de la nube de puntos.

En este caso se realizaron 16 escaneados en modo de alta resolución, con un tiempo de procesado entorno a los 9 minutos por estacionamiento, llegando a obtener una nube de 65 millones de densidad de puntos (resolución de alta densidad). La cantidad de posiciones de escaneo requiere una planificación adecuada para evitar puntos ciegos y capturar completamente la compleja morfología de la cueva. Aunque se realice una planificación previa de los puntos de estacionamiento casi siempre es necesario efectuar una replanificación en el momento de la toma de datos.

Una vez recogida la información geométrica tridimensional de la cueva con la nube de puntos, se lleva a cabo el proceso de unión de todos los datos recogidos en cada estacionamiento del escáner con el fin de que se encuentren en el mismo sistema de referencia. El resultado final de este proceso es una única nube de puntos con organización desestructurada. Para realizar este proceso informático se empleó el software MDTopX de Digi21.

Hay que tener en cuenta que la nube de puntos de la Sala de Día está compuesta por 65 millones de puntos (cada 40 millones de puntos se convierten en 1 Gb de información), lo que imposibilitaría cargar la información de toda la geometría de la cueva de una forma completa en cualquier dispositivo informático. Por tanto, el proceso siguiente consiste en realizar un tratamiento de filtrado, segmentación y visualización.

El proceso de filtrado permite eliminar información duplicada que se genera como consecuencia de las zonas de solape entre las nubes de puntos recogidas en cada estacionamiento. Asimismo, permite eliminar aquellos puntos resultado de un error grosero u «outlier» en el momento de registro, como pueden ser puntos aislados en el aire u objetos que producen «ruido» en la imagen.

Por último, el proceso de visualización conlleva una tarea primordial que consiste en la organización de la nube de puntos que, como se ha comentado, está desestructurada.

Esta organización permitirá al software poder visualizar en tiempo real la nube de puntos completa, puesto que tiene información de qué puntos son relevantes para la visualización de una determinada escena. Como la nube de puntos está tridimensionalmente distribuida, el proceso conlleva una división en «octrees» o cubos tridimensionales de profundidad variada. Asimismo, se realiza una organización piramidal, para seleccionar la densidad de puntos a visualizar en función de la posición de la cámara o del usuario respecto del escenario que se visualiza. Dicho de otro modo, cuando se enfoca la cámara hacia un determinado punto, se realiza un proceso piramidal de visualización en función



*Figura 8. Malla de triángulos de la Sala de Día.*

de la distancia al objeto. Según nos acercamos al objeto la densidad aumenta y se muestra un mayor número de detalles.

Este proceso se realiza a gran velocidad y permite visualizar la nube de puntos tanto en ordenadores con potentes tarjetas gráficas como en dispositivos más ligeros como móviles o cascos de realidad virtual, cuya memoria y tarjetas gráficas son muy inferiores a las equipadas en ordenadores de sobremesa.

Sin embargo, no hay que olvidar que se está visualizando una nube de puntos, por lo que no hay unión ni continuidad de estos, ni generación de superficies. Para que esto se produzca, se precisa de un proceso de relación de los puntos en función de su cercanía. El resultado es un conjunto de triángulos (figura 8) en el espacio cuyos vértices son



*Figura 9. Modelado de la malla de triángulos de la Sala de Día.*



*Figura 10. Texturizado de la malla de triángulos de la Sala de Día.*

puntos registrados cercanos en el espacio. Esta triangulación es el resultado de diversos algoritmos de búsqueda de relaciones de vecindad basados en triángulos, por ser la superficie matemática más sencilla y adaptable a la distribución irregular de los puntos. Los algoritmos de triangulación están muy extendidos cuando se dispone de una nube de puntos distribuida bidimensionalmente, utilizando, en su mayoría, la triangulación de Delaunay. Sin embargo, en tres dimensiones, no es habitual encontrarlo, debido a la dificultad en la generación de las relaciones, basadas en tetraedros. Sin embargo, aprovechando la división de la nube en «octrees», hemos realizado la triangulación tridimensional de la nube de puntos, optimizando el proceso y generando las relaciones basadas en triángulos en cada uno de estos «octrees».

Con ello, se consigue una relación más real de la nube de puntos, puesto que no se visualiza sólo la nube de puntos, si no la superficie que generan como un conjunto de triángulos, lo cual permite realizar ocultaciones de puntos que se encuentran detrás.

Por último, se ha realizado el modelado (figura 9) y texturizado (figura 10) de la malla de triángulos utilizando las fotografías capturadas por las cámaras de los equipos empleados en el interior de la cueva, obteniendo así un modelo 3D muy fotorrealista de la cueva.

## **Difusión de los datos**

Para poder exponer los trabajos realizados y mostrar los resultados obtenidos en cada una de las fases llevadas a cabo en el estudio de la cueva de las Estegamitas se está creando un geoportal.

Este geoportal con acceso libre a través de internet incluirá toda la documentación generada durante el desarrollo de las investigaciones, ofreciendo una herramienta

dinámica para la difusión de los resultados obtenidos, integrando información topográfica, espeleológica y geológica, enfocado tanto para un público especializado como para el público general, ofreciendo información científica y divulgativa.

## Conclusiones

Tras los trabajos topográficos y fotogramétricos 3D llevados a cabo en la Cueva de las Estegamitas y el análisis de los resultados se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1) Los equipos fotogramétricos permiten la creación de modelos virtuales mediante imágenes panorámicas esféricas de 360º, donde se es capaz de captar la atención tanto del observador profesional como del público no especializado. La capacidad de interactuar con él, difundirlo mediante un simple enlace web, verlo mediante gafas de realidad virtual tipo Oculus Quest 2 VR y poder realizar medidas muy simples como las de distancias y superficies, hacen de la cámara fotogramétrica una de las mejores herramientas de difusión. El poder de la imagen en nuestro mundo digital es indudable e imbatible. Todo esto hace de las técnicas fotogramétricas las más atractivas para el entendimiento del patrimonio.

2) Las nubes de puntos generadas tanto con la cámara fotogramétrica como con el láser escáner 3D de la cavidad, servirán como herramienta para futuras investigaciones permitiendo la visualización y medición, por ejemplo, de los distintos espeleotemas existentes en la cueva.

3) Los modelos texturizados se muestran como los más idóneos para obtener una figuración más entendible de lo que se quiere mostrar, y otorgan un valor añadido al modelo formado por los puntos de la nube de puntos.

4) La combinación de ambas técnicas posibilita, además del registro digital, la conservación del patrimonio, y permite obtener a posteriori productos derivados tales como modelos tridimensionales texturizados totalmente idénticos al original, modelos 3D imprimibles, etc.

5) El potencial del láser escáner es altísimo, ya que permite obtener las coordenadas geográficas de todas las superficies que rodean el instrumento en un radio limitado y de muchísimo mayor alcance, en cuestión de minutos, y sin necesidad de contacto alguno con los elementos medidos. Su desventaja frente a la cámara fotográfica es la peor calidad de imagen registrada en las diferentes tomas.

6) Con los últimos avances tecnológicos disponibles hoy en el mercado es muy difícil encontrar el equipo idóneo que valga en todas las circunstancias y en todos los casos prácticos que pueden surgir. Por este motivo, muchas veces para obtener resultados óptimos se emplean varios equipos que suplementan las deficiencias del otro. El potencial de la cámara fotogramétrica es su calidad de imagen y una baja resolución de puntos, mientras que el láser escáner tiene una alta capacidad de recoger puntos y una baja calidad de imagen.

7) La utilización de cámara fotogramétrica y TLS para el mapeo (cartografiado) de cuevas es la mejor tecnología para realizar una topografía completa, pero supone un desafío debido a las condiciones ambientales y espaciales existentes en una cueva, aunque su inconveniente es que estos equipos deben estar correctamente estacionados sobre un trípode, y no siempre es fácil de conseguir.

8) Otro problema importante es la necesidad de iluminar correctamente la escena de la toma. Tanto la cámara fotogramétrica como el LTS necesitan de esta iluminación para poder realizar alineaciones previas y recoger la textura del objeto.

9) Mediante el empleo de un geoportal, se facilita tanto al personal técnico destinado al estudio de la cueva como al personal no especializado, no depender de software específico destinado a la visualización de la información. En el caso del geoportal, simplemente se puede consultar con una dirección web. Dentro de este geoportal, existirán enlaces específicos al recorrido virtual, donde son los propios servidores de Matterport quienes facilitan el acceso al mismo mediante su consulta en cualquier dispositivo tipo PC o móvil, universalizando y difundiendo el patrimonio geológico.

## Referencias

- Berenguer-Sempere, F., Gómez-Lende, M., Seranno, E., de Sanjosé-Blasco J.J. (2014). Orthothermographies and 3D modeling as potential tools in ice caves studies: the Peña Castil Ice Cave (Picos de Europa, Northern Spain). *International Journal of Speleology*, 43: 35-43.
- Cosso, T., Ferrando, I. Orlando, A. (2014). Surveying and mapping a cave using 3d laser scanner: The open challenge with free and open source software. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5: ISPRS Technical Commission V Symposium, Riva del Garda: 181-186.
- González-Aguilera, D., Muñoz, A.L., Lahoz, J.G., Herrero, J.S., Corchon, M.S., García E. (2009). Recording and modeling Paleolithic caves through laser scanning. In: *International Conference on Advanced Geographic Information Systems & Web Services*, Cancun, 19-26.
- Lerma, J.L., Navarro, S., Cabrelles, M., Villaverde, V. (2009). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37 (3): 499-507.
- Silvestre, I., Rodrigues, J.I., Figueiredo M., Veiga-Pires, C. (2015). High-resolution digital 3D models of Algar de Penico Chamber: limitations, challenges, and potential. *International Journal of Speleology*, 44 (1): 25-35.



## **Cueva del Puerto, Calasparra (Murcia) una cavidad hipogénica. Espeleogénesis y morfologías del recorrido turístico**

José Ángel SOLANILLA RODRIGO <sup>(1)</sup>, Francisco Javier FERNÁNDEZ AMO <sup>(1)</sup>,  
Andrés ROS VIVANCOS <sup>(1)</sup>, José Luis LLAMUSÍ LATORRE <sup>(1)</sup>, Juan OLMO <sup>(1)</sup>,  
Lola GUIRAO FERNÁNDEZ <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Tecminsa-Qalat, Cueva del Puerto, Paraje Cueva del Puerto s/n 30420 Calasparra, Murcia.  
joseangel@tecmineras.com, francis@tecmineras.com, andresros@hotmail.com, jl.llamusi@gmail.com,  
info@cuevadelpuerto.es, lolagqalat@gmail.com

---

### **Resumen**

La cueva del Puerto, situada en la Sierra del Puerto municipio de Calasparra, descubierta en 1966, es una de las cavidades de mayor desarrollo de la región de Murcia 4.720m. Cavidad de origen hipogénico-hidrotermal se caracteriza por un entramado de galerías y pisos que descienden hasta 100m, una gran variedad de morfologías hipogénicas cubre paredes y techos, muestra de una intensa espeleogénesis de origen hidrotermal, que ha ido erosionando y modelando la cavidad.

En 1995 es acondicionada y abierta al público, en el año 2014 se realiza un segundo acondicionamiento con la apertura de una segunda entrada, creando un recorrido visitable de 700m. En 2022 se reabre de nuevo con nueva gestión por las empresas Tecminsa-Qalat, remodelando el recorrido visitable resaltando la singularidad hipogénica de la cavidad y ampliando los servicios para las visitas a todos los públicos, visitas deportivas especializadas y proyectos de estudio e investigación.

Cueva del Puerto es la única cavidad acondicionada para todos los públicos en la Región de Murcia, constituye uno de los recorridos más notables y visitables de cuevas hipogénicas de Europa, su visita constituye todo un descubrimiento de la espeleogénesis y morfologías en cavidades hipogénicas-hidrotermales.

**Palabras clave:** cueva hidrotermal, cueva turística, recorrido hipogénico, visitas deportivas.

## ***Cueva del Puerto, Calasparra (Murcia) a hypogenic cave. Speleogenesis and morphologies of the tourist route***

### **Abstract**

*The cueva del Puerto located in the Sierra del Puerto municipality of Calasparra, discovered in 1966, is one of the longest cavities in the region of Murcia 4.720 m. Cavity of hypogenic-hydrothermal origin is characterized by a network of galleries and floors that descend up to 100m, a great variety of hypogenic morphologies cover walls and*

*ceilings, a sign of intense speleogenesis of hydrothermal origin, which has been eroding and modelling the cavity.*

*In 1995 it was conditioned and opened to the public, in 2014 a second conditioning was carried out with the opening of a second entrance, creating a visitable route of 700 m. In 2022 it reopens again with new management by the Tecminsa-Qalat companies, remodelling the visitable route, highlighting the hypogenic singularity of the cavity and expanding the services for visits to all audiences, specialized sports visits and study and research projects.*

*Cueva del Puerto is the only cavity conditioned for all audiences in the Region of Murcia, it constitutes one of the most notable and visitable routes of hypogenic caves in Europe, its visit constitutes a complete discovery of speleogenesis and morphologies in hypogenic-hydrothermal cavities.*

**Keywords:** *hydrothermal cave, hypogenic cave trail, show cave, speleo adventure.*

## Introducción

La Cueva del Puerto es una cavidad natural de origen hidrotermal que se encuentra situada en el noroeste de la Región de Murcia, concretamente en la ladera del Monte Chatres, que forma parte de la alineación montañosa de la Sierra del Puerto-Cabeza del Asno, a 9 km de Calasparra. Se accede por la carretera RM-714 (Venta del Olivo a Calasparra) y a la altura de la Venta Reales (km 36). Una parte de esta se encuentra habilitada para las visitas turísticas.

Fue descubierta por un labrador en 1966, iniciando su exploración el grupo GECA de Cieza (G.E.C.A., 1968, 1970). En 1977 el CEX de Alicante realiza una topografía de 4.720m (Puch, 1987) y un desnivel de -100m, diversos grupos la exploran durante estos años, en el año 1996 el club Cuatro Picos (C.4.P., 1996) publica un nuevo plano con un recorrido menor, en 2021 un equipo de exploradores e investigadores publican una amplia monografía de Cueva del Puerto (Ros *et al.*, 2021).

Las evidencias de su origen hipogénico-hidrotermal se empiezan a publicar en diversos estudios a partir de 2014 la publicación sobre cuevas hipogénicas en la Región de Murcia constata su origen hidrotermal (Ros *et al.*, 2014a y b). Posteriores trabajos confirman y detallan estas características (Gázquez *et al.*, 2016), (Ros *et al.*, 2016a y b, 2018).

- 1995 se habilita una parte, practicando una nueva entrada, y se abre al público.
- 2014 se abre una nueva entrada, realizando un túnel (Espín de Gea *et al.*, 2018) y se amplía su recorrido visitable.
- 2022 después de un tiempo cerrada se reabre de nuevo al público por la empresa Tecminsa-Qalat, que reacondiciona el recorrido y resalta su carácter hidrotermal-hipogénico.



## Un recorrido turístico hipogénico-hidrotermal

La cueva del Puerto es una cavidad de desarrollo laberíntico de 4.722 m conocidos, formada por un entramado de galerías que desciende hasta los 100 m de profundidad. De este desarrollo 700 m se corresponde con la zona superior de la cavidad y se encuentran habilitados para las visitas.

La dirección de las galerías es principalmente Este-Oeste. Destacan dos líneas principales de fracturas; por un lado, el recorrido turístico de Este a Oeste siguiendo una línea de fracturas y una gran fractura en la zona inferior (La Gran Diaclasa) de dirección Este Oeste (figura 1).

La cueva desciende a través de grandes conductos desde la entrada superior turística hasta la Gran Diaclasa por una galería de amplias dimensiones, sala de la Medusa (figura 2-D), sala de las Manos hasta la Gran diaclasa a modo de *feeder* ascendente (figura 2). Las



Figura 1. Topografía planta Cueva del Puerto, resaltado el recorrido turístico. (Original del CEX Alicante 1977, revisión digitalización 2022).

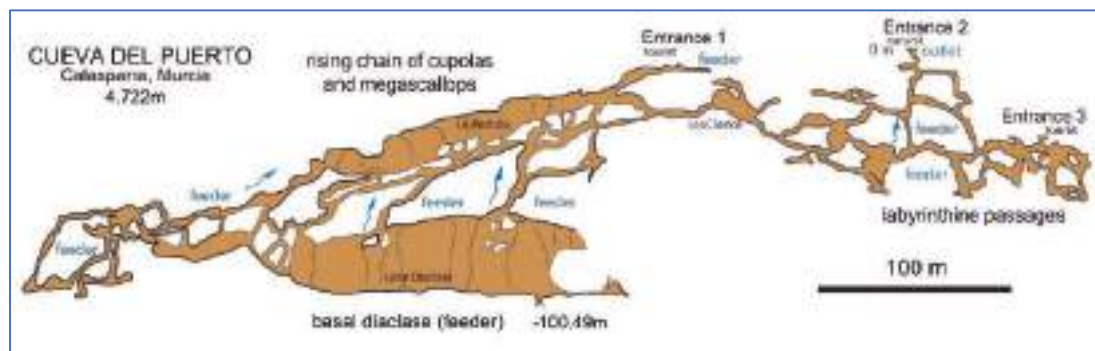


Figura 2. Sección Cueva del Puerto, se indican los conductos ascendentes feeders principales.



Figura 3. Cueva del Puerto, recorrido habilitado para las visitas turísticas. (Original de A. Alcalá, G40 y GE Resaltes).

galerías inferiores en la zona oeste de la cavidad se conectan con la superior por diversos conductos ascendentes (*feeders*), descritos por (Ros et al., 2021, 2018 b; Gázquez et al., 2017).

La cueva se caracteriza por una destacada espeleogénesis y morfologías de origen hipogénico-hidrotermal; canales, toberas, *feeders*, conductos ciegos, cúpulas de diversos tamaños, cristalizaciones de aragonito y yesos masivos han sido descritos en varias publicaciones (Ros et al., 2016a y b, 2018b, 2021).

Los espeleotemas epigénicos no son muy abundantes y se localizan principalmente en las galerías superiores y concentrados en varios puntos de la cavidad, donde la fracturación de la roca se encuentra más cerca de la superficie, especialmente en la zona Este.

El tramo habilitado para las visitas se establece a través de las dos entradas practicadas recientemente para facilitar los accesos en los años 1995-2014, (Espín de Gea et al., 2018), se amplía y acondiciona el tramo de galerías superiores desde la nueva entrada en la sala de los Corales, recorriendo la cavidad en dirección Oeste hasta la salida superior con un recorrido de unos 700 m y un desnivel de 35 m (figura 3).

En la primera fase de apertura se cementó el itinerario para evitar las irregularidades; en la segunda fase se instalaron algunos tramos de pasarelas metálicas para enlazar zonas aéreas (figura 4 A). De esta forma se puede realizar la visita desde la entrada inferior hasta la superior por un recorrido plano sin obstáculos ni irregularidades. La visita ofrece diferentes espacios interpretativos, un recorrido singular donde se resalta el origen hipogénico de la cavidad, pasando por las estrechas galerías iniciales hasta llegar a los grandes espacios de la sala de los Clastos, Medusa, y otras, junto con zonas de espeleotemas epigénicos que acompaña a estas morfologías (figura 4 B y C).

El inicio de las visitas se inicia por la entrada inferior (figura 5 A), se recorren diversos espacios caracterizados por espeleotemas epigénicos (figura 4 A-B-C), las pasarelas salvan las pequeñas simas y chimeneas ascendentes que se entremezclan con morfologías hipogénicas (figura 1 A y 2 B). Desde esta entrada hasta la sala de los Clastos se sigue por pasadizos estrechos que dan paso a salas como la de las Raíces, en los techos se pueden observar numerosos conductos de salida (*outlets*) conductos ascendentes (*feeders*),



*Figura 4. A: Zona entrada Este, espeleotemas epigénicos y pasarela para evitar los desniveles. B: espeleotemas epigénicos y techos con morfologías hipogénicas, suelo cementado realizado en la primera fase de apertura. C: Espeleotemas epigénicos formados a través de uno de los conductos ascendentes (outlet) y que se encuentran cerca de la superficie por donde se filtra el agua meteórica (fotos M. Tremeño y M. Aldeguer).*



*Figura 5. A: entrada turística inferior zona Este, B: techo con morfologías hipogénicas formado por cúpulas de biocorrosión (Bini, 2007), C: galería con morfologías hipogénicas, cúpulas y suelo con capa fósil de guano, pasarela cementada correspondiente a la primera fase de apertura, D: Sala de la Medusa, techos de cúpulas de corrosión y canal de cúpulas hidrotermales, techo derecho (Fotos: M. Tremeño y M. Aldeguer).*



*Figura 6. Nichos de convección en pared y canal en techo, (Audra et al., 2009) los describe como antiguo nivel de balsa termal, estos nichos son frecuentes en pasadizos estrechos que comunican salas, en la zona izquierda de la imagen hay unos rellenos de rocas que se encuentran cementados por las misma caliza, podría ser un antiguo indicador de agua embalsada, en la pared derecha hay cristalizaciones que parten de pequeños conductos, toberas con una actividad de emisión de aire y gases que al salir condensan y cristalizan en zonas, se detalla el proceso en la (figura 11) (Fotos: A. Ros y J.L. Llamusí).*

cúpulas, particiones (figura 8 conjunto) y en algunos de estos, cercanos a la superficie, se han formado espeleotemas epigénicos por filtraciones de agua (figura 4 C).

En este tramo, hay simas (*feeders*) de diversas profundidades y tamaños que vienen del fondo de la cavidad y que no descienden más de una veintena de metros.

En esta zona se encuentra un conducto ascendente que dio lugar a la entrada original conocida de 1966 y por donde se accedía a las galerías por un sinuosos y estrecho pasadizo hasta la realización de las dos nuevas entradas artificiales, hoy reconvertido en itinerario de las visitas deportivas (figura 1).

En el recorrido turístico, la cavidad va cambiando, disminuyen los espeleotemas epigénicos, siendo sus morfologías hipogénicas más evidentes (figura 5 B-C-D y figura 7 conjunto) hasta llegar a la gran sala de los Clastos (figura 9) lugar donde coinciden la roca caliza con las dolomías arcillosas que han ido desprendiéndose de las paredes y techo formando una gran sala (figura 9 A-B).



*Figura 7. A: conjunto de cúpulas de corrosión en techo y suelos con fuerte corrosión, B: anastomosis en sala Gaudí, cúpulas, canales, outlets, afectados por la fuerte erosión corrosión, C: restos de un conducto fuertemente erosionado donde queda una partición y cristalizaciones de aragonitos y yesos por efectos de la condensación se amplía detalle en (figura 11), D: outlets cerca de la superficie por donde llega agua meteórica arrastrando cristales de calcita que han formado estos espeleotemas secundarios a modo de banderas, las aguas vienen con restos de óxidos y arcillas que dan ese color oscuro Sala de las Raíces (Fotos: A. Ros, J.L. Llamusí, M. Tremiño y M. Aldeguer).*

A continuación de esta sala, las galerías adquieren mayor tamaño y son más numerosas las morfologías hipogénicas. En esta primera zona se asciende a la sala de la Oreja, llamada así por un peculiar espeleotema que se asemeja esta. Este espeleotema adquiere su forma después de un fuerte proceso corrosivo en un periodo concreto, que ocurre en varias zonas de la cavidad, se han detectado más espeleotemas afectados por este proceso de erosión- corrosión (figura 10, cuadro 1-2), (Ros et al., 2021).

En la cueva se han encontrado cantidades importantes de guano fósil (figura 5 C), que ha sido uno de los elementos que hicieron aumentar la acidez ambiental (Audra, 2016 y 2017) afectando intensamente a la roca caliza de paredes, techos y espeleotemas por biocorrosión. Posterior a este proceso erosivo-corrosivo se vuelven a formar nuevos espeleotemas epigénicos y que actualmente siguen recibiendo aportaciones de aguas de superficie, se forman en una etapa distinta a los espeleotemas erosionados (figura 10, cuadro 3).

La cueva inicia un ascenso y es próximo a la salida turística superior, en la zona Oeste, donde se encuentran las morfologías hipogénicas mayores y más erosionadas, grandes



*Figura 8. A: Sala de colapso con cúpulas de corrosión en techo. B: canal de cúpulas de corrosión y suelo con acumulación de fosfatos. C: Canal de cúpulas de corrosión en esta zona (Este) las cúpulas son de mayor tamaño que la zona Oeste. D: Techos con anastomosis y colapso, en el suelo se encuentran fracturas formado feeder entre los bloques. F: Canal de cúpulas hidrotermales con procesos de condensación-corrosión (Audra et al., 2009). G: Canal de cúpulas hidrotermales y outlet profundo (Fotos: A. Ros, J.L. Llamusí, M. Tremiño y M. Aldeguer).*

conjuntos de cúpulas y una zona peculiar con una importante anastomosis que adorna todas sus paredes y techos, la sala Gaudí, (figura 7 B), una galería ascendente desde las Gran Diaclasa hasta la superficie. Las galerías de este tramo hasta la superficie se caracterizan por la abundancia de grandes cúpulas (figura 5 C-D y figura 8 B-C).

## **Recorrido gráfico-turístico, interior habilitado a las visitas**

Selección de imágenes siguiendo el itinerario acondicionado para las visitas, un recorrido de unos 700 m y un pequeño desnivel ascendente progresivamente de 35

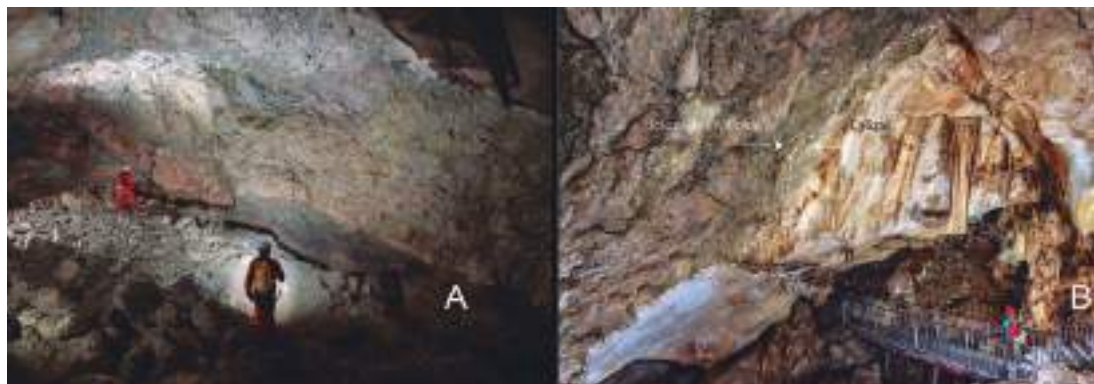


Figura 9. A: Sala de los Clastos, en esta sala se realiza el contacto de las calizas cretácicas con las dolomías arcillosas en la imagen B se marca la línea de contacto (Fotos A Ros y M. Tremiño).



Figura 10. Los procesos erosivos-corrosivos por la cavidad son frecuentes, si bien su expresión más llamativa la tenemos en la denominada "La Oreja", dentro del recorrido turístico. Esta curiosa forma que tiene la roca ha sido objeto de debate frecuentemente, si bien estudios recientes (Audra et al., 2016 y 2017) demuestran que elementos adicionales como pueden ser el guano de los murciélagos pueden alterar las condiciones de la cavidad, elevándola temperatura, humedad, y la acidez ambiental y las concentraciones de  $CO_2$  y otros gases ácidos que afectan más rápidamente a la roca. En gran parte de la cueva del Puerto se localiza una capa de sedimentos con alto contenido en fosfatos, (figura 8B). En la sala de la Oreja (figura 10 cuadro 1), existen áreas con una fuerte erosión corrosión (1A y 1B), dando una forma singular a modo de "oreja" A, si bien este proceso de erosión corrosión no se limita a esta única sala, en la sala de los Clastos (figura 10 cuadro 2) y otros lugares también se encuentran espeleotemas que casi han desaparecido por esta fuerte erosión-corrosión. También encontramos otras zonas de la cavidad donde los espeleotemas no han sido afectados por esta corrosión (figura 10 cuadro 3), lo que parece indicar que ha habido dos periodos distintos de crecimiento de espeleotemas y variaciones de lugar del flujo de agua que los forma (Ros et al., 2021) (Fotos: M. Tremiño, M. Aldeguer y A. Ros).

m. El visitante irá descubriendo la singularidad de las morfologías hipogénicas que se encuentran por toda la cavidad, destacando la profusión de estas, siendo una de las pocas cavidades habilitadas que puede ofrecer un espacio distinto y poco conocido, los guías complementan la información.



Figura 11. Conductos (microfeeder o toberas) son bastante frecuentes en Cueva del Puerto y en ellos se producen procesos de condensación del aire saturado, éste al llegar a la boca del conducto, el aire caliente, al salir, se enfría en la parte superior y cae por los laterales condensando humedad, al enfriarse, arrastra cristales de calcita que son depositados en la parte baja del conducto. A su vez el aire caliente que se eleva es más corrosivo, erosiona y descama la roca caliza en las zonas altas de las galerías (Audra et al., 2007), (Ros et al., 2021) (Fotos y montaje A. Ros).

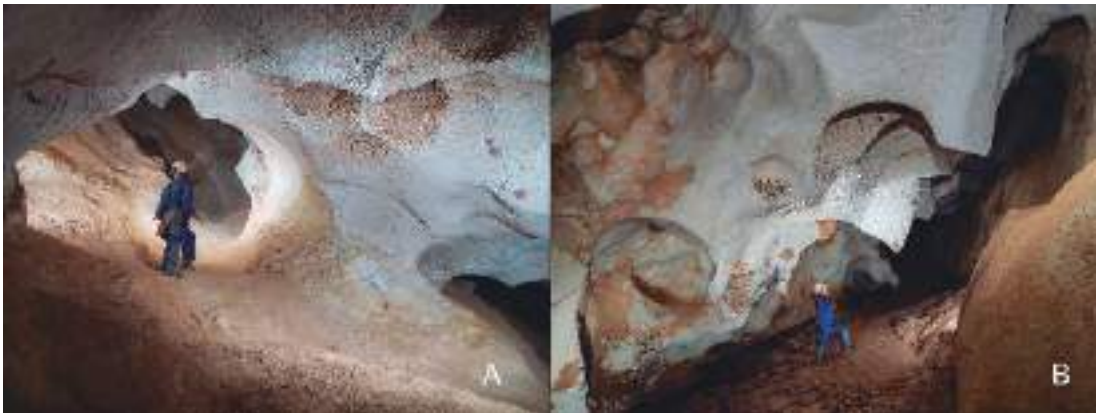


Figura 12. Morfologías en la zona profunda de la cavidad, en esta zona las morfologías adquieren mayor tamaño, grandes cúpulas, particiones, feeders, estas zonas solo son posible visitarlas en la visita deportiva y visitas especializadas (Fotos: A. Ros y J.L. Llamusi).

## Conclusiones

Cueva del Puerto es una cavidad cuyos orígenes son hipogénicos-hidrotermales, caracterizada por la presencia de numerosas de morfologías de origen hipogénico-hidrotermal, en ellas se pueden ver toda una representación de *feeders*, *outlets*, toberas, canales, particiones, yeso, aragonito que son acompañados en diversas zonas por espeleotemas epigénicos; estalactitas, columnas, banderas, gours, etc.

El recorrido lleva al visitante a conocer una cueva de una morfología diferente a la mayoría de las cavidades conocidas y a descubrir un nuevo tipo de cuevas, las cuevas



hipogénica-hidrotermales. Las imágenes que se presentan son solo una pequeña muestra de lo que se puede ver en la cavidad.

Cueva del Puerto es considerada como uno de los ejemplos más relevantes de cavidad hipogénica-hidrotermal, acondicionada para las visitas.

## Agradecimientos

A Manuel Tremiño y Marisa Aldegue por su inestimable colaboración en las fotografías de este trabajo. A las guías de la cueva del Puerto siempre dispuestas a explicar y aprender, Mavi Chico y Ana.

Toda la información en: [www.cuevadelpuerto.es](http://www.cuevadelpuerto.es)

## Referencias

- Audra P., Hoblea F., Bigot J., Nobécourt J.C., (2007). The role of condensation corrosion in thermal speleogenesis. Study of a hypogenic sulfidic cave in Aix-les-Bains, France. *Acta Carsologica*, 36/2. Postojna.
- Audra P., Mocochain L., Bigot J., Nobécourt J.C., (2009). Morphological indicators of speleogenesis: Hypogenic speleogens. *Hypogene speleogenesis and Karst Hydrogeology of Artesian Basins Proceedings of the conference, Chernivtsi, Ukraine*.
- Audra P., Barriquand L., Bigot J., Cailhol D., Caillaud H., Vanara N., Nobecourt J., Madonia G., Vattano M., Renda M. (2016). L'impact méconnu des chauves-souris et du guano dans l'évolution morphologique tardive des caverns. *Karstologia*, 68: 1-20.
- Audra P., Bigot J., Nobécourt J.C., Vattano M., (2017). The little known impact of bats and bat guano in the late stages of cave morphogenesis. 25th International Karstological School "Classical karst" Milestones and Challenges in Karstology, Postojna, Slovenia.
- Bini A. (2007). Morphologie et genèse de quelques types de coupoles. *Actes 17e Rencontre d'Octobre*, 37-45. Orgnac
- C.4 P. (1996). La Cueva del Puerto. *Subterránea*, 5: 46-53. Madrid.
- Espin de Gea A., Gila Abellán A., Reyes M., Arévalo L. (2018). Apertura del nuevo acceso a la Cueva del Puerto de Calasparra (Murcia), un reto tecnológico desde la investigación geofísica inicial hasta el método de excavación del túnel de acceso. VII Congreso Español sobre Cuevas Turísticas, 389-403. La Vall d'Uixó (Castellón).
- Gázquez F., Calaforra J.M., Ros A., Llamusí J.L., Sánchez, J. (2016). Hypogenic morphologies and speleothems in caves in the Murcia Región, Southeastern Spain. *DeepKarst Conference International: Origins, resources, and management of hypogene karst*, Carlsbad, New Mexico, USA.
- Gázquez F., Calaforra J.M., Rodríguez T., Ros A., Llamusí J.L., Sánchez, J. (2017). Evidence for regional hypogene speleogenesis in Murcia (SE Spain). *Hypogene Karst Regions and Caves of the World: 85-97*. Springer, USA.
- G.E.C.A. (1968). La Cueva del Puerto. *Geo y Bio Karst*: 14-15 (nota).
- G.E.C.A., (1970). La caverna del Puerto en Calasparra. I Congreso Nacional de Espeleología: 25-26. Barcelona.
- Puch C. (1987). La Cueva del Puerto. *Atlas de las Grandes Cavidades Españolas. Exploraciones*, 11. Barcelona.
- Ros A., Llamusí J.L., Sánchez J. (2014a). Cuevas hipogénicas en la Región de Murcia (España). I Congreso Iberoamericano y V Congreso Español sobre Cuevas Turísticas, 405-416. Aracena, Huelva.
- Ros A., Llamusí, J.L., Sánchez J. (2014b) Cuevas hipogénicas en la Región de Murcia vol. I. CENM-naturaleza (ed.). Murcia.
- Ros A., Llamusí J.L., Sánchez J. (2016a). Morfologías hipogénicas en la Cueva del Puerto (Murcia, España). *Gota a Gota*, 10: 8-15. Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V.
- Ros A., Llamusí J.L., Sánchez J., Gázquez F. Calaforra, J.M. (2016b). Morfologías hipogénicas en la Cueva del Puerto, Calasparra: Un recorrido geomorfológico. *Biblioteca digital CENM-Naturaleza (ed.)*. [www.cenm.es](http://www.cenm.es). Murcia.

- Ros A., Llamusí J.L., Sánchez A., Sánchez J. (2018a). Morfologías hipogénicas y procesos hidrotermales en la Cueva del Puerto, Murcia. Biblioteca digital CENM-Naturaleza (ed.). [www.cenm.es](http://www.cenm.es). Murcia.
- Ros A. Llamusí J.L., Sánchez A., Sánchez J., Gázquez F., Calaforra, J.M. (2018b). Evidencias de hipogénesis kárstica en la Región de Murcia. Boletín de la Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst: SEDECK, 12: 4-21.
- Ros A., Llamusí J.L., Rodríguez-Estrella T., Tremiño M., Calaforra J.M., Gázquez F., Fernández A., Hurtado A., Aldeguer M., Guirao L. (2021). La Cueva del Puerto, una cavidad hipogénica. Biblioteca digital CENM-Naturaleza (ed.). [www.cenm.es](http://www.cenm.es). Murcia.

## **Investigación arqueológica, explotación turística y conservación en una cueva clásica de la Prehistoria franco-cantábrica: la Grotte d'Isturitz (Saint-Martin d'Arberoue, Pyrénées-Atlantiques, Francia)**

Aritza VILLALUENGA MARTÍNEZ <sup>(1,2)</sup>, Jesús Francisco JORDÁ PARDO <sup>(2,3)</sup>, Álvaro ARRIZABALAGA VALBUENA <sup>(1,2)</sup>, Emmerick MOTTE <sup>(4)</sup>, Nathalie VANARA <sup>(5)</sup>, Joëlle DARRICAU <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología, Facultad de Letras, Universidad del País Vasco UPV-EHU. C. Tomás y Valiente s/n, E-01006 Vitoria (España).

<sup>(2)</sup> Grupo Consolidado de Investigación en Prehistoria: evolución humana, cambio climático y adaptación cultural en las sociedades preindustriales (GIZAPRE). IT-1435-22. alvaro.arrizabalaga@ehu.es, aritza.villaluenga@ehu.es

<sup>(3)</sup> Laboratorio de Estudios Paleolíticos. Departamento de Prehistoria y Arqueología, Facultad de Geografía e Historia. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Paseo Senda del Rey 7. E-28040 Madrid (España). jjorda@geo.uned.es

<sup>(4)</sup> SARL Grottes d'Isturitz & Oxocelhaya. Saint-Martin d'Arberoue, Pyrénées-Atlantiques (France). motte.emmerik@gmail.com, jdarricau@yahoo.fr

<sup>(5)</sup> Université Paris I-Panthéon-Sorbonne. Département de Géographie. Laboratoire TRACES UMR 5608 Université Toulouse Jean-Jaurès. nathalie.vanara@univ-paris1.fr

---

### **Resumen**

Situada en el sector más occidental de los Pirineos, la Grotte d'Isturitz se abre en el macizo carbonatado de la colina de Gaztelu, formando parte del sistema kárstico Isturitz-Oxocelhaya-Erberua. Conocida desde antiguo por los habitantes del valle del Erberua y mencionada en textos desde el siglo XVII, la cavidad contiene evidencias de actividad humana desde la Prehistoria (Paleolítico medio y superior, Neolítico, Edad del Bronce) hasta la época contemporánea. Hasta comienzos del siglo XX la cueva estuvo en manos de varios propietarios, pero ya en su primera década era propiedad de A. Darricau al que heredaría su nieta J. Darricau, actual propietaria y responsable. El sistema Isturitz-Oxocelhaya está protegido desde 1953 como "Monument Historique de France" y en 1996 toda la colina de Gaztelu forma parte del "Inventaire supplémentaire des Monuments Historiques". Entre 1895 y 1898 se realizó en su interior una explotación de fosfatos que permitió la documentación de un importante yacimiento arqueológico, visitado a principios del siglo XX por H. Breuil. Las primeras excavaciones arqueológicas las realizó E. Passemard entre 1912 y 1923 y, desde 1928 hasta 1959, fue el matrimonio Saint-Périer el responsable de unas extensas excavaciones. Desde entonces y hasta 1990 se hizo cargo de las investigaciones G. Laplace, al que sustituiría como responsable científico el Service Régional d'archéologie de Aquitaine, quien entre 1996 y 1998 encomendó a A. Turq y C. Normand la evaluación científica de la cueva, para lo cual realizaron doce sondeos, de los que el nº 7 en la Sala de Isturitz, fue fructífero arqueológicamente. Estos trabajos continuaron en 1999 por un equipo transfronterizo y entre 2000 y 2010 continuaron dirigidas por C. Normand. Desde 2020, A. Villaluenga al frente de un amplio equipo ha vuelto a intervenir en el sondeo nº 7. Este trabajo ofrece una síntesis de las

diferentes investigaciones arqueológicas realizadas junto con algunos datos relativos a la explotación y conservación de la cavidad.

**Palabras clave:** conservación, explotación, investigación, sistema kárstico de Isturitz-Oxocelhaya-Erberua, Pirineos occidentales.

## **Archaeological research, tourist exploitation and conservation in a classic cave of French-Cantabrian prehistory: the Grotte d'Isturitz (Saint-Martin d'Arberoue, Pyrénées-Atlantiques, France)**

### **Abstract**

*Located in the westernmost sector of the Pyrenees, the Grotte d'Isturitz opens in the carbonate massif of the Gaztelu hill, forming part of the Isturitz-Oxocelhaya-Erberua karstic system. Known since ancient times by the inhabitants of the Erberua valley and mentioned in texts since the 17th century, the cavity contains evidence of human activity from Prehistory (Middle and Upper Paleolithic, Neolithic, Bronze Age) to contemporary times. Until the beginning of the 20th century, the cave was in the hands of several owners, but already in its first decade the cavity was owned by A. Darricau, to whom his granddaughter J. Darricau would inherit, current owner and responsible. The Isturitz-Oxocelhaya system has been protected since 1953 with the category of "Monument Historique de France", and in 1996 the entire Gaztelu hill was included in the "Inventaire supplémentaire des Monuments Historiques". Between 1895 and 1898, phosphate mining was realized inside, which allowed the documentation of an important archaeological site, visited at the beginning of the 20th century by H. Breuil. The first archaeological excavations were carried out by E. Passemard between 1912 and 1923 and, from 1928 to 1959, the Saint-Périer couple were responsible for extensive excavations. From then on, research was carried out by G. Laplace until 1990, who was replaced as scientific manager by the Service Régional d'archéologie de Aquitaine, who between 1996 and 1998 entrusted A. Turq and C. Normand with the scientific evaluation of the cave, for which twelve soundings were carried out, of which No. 7 in the Isturitz Hall was archaeologically fruitful. These works continued in 1999 by a cross-border team and between 2000 and 2010 they continued to be carried out by C. Normand. Since 2020, A. Villaluenga, at the head of a large team, has again intervened in sounding No. 7. This work offers a synthesis of the different archaeological investigations carried out together with some data related to the exploitation and conservation of the cavity.*

**Keywords:** conservation, exploitation, Isturitz-Oxocelhaya-Erberua karstic system, research, western Pyrenees.

## Introducción

La Grotte d'Isturitz es una cavidad kárstica situada en el SO de Francia que, además de poseer indudables valores naturales que hacen de ella un verdadero lugar de interés geológico de excepcional valor patrimonial, contiene un importante yacimiento arqueológico conocido desde el siglo XIX e investigado a partir de los inicios de la primera década del siglo XX por diferentes científicos. En la actualidad, un nuevo proyecto de investigación liderado por uno de los firmantes (AV) ha retomado las investigaciones arqueológicas en la Gran Sala o Sala de Isturitz de la Grotte d'Isturitz con el objetivo de obtener un mejor conocimiento del hábitat superopaleolítico en el sondeo nº 7 de dicha sala, desarrollando un proyecto de investigación que incluye las diferentes disciplinas que intervienen actualmente en las investigaciones arqueológicas del Pleistoceno superior.

Desde el punto de vista de la explotación turística, la actual propiedad de la cueva (JD) ha gestionado las visitas con una filosofía marcadamente conservacionista, estableciendo cupos máximos de visitantes y periodos estacionales de cierre, con el objeto de alterar lo mínimo posible los parámetros ambientales de la cavidad.

## Marco geográfico y geológico

La Grotte d'Isturitz está situada en la localidad de Saint-Martin d'Arberoue-Donamartiri, departamento de Pyrénées-Atlantiques, región de Nouvelle Aquitaine (Francia) (figura 1), a 35 km de Bayona. Ocupa una posición central en el País Vasco, en la zona de contacto entre las elevaciones de los Pirineos y las llanuras de las Landas, a 35 km en línea recta de la costa atlántica actual. Su entrada actual, orientada al S-SE, se abre a la cota de 149 m s.n.m. en la ladera meridional de la colina de Gaztelu (209 m s.n.m.), en el valle del río Arberoue o Erberua. Este valle dista unos 30 km de línea de costa actual en el golfo de Vizcaya o Golfe de Gascogne y 25 km de las primeras cumbres pirenaicas con altitudes



Figura 1. Localización de la cueva de Isturitz (modificado de Normand y Cattelain, 2017).

superiores a 1.000 m. El valle se encuentra rodeado por colinas de poca altura con cumbres que casi nunca superan los 400 m.

Desde el punto de vista geológico la Grotte d'Isturitz se encuentra situada en el dominio geológico de los Pirineos, en su sector más occidental, donde estos se encuentran en

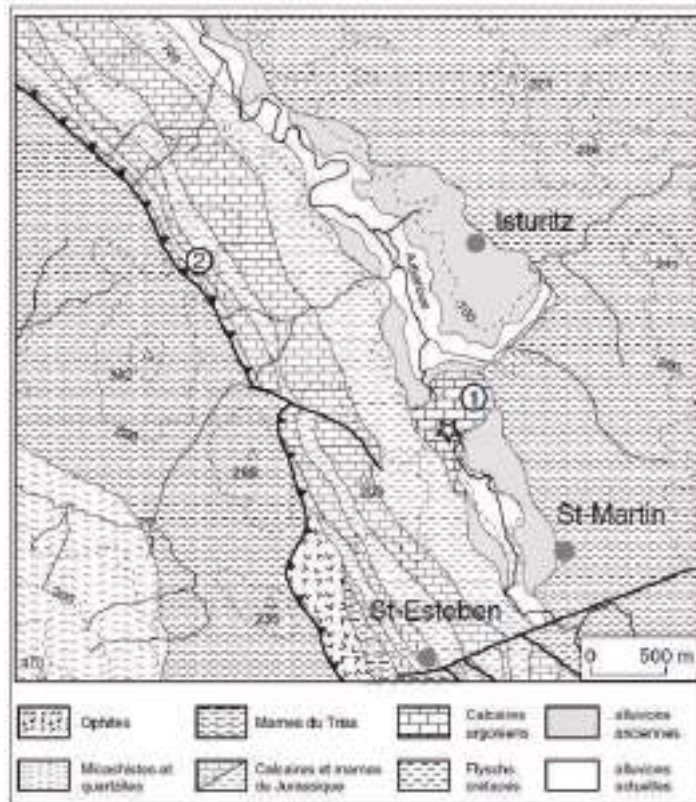


Figura 2. Detalle modificado del mapa geológico 1/50.000 de Ihody, que muestra la ubicación del macizo de la colina de Gaztelu (1) en el que se abre la Grotte d'Isturitz (estrella) (tomado de Lenoble y Texier, 2017).

contacto con los materiales de la Cuenca de Aquitania, concretamente en los materiales carbonatados del complejo urgoniano (Aptiense-Albiense inferior, Cretácico inferior) (figura 2). Se trata de unas calizas de facies micríticas y biopelospiriticas (Boissonnas *et al.*, 1974). Estos materiales constituyen un macizo carbonatado que condicionan el recorrido del valle del río Erberua, cuya traza viene controlada por un cabalgamiento de dirección norte-sur (Lenoble y Texier, 2016, 2017).

Este macizo carbonatado es el responsable del desarrollo de un relieve de medianas dimensiones, la mencionada colina de Gaztelu, que se encuentra intensamente karstificada con el desarrollo de un sistema kárstico, el sistema Isturitz-Oxocelhaya-

Erberua, con varios niveles de acavernamiento superpuestos. Según Larribau y Prudhomme (1983) son tres los niveles kársticos superpuestos: uno superior, que corresponde a la Grotte d'Isturitz, otro intermedio con la Grotte d'Oxocelhaya, y uno inferior por donde discurre en la actualidad el río Erberua. Sin embargo, Vanara (2017), a partir de trabajos anteriores (Larribau 1980 in Normand *et al.*, 2002; Larribau y Prudhomme, 1983) establecen cuatro niveles de acavernamiento en la colina de Gaztelu (figura 3): uno superior, Aldabia, situado a 175 m s.n.m. y a +75 m sobre el río Erberua, por debajo de este se encuentra la Grotte d'Isturitz a 149 m s.n.m. y a +49 sobre el río, sigue un nivel

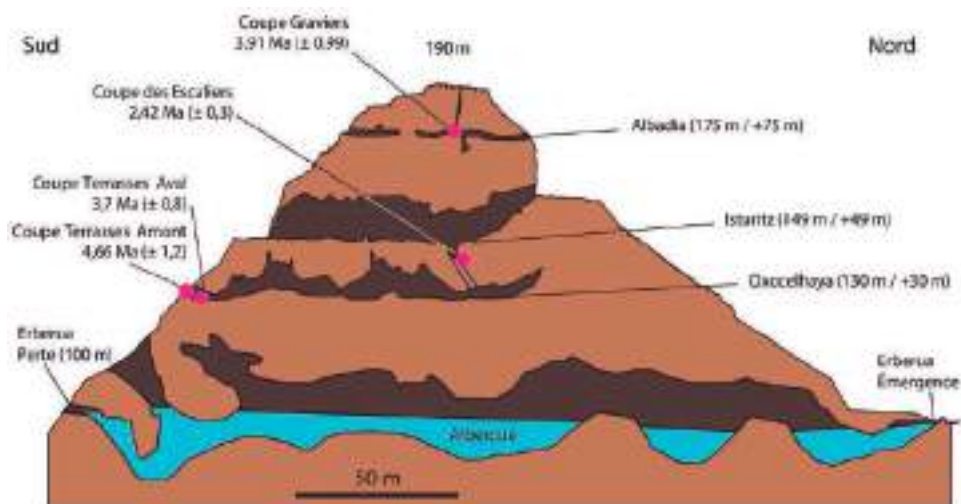


Figura 3. Sección SE-NO de sistema kárstico de la colina de Gaztelu (según Larribau 1980 in Normand, 2002, modificado por Vanara, 2017).

intermedio con la Grotte d'Oxocelhaya a 130 m s.n.m. y +30 m sobre el río, y, finalmente, el nivel inferior, a 100 m s.n.m., por donde discurre en la actualidad el río Erberua. En la actualidad se conocen 22 cavidades en la colina de Gaztelu.

## Un poco de historia<sup>1</sup>

La Grotte d'Isturitz ha sido siempre conocida por los habitantes del valle del Erberua (Normand, 2017) ya que la entrada N estuvo abierta hasta el año 1936-1937, en que fue clausurada. Las evidencias más recientes del paso de visitantes por la cueva son la

<sup>1</sup>Para la realización de la historiografía de la Grotte d'Isturitz nos hemos basado en gran parte en el amplio trabajo de Christian Normand "La grotte d'Isturitz Presentation", in Normand, Ch. and Cattelain, P. (eds.), La grotte d'Isturitz. Fouilles anciennes et récentes, Actes de la table ronde du cinquantenaire du classement comme Monument Historique des grottes d'Isturitz et d'Oxocelhaya, Hasparren, 14-15 novembre 2003, ARTEFACTS, 13, 9-22.

existencia de abundantes grafitos, algunos de ellos fechados entre los años 1870 y 1928. La cueva aparece mencionada en varios textos y publicaciones desde el siglo XVII. En el año 1640 M. de Bertereau haciéndose eco de las leyendas presentes en la tradición oral local, interpreta que la cavidad se trata de una mina de oro y que en su interior se esconde un tesoro compuesto por monedas de oro. En la misma línea, en 1730 C. Hautin de Villars en su trabajo *"Mémoire concernant les mines de France"* describe a la cueva de Isturitz cómo "...un des plus grands travaux des Romains.", esta misma atribución será publicada de nuevo en 1751 por H. Hellot en *"État des mines du royaume"*. Pero, no será hasta el año 1786 cuando el barón Dietrich, reconocerá por primera vez a la Grotte d'Isturitz como una formación natural "...j'allai à Isturitz chercher les mines d'or, indiquées par M. Hellot. Je n'y trouvai que des grottes assez vastes, dans des roches calcaires, sans indice de minerais."

Entre las evidencias arqueológicas destaca el hallazgo de «cinq grands bronzes attribúés au Haut-Empire» descubiertos por R. y S. de Saint-Périer (Saint-Périer, 1936). Así mismo, Normand (1997) describe el hallazgo de restos arqueológicos medievales dentro de la cavidad, que pudieron ser depositados por los habitantes del valle o por los ocupantes del castillo de Rocafort, situado en la cima de la colina de Gaztelu.

En la segunda mitad del siglo XIX, con el nacimiento del turismo en el País Vasco, las cuevas se convierten en destino de visitantes ilustres, destacando la visita a la cueva en 1867 de Napoleón III y su mujer, Eugenia de Montijo, o la visita de P. Loti en 1893. En esa misma época (1891), otros visitantes, como M. M. Hourcastagné y M. Lacau-Barraqué se interesaron por los niveles ricos en fosfatos e impulsaron, en 1895, el comienzo de su explotación. Sin embargo, los promotores de estos trabajos sólo contaban con la autorización de la propietaria de la entrada N de la cueva y no de M. Laugier, propietario de la mayor parte de la cavidad, donde se encontraba el emplazamiento de los fosfatos. A pesar de este conflicto, la explotación comercial del fosfato de la Grotte d'Isturitz, bajo la denominación de "Guano natural d'Isturitz" se alargará hasta el año 1898. Durante esos tres años, el espacio hoy día llamado "sala de los fosfateros" será casi enteramente vaciado.

Durante la extracción de los depósitos ricos en fosfato los responsables documentaron la existencia de un rico yacimiento arqueológico *"Ce n'est pas dans le sol de la grotte que l'on trouve le véritable guano, c'est dans le sous-sol sous une forte couche de stalagmites et pour y arriver, il a fallu jouer de la mine... C'est là que l'on a trouvé, au milieu de foyers de cendres et de tas d'ossements, dans une surface d'environ 6 mètres carrés seulement sur 5 mètres de profondeur, une grande quantité de silex taillés, d'os travaillés, des dents, etc."* (Aublet, 1953). Algunos de los restos arqueológicos fueron recogidos y presentados por M. Lacau-Barraqué en 1895 en la asamblea de la Société Borda y, gracias a las gestiones realizadas por su presidente, en 1896 se obtiene una financiación de 200 F para realizar un primer estudio científico de Isturitz. Ese mismo año, M. Boule visitará la cueva y publicará una nota en *L'Anthropologie* advirtiendo de las destrucciones de los fosfateros (Normand com. pers.). Sin embargo, no será hasta 1898 cuando la explotación fosfatera se detendrá, en el marco del proceso jurídico emprendido por M. Laugier.



Los conflictos existentes entre los diferentes propietarios pudieron ser la causa para explicar la ausencia de proyectos arqueológicos hasta 1911. Durante la primera década del siglo XX, H. Breuil se interesó y visitó la Grotte d'Isturitz, pudiendo constatar su gran potencial arqueológico (Normand, 2017). En 1911 se procedió a la apertura parcial de la entrada S de la cueva, lo que facilitó la realización de una serie de sondeos por parte de M. Roseville des Grottes y F. Mascaraux o la recogida de restos entre los escombros abandonados por los fosfateros (Réveil, 1912). Ya en 1912, E. Passemard, geólogo de origen alsaciano, logrará firmar una convención con A. Darricau (heredero de M. Laugier y abuelo de J. Darricau) para comenzar un proyecto arqueológico. Tras una primera fase en la que se documentarán las diversas evidencias y niveles arqueológicos, E. Passemard comenzará una serie de excavaciones arqueológicas que se prolongarán hasta 1923 (Esparza San Juan, 1990). Aproximadamente fueron excavados 300 m<sup>2</sup> en localizaciones situadas en la Sala de Isturitz y en la Sala de San Martín. Las observaciones



Figura 4. Localización del sondeo n° 7 (modificado a partir de Normand et al., 2012).

y descubrimientos realizados por E. Passemard fueron recopilados en varios artículos, pero especialmente en un trabajo monográfico (Passemard, 1944)

Tras una interrupción de cinco años, en 1928 el matrimonio Saint-Périer, tras haber finalizado las excavaciones en Lespluge, descubrirán en Isturitz otra cavidad en la que centrar sus investigaciones. Entre 1928 y 1949, casi de modo ininterrumpido, los condes trabajarán en Isturitz. Tras el fallecimiento del conde, la condesa Suzanne de Saint-Périer

dirigirá en solitario las excavaciones hasta 1959. Todo ello tendrá como consecuencia la excavación de una inmensa superficie, con una potencia en algunos casos de hasta 4,5 m. La información de esta época fue publicada en múltiples obras y artículos, destacando tres monografías (Saint-Périer, 1930, 1936, 1952). Las colecciones acumuladas por E. Passemard y por los condes de Saint-Périer fueron depositadas en el Musée des Antiquités Nationales, en el primer caso tras su compra por 140.000 F y en el segundo caso, tras la muerte de la condesa, la colección Saint-Périer fue donada en 1929 y llegó al Musée d'Archéologie nationale en 1981 (Normand, 2017).

Desde mediados de los años 1950, un joven arqueólogo bearnés, G. Laplace estará presente en Isturitz. En un primer momento, su llegada a la cueva estaría vinculada a las excavaciones de Suzanne de Saint-Périer en las que colaboraría durante un cierto tiempo. Posteriormente a mediados de la década realizará el descubrimiento de una serie de figuras de arte parietal en el sector terminal de la cueva de Oxocelhaya, situada en la misma colina de Gaztelu. En esa misma década (1952-1953), procederá a realizar un sondeo arqueológico junto con J.M. Barandiaran en el vestíbulo de la misma cueva. Su presencia en Isturitz (Laplace, 1966) se prolongará hasta los años 1990, momento en el cual, J. Darricau, tras heredar la cavidad de la mano de su padre M. Darricau, implicará en la gestión arqueológica del yacimiento al Service Régional d'Archaeologie (com. pers. J. Darricau).

En cuanto a su protección legal, las Grottes d'Isturitz y Oxocelhaya fueron declaradas "Monuments Historiques de France" en 1953 a instancias de A. Darricau. Los hechos anteriormente descritos en el yacimiento, así como la existencia de excavaciones clandestinas entre los años 1985 y 1986, junto con un proyecto de construcción de una cantera en la colina del Eltzarrutze (Saint-Esteben), impulsaron a J. Darricau a solicitar en 1992 al Service Régional des Monuments Historiques la inscripción de la totalidad de la colina de Gaztelu en el "Inventaire supplémentaire des Monuments Historiques", cosa que se logra en 1996. Todo esto impulsó al Service Régional d'Archéologie de Aquitaine a comenzar una fase de estudio del conjunto de la Grotte d'Isturitz a fin de evaluar su estado de conservación y potencial arqueológico.

Así, entre 1997 y 1998, un equipo encabezado por A. Turq y C. Normand procedió a la excavación de doce sondeos arqueológicos, trabajos que constataron la práctica ausencia de niveles posteriores al auriñaciense intactos en el interior de la Sala de San Martín y la Sala de Isturitz. En este aspecto, el sondeo nº 7 de la Sala de Isturitz (figura 4) resultó ser de gran importancia al contar con una interesante muestra de restos de fauna fría, mamut y reno (*Mammuthus primigenius* y *Rangifer tarandus*), especies abundantes únicamente durante las pulsaciones más frías de la última glaciación, pudiendo ser en el caso de Isturitz coetáneos con el Gravetiense (com. pers. C. Normand).

La campaña de sondeos permitió certificar ciertas informaciones previamente apuntadas por otros investigadores, como la ausencia de niveles arqueológicos en el centro de la Sala de Isturitz, las vastas excavaciones realizadas en esta misma sala o la conservación de potencial arqueológico en el perímetro SE de este espacio, en el que se localiza el sondeo nº 7. La excavación de los *deblais* gravetienses y auriñacienses permitió determinar la

gran riqueza del yacimiento, estimando una densidad de 200 a 400 útiles líticos por m<sup>3</sup> para los niveles auriñaciense, y de 1.000 útiles líticos por m<sup>3</sup> en contextos gravetienses (Normand, 2017). El único sondeo arqueológicamente fructífero realizado en la Sala de Isturitz fue el n° 7 y los hallazgos en él realizados, restos líticos, macrovertebrados y microvertebrados, así como la posibilidad de su adscripción al Gravetiense, los sitúa como los últimos vestigios de un depósito único por sus dimensiones y riqueza.

Los resultados de la campaña de sondeos de 1997-1998, con el hallazgo de un solo sondeo fructífero en la Sala de Isturitz frente a siete en la Sala de San Martín, impulsó la apertura de una nueva superficie de excavación en esta última. En el año 1999 un equipo transfronterizo encabezado por I. Barandiarán Maeztu, A. C. Cava, J. Fernández Eraso (UPV/EHU) y C. Normand (SRA) excavaron una secuencia de niveles auriñacienses y musterienses (Barandiaran *et al.*, 2000). Posteriormente, entre los años 2000 y 2010, bajo la exclusiva responsabilidad de C. Normand un equipo pluridisciplinar acometió la excavación de niveles auriñacienses y protoauriñacienses, alcanzando la acumulación superior del conjunto musteriense. Gracias a este trabajo, numerosos aspectos del medio ambiente pleistoceno del SO de Europa, datos crono-culturales como los referidos a la llegada del *H. sapiens* al SO del continente (Barshay-Szmidt *et al.*, 2018) y aspectos culturales del Paleolítico superior inicial han sido abordados durante las últimas dos décadas (Normand y Cattelain, 2017).

Durante el periodo 2011-2017 el eje principal de investigación en la Grotte d'Isturitz et Oxocelhaya fue el estudio sistemático de las manifestaciones de arte rupestre (dirección de D. Garate). Estudio que aún a día de hoy continúa con la documentación en el Museo Nacional de Prehistoria de Saint-Germain-en-Laye de las piezas de arte mueble. El arte rupestre ocupa una parte importante entre las evidencias dejadas por los grupos humanos paleolíticos que habitaron la colina de Gaztelu. Los primeros hallazgos fueron realizados en la primera década del siglo XX por E. Passemard. En esta época destaca el hallazgo del pilar grabado en la Gran Sala (Garate *et al.*, 2016) y una amplia colección de arte mueble, esta colección será ampliada por los condes de Saint Périer hasta mediados del siglo XX (Rivero y Garate, 2014). A día de hoy se estima que la colección de arte mueble de la Grotte d'Isturitz asciende a varios millares, siendo en cantidad, diversidad y calidad uno de los conjuntos más importantes del arte paleolítico de Europa occidental.

Ya en la segunda mitad del siglo XX, G. Laplace identifica en 1955 varios motivos parietales en la galería terminal de Oxocelhaya, estudios ampliados en 1982 por J. D. Larribau quien identificó otra serie de motivos y halló el acceso a la cueva de Erberua, documentando la existencia de nuevos motivos (Larribau, 1982; Larribau y Prudhomme, 1983).

Recientemente, A. Calvo (Calvo *et al.*, 2019) ha procedido al estudio de los buriles de Noailles recuperados entre los escombros *déblais* gravetienses acumulados en 1952 según G. Laplace (com. pers. C. Normand) en la parte trasera del pilar decorado en la Sala de Isturitz; su estudio tipológico, traceológico y experimental han demostrado que estas piezas eran utilizadas como perforadores en tareas de costura o trabajo de astas de cérvido y que su desaparición estaría relacionada con la invención de la aguja y su expansión por el suroeste de Europa durante el Solutrense.

## Importancia científica de la colina de Gaztelu y sus yacimientos arqueológicos y paleontológicos

En este sistema kárstico de la colina de Gaztelu, la Grotte d'Isturitz destaca por contener un importante yacimiento arqueológico con evidencias de actividades realizadas por poblaciones del Paleolítico medio (Musteriense) y superior (Auriñaciense, Gravetiense, Solutrense y Magdaleniense), abundante arte mueble y representaciones de arte parietal, la Grotte de Oxocelhaya contiene una nutrida representación de arte parietal paleolítico con representaciones de caballo y bisonte principalmente (Larribau, 1982) y la Grotte de Erberua-Arberoue presenta tanto restos arqueológicos como representaciones parietales que permanecen sin estudiar (Larribau y Prudhomme, 1983; Darricau y Labarge, 2012). Además, la cavidad contiene un importante yacimiento paleontológico del Pleistoceno medio con restos de oso correspondiente a una forma transicional entre *Ursus deningeri* y *Ursus spelaeus*, primera constatación de depósitos arqueo-paleontológicos del Pleistoceno medio en la colina de Gaztelu (Villaluenga, 2018). La Grotte d'Isturitz ha sido ocupada por poblaciones humanas desde tiempos prehistóricos, por lo que se trata de un testigo del pasado único, que acumula evidencias arqueológicas que comienzan al menos durante el Pleistoceno medio (Villaluenga, 2018) y que se prolongan hasta época histórica. En un contexto más general la cueva se sitúa en la colina de Gaztelu en la que se han documentado al menos otras dos importantes cavidades con evidencias arqueológicas: Oxocelhaya y Erberua.

La actividad minera llevada a cabo entre los años 1895 y 1898 y las posteriores intervenciones arqueológicas realizadas entre 1911 y 1959 alteraron definitivamente la fisonomía de la cavidad y destruyeron gran parte del patrimonio arqueológico. Normand (2017), tras la realización de una campaña de sondeos entre los años 1996 y 1998, concluye que en la Sala de Isturitz sólo quedan ciertos niveles arqueológicos intactos, que se localizan en su extremo SE, donde se encuentra el sondeo nº 7, además del testigo dejado por el matrimonio Saint-Périer en dicha sala. A pesar de su ubicación e importancia, no debe obviarse que el contexto arqueológico descubierto en el sondeo nº 7 se ubica en un área periférica de la Sala de Isturitz. Según los resultados de las excavaciones de E. Passemard y del matrimonio Saint-Périer, la zona de hábitat en la Sala de Isturitz se encontraba al pie de la entrada norte de la cueva, junto al pilar grabado. Esto no impide que ocupaciones más esporádicas o actividades específicas no hubieran podido haber sido realizadas en el interior de esta sala. Los hallazgos realizados en el sondeo nº 7 (fauna y restos líticos) (figura 5) inducen a pensar en un momento de ocupación caracterizado por una fauna fría, a lo que hay que unir la presencia sistemática en la totalidad de los niveles identificados de una gran cantidad de fragmentos óseos quemados, lo que lleva a pensar en un uso de esta materia como combustible.

La falta de análisis detallados hace arriesgado atribuir a un periodo o fase cultural concreta las evidencias descubiertas, sin embargo, la presencia de *Mammuthus primigenius* en gran cantidad indica un periodo frío. Además, en la Sala de Isturitz se piensa que las ocupaciones humanas se desarrollaron con gran intensidad a partir del Gravetiense (Normand, 2017). Este periodo, aun siendo prolongado y con condiciones climáticas



Figura 5. Sondeo nº 7 (14/11/2019) desde el perfil N. En el centro, la escápula de *Mammuthus primigenius*.

variables, es en el Pirineo occidental una fase en la que, debido al rigor climático de su primera mitad, las cuevas son ocupadas de manera intensa (Arrizabalaga *et al.*, 2016).

## Un nuevo proyecto de investigación arqueológica

El actual proyecto de investigación tiene como objetivo la ampliación de sondeo nº 7, lo que está permitiendo avanzar en el conocimiento paleoambiental de su registro arqueológico a la vez que implicará el logro de importantes avances los campos de la geocronología, con la localización exacta mediante una batería de diez dataciones de C14 por ultrafiltración, la geoarqueología con una mejor descripción y conocimiento del depósito, la bioarqueología en su vertiente vegetal y animal y finalmente un posible avance en el estudio de la cultura material, industria lítica, industria ósea y arte mueble en forma de colgantes o elementos decorativos.

Todo ello hace del sondeo nº 7 y del depósito en el que se localiza un testigo único de las ocupaciones gravetienses en la Grotte d'Isturitz. La ampliación del sondeo y una hipotética ampliación de su estudio en un proyecto plurianual permitiría afrontar la excavación de un contexto del mayor interés científico para el mejor conocimiento de las ocupaciones en la Grotte d'Isturitz, pero también para el avance en la descripción de las dinámicas de poblamiento del Pirineo occidental y de la cornisa cantábrica.

En este sentido, la problemática que plantea la apertura y estudio multidisciplinar del sondeo nº 7 presenta varias vertientes. Por un lado, la ubicación del sondeo nº 7 es un área secundaria de la Sala de Isturitz, dado que la zona donde se encuentra está situada en el sector SE de la sala donde apenas incidía la luz natural, y se encuentra en una zona

con fuerte pendiente, a la entrada de un divertículo, lo que pudiera hacer pensar que se trata de un área no ocupada de manera regular o propicia a ser utilizada en actividades secundarias. Por otro, las evidencias arqueológicas descubiertas en esta superficie de 1,5 m<sup>2</sup> muestran la existencia de un contexto arqueológico único en todo el Paleolítico superior del suroeste de Europa. Se trata de una evidencia directa de la caza o aprovechamiento, transporte y explotación de al menos un ejemplar de mamut (*Mammuthus primigenius*) subadulto. Este tipo de comportamiento ha sido ampliamente descrito en la literatura, si bien se trata de contextos frecuentemente más recientes ubicados en el noreste de Europa (Wilczynski *et al.*, 2015), aunque existen excepciones como en la cueva de Arcy-sur-Cure (Goutas y Lacarrière, 2018), con restos de la misma especie explotados durante el Gravetiense.

A diferencia de otros contextos, en Isturitz pudiera ser que los restos de mamut fueron relativamente abundantes. Hemos tenido conocimiento de que su presencia no era excepcional ni que pasaba desapercibida en las tareas de excavación acometidas por los condes de Saint-Périer. Sin embargo, la poca importancia que se otorgó a los restos de fauna en las excavaciones de Isturitz, hizo que la inmensa mayoría de restos fuesen desechados (com. pers. J. Darricau y C. Normand). Aun así, M. Darricau decidió conservar algunos restos óseos y dentales en la colección particular de la familia Darricau. Sin embargo, estudios previos multidisciplinares centrados en el análisis de los *déblais* gravetienses de la Sala de Isturitz (Lacarrière *et al.*, 2011) muestran una economía de tipo doméstico dominado por el bisonte (*Bison priscus*) 58%, seguido por el reno (*Rangifer tarandus*) 14,1% y el caballo (*Equus ferus*) 6,5%, mientras que el mamut (*Mammuthus primigenius*) sólo supone el 0,2% del conjunto.

Los puntos hasta aquí descritos muestran cómo nos encontramos en el sondeo nº 7 ante un contexto único, ya que bien pudiera ser el último testigo de un comportamiento humano particular, una estrategia cinegética o de aprovechamiento de recursos naturales en la que ocasiones puntuales se explotaba la megafauna. El estudio preliminar de la colección lítica recuperada en 1998 y 2021 en el sondeo nº7, muestra una gran cantidad de *écaillés*, fragmentos de láminas de sílex fracturadas por impacto. La abundancia de este tipo de resto, hace pensar en su uso recurrente como herramienta destinada a fracturar restos óseos de gran talla, a fin de proporcionar acceso a la médula ósea, materia de gran valor nutricional y usado en otras actividades por los grupos humanos prehistóricos (com. per. Calvo y Arrizabalaga).

Es más, una comparación preliminar entre la composición de los conjuntos recuperados en la Sala de Isturitz, *déblais* (Lacarrière *et al.*, 2011) y el sondeo nº 7, hacen pensar en usos diversos de esta gran sala (1.500 m<sup>2</sup>). Por un lado, pudieran haber existido con zonas dedicadas a la economía doméstica y hábitat, junto con espacios secundarios. Estos últimos alejados de las zonas de habitación al fondo de la sala en la que se realizarían actividades como la explotación de elementos de mamut (*Mammuthus primigenius*). Por otro lado, la Sala de Isturitz fue casi íntegramente excavada entre 1912 y 1959 y la densidad de restos líticos descrita por Normand (2017) a partir del cribado de los *déblais*, próxima a 1.000 útiles líticos por m<sup>3</sup>, hace pensar en ocupaciones muy asiduas

durante ciertas fases del Gravetiense, lo que también induce a plantear la hipótesis de una diversificación en la funcionalidad y ocupación de dicha sala.

## Explotación y conservación de la cavidad

En la actualidad, la colina de Gaztelu y el sistema kárstico que contiene en el que se encuentra la Grotte d'Isturitz pertenece a J. Darricau e hijos responsables de la gestión de los visitantes y de la conservación de la cueva y su contenido arqueológico desde 1983. La cueva permanece abierta del 15 de marzo al 15 de noviembre siete días a la semana, con un horario de visitas variable: desde las 14 h hasta las 17 h durante los meses de marzo, abril, octubre y noviembre, de las 10,30 h a las 11,30 h y de las 14 h a las 17 h en junio y septiembre, y de las 10 h a las 12 h y las 13 h a las 18 h en julio y agosto. Las visitas se realizan con una duración de una hora y con un máximo de 19 visitas diarias en los meses de julio y agosto. Los visitantes son acompañados en todo momento por guías especializados, formados para dar una información veraz y correcta. Además, la Grotte d'Isturitz ofrece diferentes acciones pedagógicas incluyendo las visitas de grupos de escolares durante los meses del curso académico, así como talleres y exposiciones temáticas temporales. Las tarifas están segmentadas con diferentes precios para adultos, niños (a partir de 4 años

Año	1983	1992	2000	2006	2010	2019	2021
Nº visitantes	80.000	90.000	55.932	51.327	43.043	41.651	38.502

Tabla 1. Número de visitantes entre 1983 y 2021 (datos J. Darricau).

pagan entrada), adolescentes, grupos de adultos, grupos de niños, grupos familiares, preferentes, jubilados, desempleados, estudiantes y discapacitados.

En cuanto al número de visitas que han acogido las Grottes d'Isturitz y Oxocelhaya han variado desde un máximo de 90.000 visitantes anuales en 1992 hasta el mínimo de 2021 con 38.502 visitantes al año. En la Tabla 1 se muestra la evolución de los visitantes desde 1983 (datos J. Darricau).

Se observa que tras alcanzar un máximo de visitantes en 1992 estos descendieron paulatinamente hasta llegar al mínimo del año 2021. Esto se debe a que la propiedad decidió apostar por la conservación de la cavidad frente al número de visitantes, cambiando profundamente el sistema de visitas. Para ello estableció una serie de horarios de visita en función de los meses del año, con cuatro meses de cierre total para la recuperación de los parámetros ambientales de la cavidad y un máximo de visitantes en la temporada alta de los meses de julio y agosto.

En cuanto a la conservación, cada año se realiza una intervención con toma de datos ambientales por técnicos del laboratorio de la Station d'Écologie Expérimentale du CNRS Moulis (Ariege) bajo la coordinación de François Bourges, al que se ha unido en los últimos años el laboratorio MEMOSOL, Bureau d'études géophysiques de Soueix-Rogalle (Ariege).

Por otra parte, desde 2018 un equipo de investigación estudia el impacto de las visitas en los parámetros ambientales de este espacio subterráneo, en dos puntos concretos del sistema kárstico: uno, en la parte más baja de la Grotte d'Isturitz en el extremo N de la Gran Sala o Sala de Isturitz, en las proximidades del pilar decorado, con una altura bajo la bóveda es de 12 m, y otro, en la parte más alta de Oxocelhaya, en la salida de la conocida como red Meunier-Haristory, con altura bajo la bóveda es 6 m (Magne *et al.*, 2019). Para realizar las mediciones se contó con diferentes dispositivos: varillas de metal entrelazadas, cañas de pescar, balones de helio y varas telescópicas, a fin de colocar los dispositivos de medición, en cada uno de los dos puntos de estudio, lo más próximos posibles a la bóveda de la cavidad. En la actualidad, se están llevando a cabo nuevas monitorizaciones de los parámetros ambientales para poder ofrecer un programa detallado para la conservación de la cavidad y sus manifestaciones rupestres.

Por otro lado, N. Vanara coordina un equipo de investigación que aborda el estudio de cuatro aspectos principales: el seguimiento del microclima con fines de conservación, la biodiversidad mediante inventarios de especies cavernícolas en cuevas urbanizadas y no urbanizadas, la icnología para el estudio de las huellas de osos y el fomento de la investigación de cara al público en general. Los resultados preliminares de esta investigación son (Vanara, 2022):

1. Seguimiento del microclima y conservación. Se han instalado ocho sensores de temperatura a lo largo de dos transectos a 10 m (Isturitz / Gran Sala) y 6 m de altura (Oxocelhaya / Sala de la Cascada). Durante todo el año, las temperaturas permanecen estratificadas; mensualmente, los cambios de temperatura siguen los de las estaciones, con modificaciones puntuales de temperatura tras el paso de grupos de visitantes.

2. Estudios de invertebrados muestran una biodiversidad en Isturitz y Oxocelhaya, menor a la documentada en la Grotte du Figuier, cueva no urbanizada situada en la ladera noroeste de la colina de Gaztelu.

3. Estudios de huellas de osos. Se documenta la ausencia de evidencias icnológicas en Isturitz, si bien existen niveles paleontológicos que atestiguan una abundante presencia de plantígrados durante el Pleistoceno medio y superior. En la cueva de Oxocelhaya se han inventariado arañazos en las salas Laplace (paneles 1 a 6), Blocs (15 y 20), Bauges (14 a 17), Larribau (18), de la Pagoda (8 a 10) y en los divertículos Este (7) y Oeste (11 a 13); pulimentos en la galería Bauges (3 sitios); además de posibles lechos en la galería Bauges (4 depresiones). El trabajo permitió localizar, describir y determinar las evidencias relativas a la frecuentación de la cavidad por parte de los osos. Los paneles que combinan las huellas de osos y manifestaciones artísticas permiten afirmar que el período de ocupación principal de los osos es anterior al de las poblaciones del Paleolítico superior.

4. Promoción de la investigación. Se han realizado presentaciones al público general de los paisajes subterráneos de las Grottes d'Isturitz y Oxocelhaya.



---

## Recapitulación

La Grotte d'Isturitz forma parte de un sistema kárstico estructurado en cuatro niveles que discurren por la colina de Gaztelu (Aldabia, Isturitz, Oxocelhaya y Erberua), la cual constituye un hito en el paisaje en la zona de conexión entre los Pirineos y la cuenca de Aquitania. Contiene un importante yacimiento paleontológico y arqueológico que cubre el final del Pleistoceno medio y el superior, con niveles atribuidos al Musteriense, Auriñaciense, Gravetiense Solutrense y Magdaleniense, así como grabados y pinturas rupestres paleolíticas. En la actualidad, un equipo interdisciplinar liderado por uno de los firmantes (AV) está desarrollando un proyecto que afecta al sondeo nº 7 de la Gran Sala o Sala de Isturitz, donde se documentaron restos de mamut y de reno en un contexto gravetiense.

La Grotte d'Isturitz y el conjunto de cavidades de Gaztelu, pertenecientes a la familia Darricau, es una cueva turística en la que se lleva a cabo una explotación respetuosa con el medio ambiente subterráneo a la vez que se realizan seguimientos periódicos de los parámetros ambientales con el fin de controlar la evolución ambiental de la cavidad a lo largo del año.

Por todo ello, la Grotte d'Isturitz constituye un buen exponente del patrimonio geológico, paleontológico y arqueológico del SO de Francia que debe ser conservado, investigado y divulgado adecuadamente.

## Agradecimientos

Este estudio se encuadra dentro de los proyectos "Proyecto para la extensión del Sondeo 7 de la cueva de Isturitz (Saint Martin d'Arberoue-Donamartiri, Francia)" autorizado y subvencionado por el Ministère de la Culture et de la Communication de Francia, la Association Grottes d'Isturitz et Oxocelhaya y los proyectos del MCIN (España) "Territorio y movilidad entre los cazadores-recolectores del Paleolítico y Mesolítico peninsular. Rasgos culturales y factores paleoambientales, PATHFINDER" y "Territorio y movilidad durante el Paleolítico superior en la encrucijada vasca PALEOCROSS" (PID2021-126937NB-I00) financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por los fondos "FEDER Una manera de hacer Europa". Agradecemos los comentarios al manuscrito realizados por C. Normand.

## Referencias

- Arrizabalaga, A., Prieto, A., García Ibaibarriaga, N., Calvo, A., Domínguez Ballesteros, E., Ochoa, B., Ordoño, J., Romero, A.J., Villaluenga, A., Tapia J., Ayerdi, M., Echazarreta, A., Hernández Beloqui, B., Medina, M.A., Bradtmöller, M., Suarez Bilbao, A., Sarasketa Gartzia, I., Iriarte Chiapusso, M.J. (2016). En la ruta occidental del poblamiento de la Península Ibérica. *Munibe Antropología-Arkeologia*, 67, 227-234.
- Aublet, G. (1953). Historique d'un gisement préhistorique: La grotte d'Isturitz. *Bull. de la Soc. des Sciences, Lettres et Art de Bayonne*, 66, 117-129.
- Barandiaran Maeztu, I., Cava, A., Fernández Eraso, J., Normand, C. (2000). *Saint-Martin d'Arberoue. Isturitz. Bilan scientifique 1999*. DRAC Aquitaine, Service Regional d'Archéologie, 114-115.

- Barshay-Szmidt, C., Normand, C. Flas, D., Soulier, M.C. (2018). Radiocarbon dating the Aurignacian sequence at Isturitz (France): Implications for the timing and development of the Protoaurignacian and Early Aurignacian in western Europe. *Journal of Archaeological Sciences: Reports*, 17, 809-838. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.09.003>.
- Boissonnas, J., Destombes, J.P., Heddebaut, Cl., Le Pochat, G., Lorsignol, S., Roger, Ph., Ternet, Y., Thibault, C. (1974). *Carte géologique à 1/50 000 d'Iholdy*. B.R.G.M., Service Géologique National.
- Calvo, A., Perales-Barrón, U., García-Rojas, M., Normand, C., Arrizabalaga, A. (2019). Just before sewing needles. A functional hypothesis for Gravettian Noailles-type burins from Isturitz cave (Basque Country, Southwestern France). *Journal of Archaeological sciences: Reports*, 25, 420-432. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.04.022>.
- Darricau, J., Labarge, A. (2012). *Diversidad cultural de la cueva de Istruritz durante el Paleolítico superior. Congreso Atlantiar, Irún, mayo 2012*. Accesible en: <https://docplayer.es/34786034-Diversidad-cultural-de-la-cueva-de-isturitz-durante-el-paleolitico-superior-congreso-atlantiar-irun-de-joelle-darricau-y-aude-labarge.html> [consultado 27/07/2022].
- Esparza, San Juan, X. (1990). *El Paleolítico Superior de Isturitz en la Baja Navarra (Francia)*. Tesis doctoral, UNED, Departamento de Prehistoria e Historia, Madrid.
- Garate, G., Rivero, O., Labarge, A., Normand, C. (2016). Le pilier gravé de la grotte d'Isturitz (Saint-Martin-d'Arberoue, Pyrénées-Atlantiques) Cent ans après sa découverte. *Bulletin de la Société préhistorique française*, 113 (3), 501-522.
- Goutas, N., Lâcarrière, J. (2018). Quelle place pour le Mammouth dans l'économie des Gravettiens d'Arcy-sur-Cure (Yonne, France) il y a environ 27000 ans cal BP? In : Costamagno, S., Gourichon, L., Dupont, C., Dutour, O. and Vialou, D. (dirs.), *Animal symbolisé, animal exploité: du Paléolithique à la Protohistoire*. Edition électronique du CTHS (*Actes des congrès des sociétés historiques et scientifiques*), Paris.
- Lâcarrière, J., Goutas, N., Normand, C., Simonet, A., Schwab, C. (2011). *Vers une redéfinition des occupations gravettiennes de la grotte d'Isturitz (Pyrénées-Atlantiques): révision critique des collections "anciennes" par l'approche intégrée des données lithiques, fauniques et d'industrie osseuse*. In: Goutas N., Klaric L., Pesesse D. and Guillermin P. (dirs.), *À la recherche des identités gravettiennes: actualités, questionnements et perspectives*, Société préhistorique française, mémoire LIII, 67-83, hal-02016855.
- Laplace, G. (1966). Recherches sur l'origine et l'évolution des complexes leptolithiques. *Mélanges d'Archéologie et d'Histoire de l'École Française de Rome*, supp. 4, Paris.
- Larribau, J.D. (1982). Découverte de nouveaux ensembles graphiques dans la grotte d'Oxocelhaya: note préliminaire. *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 79, 133-136.
- Larribau, J.D., Prudhomme, S. (1983). La grotte ornée d'Erberua (Pyrénées-Atlantiques), note préliminaire. *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 80 (9), 280-284.
- Lenoble, A., Texier, J.P. (2016). Processus géologiques de formation du site d'Isturitz (Sud-Ouest de la France). Implications archéologiques. *Paleo. Revue d'Archéologie Préhistorique*, 27, 235-252.
- Lenoble, A., Texier, J.P. 2017. Processus géologiques de formation du site d'Isturitz (Sud-Ouest de la France). Implications archéologiques. In: Normand, Ch. and Cattelain, P. (eds.), *La grotte d'Isturitz. Fouilles anciennes et récentes. Actes de la table ronde du cinquantenaire du classement comme Monument Historique des grottes d'Isturitz et d'Oxocelhaya*. Hasparren, 14-15 novembre 2003. ARTEFACTS, 13, 125-140.
- Magne, L., Lecoq, N., Urkia, F., Vanara, N. (2019). *Les cavités ornées d'Isturitz-Oxocelhaya. Microclimatologie et problèmes de conservation. Pyrénées occidentales, Isturitz – Saint Martin-d'Arberoue*. Rapport de synthèse 2019. Service régional de l'Archéologie de Nouvelle Aquitaine.
- Normand, C. (1997). Recherches récentes dans le château royal navarrais de Rocafort (communes d'Isturitz et de Saint-Martin-d'Arberoue, Pyr-Atlant.). *Archéologie des Pyrénées Occidentales et des Landes*, 16, 29-51.
- Normand C. (2017). La grotte d'Isturitz Presentation. In: Normand, Ch. and Cattelain, P. (eds.), *La grotte d'Isturitz. Fouilles anciennes et récentes. Actes de la table ronde du cinquantenaire du classement comme Monument Historique des grottes d'Isturitz et d'Oxocelhaya*. Hasparren, 14-15 novembre 2003. ARTEFACTS, 13, 9-22.
- Normand, Ch., Cattelain, P. (eds.) (2017). *La grotte d'Isturitz. Fouilles anciennes et récentes. Actes de la table ronde du cinquantenaire du classement comme Monument Historique des grottes d'Isturitz et d'Oxocelhaya*. Hasparren, 14-15 novembre 2003. ARTEFACTS, 13, 125-140.
- Normand, C., Costamagno, S., Diot, M.F., Goutas, N., Henrygambier, D., Laroulandie, V., Lenoble, A., Quinif, Y., Tarrío Vinagre, A., White, R. (2002). *Isturitz (Salle de Saint-Martin). Rapport de fouilles programmées 2000-2002 et projet de recherche 2003-2005*. Non publié, déposé au SRA Aquitaine.

- Normand, C., Goutas, N.; Lacarrière, J., Simonet, A. (2012). *El gravetiense de la cueva de Isturitz: Nuevas investigaciones, nuevos datos*. In: de las Heras, C., de las Heras, J.A., Arrizabalaga, A. and de la Rasilla M., Pensando en Gravetiense: Nuevos datos para la región cantábrica en su contexto peninsular y cantábrico, Monografías del Museo de Altamira, 23, 161-186.
- Passemard, E. (1944). *La caverne d'Isturitz en Pays Basque*. Préhistoire, IX, Presses Universitaires de France, Paris.
- Réveil, E. (1912). L'ancienne grotte d'Istiritoz, actuellement grotte de Saint-Martin-d'Arberoue. *Bull. de la Soc. D'Anthropologie de Lyon*, XXXI, 112-113.
- Rivero O., Garate D. (2014). L'art mobilier gravettien de la grotte d'Isturitz (fouilles Saint-Perier): une collection redécouverte. *Paléo*, 25: 247-276
- Saint-Périer, R. de (1930). *La Grotte d'Isturitz I: le Magdalénien de la Salle de Saint-Martin*. Archives de l'IPH, Masson éd., Paris.
- Saint-Périer, R. de (1936). *La Grotte d'Isturitz II: le Magdalénien de la Grand Salle*. Archives de l'IPH, Masson éd., Paris.
- Saint-Périer, R. de (1952). *La Grotte d'Isturitz III: le Solutréens, les Aurignaciens et les Moustériens*. Archives de l'IPH, Masson éd., Paris.
- Vanara, N. (coord.) (2017). *Axe II: Géoarchéologie*. In: Garate Maidagan D. (ed.), Les grottes ornées de la colline de Gaztelu (Saint-Martin-d'Arberoue, Pyrénées-Atlantiques). *Étude de l'art pariétal paléolithique: Les Grottes d'Isturitz et d'Oxocelhaya*. Bilan de recherches 2012-2017, Service régional de l'archéologie de Nouvelle Aquitaine.
- Vanara, N. (2022). *Les grottes d'Isturitz, d'Oxocelhaya et du Figuier (colline de Gaztelu), communes de Saint-Martin-d'Arberoue et d'Isturitz, Pyrénées-Atlantiques, France (époque indéterminée, toutes périodes)*. Bilan scientifique régional 2020, v2.
- Villaluenga, A. (2018). La Cueva de Isturitz (S. Martin d'Arberoue, Francia), primeras evidencias de ocupaciones paleontológicas durante el Pleistoceno Medio. *Kobie, serie Anejos*, 18, 75-86.
- Wilczynski, J., Wojtal, P., Roblickova M., Oliva, M. (2015). Dolni Vestonice I (Pavlovian, the Czech Republic) -Results of zooarchaeological studies of the animal remains discovered on the campsite (excavation 1924-52). *Quaternary International*, 379, 58-70. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.05.059>.



Patrocinan:

