



Geología y turismo: realidades complementarias

Arantza Aramburu Artano
Laura Damas Mollá
Juan José Durán Valsero
(editores)

Karrantza (Bizkaia), 22 a 25 de octubre de 2024

Geología y turismo: realidades complementarias. A. Aramburu, L. Damas y J. J. Durán (eds.), Karrantza (Bizkaia), Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE, 2024).

284 pags.; 24 cm.

Portada: detalle de goteo sobre una estalagmita de la cueva de Pozalagua (Sergio González).

Contraportada: excéntricas en la cueva de Pozalagua (Sergio Laburu)

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico, mecánico, incluido fotografías, grabación o por cualquier otro sistema de almacenar información sin el previo permiso escrito del autor o editor. 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

Imprime: Soluciones Gráficas Chile, S.L.L. - www.graficaschile.es

Presentación

El lema de CUEVATUR 2024 ha sido “Geología y turismo: realidades complementarias”. Efectivamente, el turismo geológico o geoturismo es hoy en día una de las múltiples facetas del turismo de interior, de naturaleza y de cultura. Las cuevas y minas habilitadas para su visita son unos de los mejores ejemplos de este tipo de sinergias: aprovechar los elementos patrimoniales de interés geológico para ponerlos en valor, propiciando su aprovechamiento sostenible y su conservación.

La Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), que engloba en la actualidad a 29 cuevas y 4 minas repartidas por todo el territorio peninsular y los dos archipiélagos, además de contar con varios miembros internacionales, lleva casi tres décadas impulsando este tipo de turismo, vinculado al profundo atractivo de la naturaleza geológica intrínseca del espacio subterráneo, natural o generado por el ser humano.

Este libro recoge las comunicaciones presentadas en la IX edición del congreso español sobre cuevas y minas turísticas, celebrado de la localidad de Karrantza (Bizkaia), en el mes de octubre de 2024. Desde la ya lejana en el tiempo primera edición de este congreso, celebrada en Lekunberri (Navarra), en noviembre de 2005, se ha configurado un legado científico-técnico sobre el mundo subterráneo, su estudio, conservación y gestión, constituido por ocho libros de actas publicados (en 2007, 2009, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 y 2022), coordinados por 17 editores, formados por 3902 páginas repartidas en 318 comunicaciones, cuyos 1334 autores y autoras representan a más de un centenar de centros de investigación y enseñanza, administraciones públicas y empresas consultoras, además de las propias cuevas y minas turísticas. Posiblemente, sea el más importante conjunto documental relacionado con este tema en el ámbito nacional e internacional.

A este impresionante legado hay que añadir los 25 trabajos publicados en este IX CUEVATUR 2024, firmados por 104 autores de once comunidades autónomas españolas y dos países extranjeros, repartidos en temáticas tan variadas como cambio climático, arqueología, geología, geotecnia, minería, espeleología, educación, turismo, hidrogeología y patrimonio geológico. Es destacable que en esta ocasión se han dedicado sendas sesiones del congreso a dos visiones que preocupan en la sociedad actual, de las que el mundo subterráneo no puede escaparse: la juventud y el género. Y también lo es que por vez primera la presidencia del comité científico de CUEVATUR haya recaído en una mujer, coeditora de este volumen de actas.

Para que esto haya sido posible, son muchas las personas e instituciones que han contribuido con su trabajo y dedicación, a las que agradecemos públicamente su apoyo, comenzando por los autores de las comunicaciones, los revisores, los integrantes de los comités científico y organizador y las distintas instituciones y empresas colaboradoras del congreso. Especialmente, hay que citar expresamente al alcalde del Ayuntamiento de Karrantza, Raúl Palacio y al presidente de ACTE, Manuel Durán, por su valentía, empeño y constancia en la realización de esta novena edición de CUEVATUR 2024.

Arantza Aramburu Artano, Laura Damas Mollá y Juan José Durán Valsero (editores)

Comité organizador

Coordinador

- Manuel Durán Hidalgo, Presidente de la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE)

Vocales

- Raúl Palacio Portillo, Alcalde del Ayuntamiento de Karrantza
- Rafael Pagés Rodríguez, Vicepresidente de ACTE
- Ana Torres Asensio, Vicepresidenta de ACTE
- Ovidio Altable Argüelles. Secretario de ACTE
- Leyre Barreras Vía, Técnica de Turismo del Ayuntamiento de Karrantza
- Iraide Ahedo Sainz, Técnica Oficina Turismo de Karrantza

Comité científico

Coordinadora

- Arantza Aramburu Artano, Universidad del País Vasco

Vocales

- Juan José Durán Valsero, Instituto Geológico y Minero de España - CSIC
- Laura Damas Mollá, Universidad del País Vasco

Integrantes del Comité Científico

- Irantzu Álvarez, Universidad del País Vasco
- Bartolomé Andreo Navarro, Universidad de Málaga
- Iñaki Antigüedad, Universidad del País Vasco
- José Miguel Andreu Rodes, Universidad de Alicante
- Martín Arriolabengoa, Universidad del País Vasco
- Miguel Bartolomé Úcar, Museo Nacional de Ciencias Naturales - CSIC
- Arantxa Bodego, Universidad del País Vasco
- Luis Miguel Cáceres Puro, Universidad de Huelva
- Juan Carlos Cañaveras Jiménez, Universidad de Alicante
- Luis Carcavilla Urqui, Instituto Geológico y Minero de España - CSIC
- Francisco Carrasco Cantos, Universidad de Málaga
- Yolanda del Rosal Padial, Instituto de Investigación Cueva de Nerja
- Miren del Val, CENIEH
- Joseba Doistua, Universidad de Deusto
- Ane Epelde, Ente Vasco de Energía - EVE
- Jesús María Esteban, Ente Vasco de Energía - EVE
- Ángel Fernández Cortés, Universidad de Almería
- Asun Fernández-Villaran, Universidad de Deusto
- Joan Fornós Astó, Universitat de les Illes Balears
- Alex Franco, Ente Vasco de Energía - EVE
- Diego Gárate, IIIIPC-UNICAN
- Policarp Garay Martín, SEDECK
- Iñaki García Camino, Arqueología
- Antonio González Ramón, Instituto Geológico y Minero de España - CSIC
- Ana Goytia, Universidad de Deusto
- Asier Hilario, Geoparque Unesco de la Costa Vasca
- Eneko Iriarte, Universidad de Burgos
- Concepción Jiménez de Cisneros, Inst. Andaluz de Ciencias de la Tierra - CSIC
- Montserrat Jiménez Sánchez, Universidad de Oviedo

- Luis Jordá Bordehore, Universidad Politécnica de Madrid
- Jesús Francisco Jordá Pardo, Universidad Nacional de Educación a Distancia
- Valme Jurado Lobo, Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología - CSIC
- Javier Lario Gómez, Universidad Nacional de Educación a Distancia
- Cristina Liñán Baena, Instituto de Investigación Cueva de Nerja
- Manuel López Chicano, Universidad de Granada
- Maite Meaurio, Universidad del País Vasco
- Manu Monge, Comisión de Patrimonio Geológico-Sociedad Geológica de España y Pro-GEO
- Raquel Morales García, Instituto Geológico y Minero de España-CSIC
- Ana Moreno, Instituto Pirenaico de Ecología - CSIC Zaragoza
- Javier Moreno, Gobierno Vasco
- Xabier Murelaga, Universidad del País Vasco
- Lucía Ojeda Rodríguez, Universidad de Málaga
- Roberto Ontañón Peredo, Museo de Prehistoria y Arqueología de Cantabria
- Ana Isabel Ortega Martínez, CENIEH
- Eulogio Pardo Igúzquiza, Instituto Geológico y Minero de España - CSIC
- Carlos Prieto, Universidad del País Vasco
- Pedro Agustín Robledo Ardila, Instituto Geológico y Minero de España - CSIC
- Luis Santiago Quindós Poncela, Universidad de Cantabria.
- Sergio Sánchez Moral, Museo Nacional de Ciencias Naturales-CSIC
- Jesús Ángel Uriarte, Universidad del País Vasco
- Iñaki Vadillo Pérez, Universidad de Málaga
- Iñaki Yusta, Universidad del País Vasco
- Ane Zabaleta, Universidad del País Vasco

Índice

S. R. Durán Laforet, J. José Durán Valsero, R. Morales García, P. A. Robledo Ardila, R. Berrocal Wallace, E. Vázquez Henares, J. Enrique Sánchez, I. Vadillo y L. Ojeda. <i>Micro Lugares de Interés Geológico (μLIG) y Elementos Destacados de Interés Geológico (EDIG) en cuevas: nuevos términos y herramientas para la catalogación, protección, gestión y puesta en valor del patrimonio geológico subterráneo.</i>	13
J. Moreno. <i>Comentarios jurídicos sobre la Cueva de Pozalagua (Karrantza, Bizkaia).</i>	25
L. Barreras Vía, L. Damas Mollá y I. Ahedo Sainze. <i>Reconversión turística del paisaje industrial: pasado y presente del patrimonio de Karrantza (Bizkaia).</i>	33
L. Damas Mollá, I. Álvarez, A. Bodego, I. Yusta, M. Meaurio, J.A. Uriarte, I. Antigüedad y A. Aranburu. <i>Estudio preliminar de los procesos de degradación de los espeleotemas de la Cueva de Pozalagua (Karrantza, Bizkaia).</i>	45
F. J. Fernández Amo. <i>Mina Garandina. Mina musealizada en las Minas de Santa Marta.</i>	57
I. Moro Palacios. <i>Conociendo al turista de cuevas prehistóricas en Cantabria: ejemplo de metodología de diseño y realización de encuestas.</i>	71
N. A. Jorge. <i>Marketing y el poder del Merchandising. Cuando aportas un poco de la cueva a casa.</i>	81
F. Javier Fernández Amo, M. Guerra González, A. B. Torres Asensio, P. Barroso Rodríguez, E. Romero Bomba, S. Piñera García, R. Moya Díaz. <i>Geomuseo de Aracena. Socialización del patrimonio geológico.</i>	93
A. Fernández-Cortés, E. Palacio-Pérez, T. Martín-Pozas, S. Cuezva, R. Ontañón, J. Lario, S. Sánchez-Moral. <i>Metodología para el establecimiento de rangos óptimos de visitas turísticas en cavidades con arte rupestre: caso de El Castillo, Las Monedas y Covalanas (Cantabria).</i>	101
C. Jiménez de Cisneros Vencelá, A. González-Ramón, M. López-Chicano, F.J. Jiménez-Espejo, W. Martín-Rosales, C. Liñán Baena, Y. Del Rosal Padial y L.E. Fernández Rodríguez. <i>Conservación de espacios naturales subterráneos patrimoniales: la Cueva de Nerja y la Gruta de las Maravillas.</i>	113
J. Lario Gómez, S. Cuezva Robleño, A. Fernandez Cortés, T. Martin-Pozas, S. Sánchez-Moral. <i>Monitorización de la concentración de radón en la Cueva de Los Verdes (Lanzarote).</i>	125

D. Garate Maidagan, M. Arriolabengoa Zubizarreta, I. Intxaurbe Alberdi, S. Salazar Cañarte, A. Torres Riesgo, J. González González. <i>Control del estado de conservación de las cuevas con arte paleolítico: una propuesta para su monitorización.</i>	133
G. Reshef Schwarz. <i>Construyendo un futuro sostenible: evaluación de amenazas y propuestas de conservación.</i>	143
J. Lario Gómez, S. Cuezva Robleño, A. Fernández-Cortés, T. Martín-Pozas, E. Duarte Matías, M. de la Rasilla Vives, M. González-Pumariega Solís, J. C. Cañaveras Jiménez, S. Sánchez Moral. <i>Registro geológico de inundaciones en la cueva de El Pindal (Asturias, España) y su implicación en la conservación del arte rupestre.</i>	157
A. Ros Vivancos. <i>CaveDrop Sistema autónomo de monitoreo de gotas para el estudio de espeleotemas en cuevas.</i>	167
A. Ros, J. Olmo Torrente, F. J. Fernández Amo. <i>La fotografía 360º: una herramienta para el análisis morfológico de la Cueva del Puerto (Calasparra, Murcia).</i>	177
V. Jurado, T. Martín-Pozas, S. Sánchez-Moral, A. Fernández Cortés, J. M. Calaforra, C. Sáiz-Jiménez. <i>Aerobiología de las cuevas Covadura y C3 del Karst en Yesos de Sorbas.</i>	183
R. Giménez Portero, A. Moreno Caballud, M. Luetscher, L. Ezquerro Ruiz, G. Benito Ferrández, M.I Bartolomé Úcar. <i>La monitorización hidrológica en la Cueva de las Gúixas como herramienta clave en la gestión turística de la cavidad.</i>	195
F. Gázquez, L. Martegani, Á. Fernández-Cortés, I. Martín-Lerma, D. Román y J. M. Calaforra. <i>Primeras investigaciones geomorfológicas, mineralógicas y microclimáticas en la Cueva Grande del Arco (Cueva del Arco III, Cieza, Región de Murcia).</i>	209
L. Jordá-Bordehore, K.m Mezga, L. Gullón Corral, R. Jordá-Bordehore, S. Rosado. <i>La galería de Las Cortes: una pequeña mina abandonada en el Parque Nacional de Guadarrama, España.</i>	221
L. Jordá-Bordehore, A. Al-Malabeh Ahmad, B. Abdelmadjid, R.I Jordá-Bordehore. <i>Discusión sobre la aplicabilidad de metodologías empíricas "tuneleras" para análisis de estabilidad de cuevas: caso del tubo de lava de Al-Badia, en Harrat Al-Shaam, Jordania.</i>	229
J. F. Jordá Pardo J. E. Aura Tortosa y E. Álvarez-Fernández. <i>65 años del descubrimiento de la cueva de Nerja (Málaga): las excavaciones arqueológicas del profesor Francisco Jordá Cerdá y su equipo.</i>	241
A. C. Martin Arriolabengoa, P. Arriolabengoa, E.r Rua-Alkain, C. Gutiérrez, E. Gutiérrez. <i>Las cuevas turísticas en la educación superior: ejemplo de la cueva de Arrikutz y el Grado en Geología de la UPV/EHU.</i>	253
A. González-Ramón, A. Córcoles Ballesteros, C. V. Galindo Rubio, J. M. Calaforra Chordi,	

S. Luque Mérida, J. P. Sólvez Beneyto, J. L. Ronda García, T. Rodríguez Estrella, J. Melero López. <i>Resultados preliminares de la exploración y topografía de las nuevas galerías descubiertas en el Petit Riu y de la aportación de agua subterránea mediante el estudio de la variación epifreática (Cueva de los Chorros del Río Mundo, Albacete, SE de España).</i>	261
R. Xifré Balcells, L.E. Hernández Gutiérrez. <i>Aplicación de tecnología geoespacial para la recuperación y puesta en valor de recursos turísticos: el caso de la Cueva Roja de Tenerife, Islas Canarias.</i>	273

Micro Lugares de Interés Geológico (μ LIG) y Elementos Destacados de Interés Geológico (EDIG) en cuevas: nuevos términos y herramientas para la catalogación, protección, gestión y puesta en valor del patrimonio geológico subterráneo

Durán Laforet, S.R.¹, Durán Valsero, J.J.², Morales García, R.², Robledo Ardila, P.A.², Berrocal Wallace, R.¹, Vázquez Henares, E.¹, Sánchez, J.E.¹, Vadillo, I.³ y Ojeda, L.³

¹Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga (GES de la SEM).

Centro Cultural José María Gutiérrez Romero, Calle República Argentina, 9. 29016, Málaga.

sergioduranlaforet@gmail.com / ernesto.vazquez.125@gmail.com / berrocal.wallace@gmail.com / jenrisan@videourtv.com

²Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC).

Calle Ríos Rosas, 23. 28003, Madrid.

jj.duran@igme.es / r.morales@igme.es / pa.robledo@igme.es

³Departamento de Ecología y Geología y Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA).

Facultad de Ciencias, Campus de Teatinos, Universidad de Málaga. 29071 Málaga.

vadillo@uma.es / luciaor@uma.es

Resumen

Los Lugares de Interés Geológico (LIG) se definen como territorios o zonas de cierto tamaño con características geológicas singulares (científicas, didácticas y/o turísticas) que, por su carácter único y representativo, forman parte del patrimonio geológico de una región. En España, se encuentran recogidos en el Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG), contemplado en la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. En el caso de los LIG relacionados con los terrenos kársticos, tanto de naturaleza exokárstica como endokárstica, se vinculan con la unidad geológica representativa número 8: Sistemas kársticos en carbonatos y evaporitas y con el contexto geológico de relevancia mundial número 3: "Sistemas kársticos en carbonatos y evaporitas de la Península Ibérica y Baleares" listados en el Anexo VIII (Geodiversidad del territorio español) de dicha ley. Un cierto número de los LIG incluidos actualmente en el IELIG, de interés geomorfológico y/o hidrogeológico, son cuevas kársticas, consideradas cada una de ellas como un LIG singular. Sin embargo, en el interior de estas cavidades kársticas (al igual que en otros LIG), existen enclaves diferenciables, de pequeñas dimensiones (micro lugares) o morfologías singulares (elementos destacados). Pese a su tamaño relativamente pequeño, presentan un interés a la escala de la cavidad considerada o del entorno inmediato donde se incluyen. En este trabajo se proponen los términos "Micro Lugar de Interés Geológico" (μ LIG) y "Elemento Destacado de Interés Geológico" (EDIG), respectivamente. Éstas nuevas acepciones conceptuales, el uso práctico de estos términos y el desarrollo de sus correspondientes inventarios en cuevas (turísticas o no) pueden ser herramientas muy útiles para identificar, catalogar, proteger, poner en valor, divulgar y gestionar el patrimonio geológico subterráneo de una cavidad, macizo o región kárstica. En este trabajo se presenta un ensayo metodológico que incluye el uso de estos términos por primera vez, el diseño de una ficha de inventario, y los resultados alcanzados en el estudio sistemático de una cavidad de excepcional valor geológico, la cueva de las Estegamitas, descubierta en 2021 y situada en una cantera de calizas activa, cerca de la ciudad de Málaga, en el sur de España.

Palabras clave: conservación de cavidades, geoconservación, inventarios, lugares de interés geológico, patrimonio geológico.

Abstract

Geosites are defined as territories or areas of a certain size with unique geological characteristics (scientific, educational and/or touristic) that, due to their unique and representative character, are part of the geological heritage of a region. In Spain, they are included in the Spanish Inventory of Geosites (IELIG), hosted in Law 42/2007, of December 13, on Natural Heritage and Biodiversity. In the case of those related to karst terrain, both exokarst and endokarst, they are linked to the representative geological unit number 8 "Karst systems in carbonates and evaporites" and the geological context

of global relevance number 3 "Karst systems in carbonates and evaporites from the Iberian Peninsula and the Balearic Islands", listed in Annex VIII (Geodiversity of the Spanish territory) of the law. A certain number of the LIG included in the inventory, of geomorphological and/or hydrogeological interest, are caves, each of them considered as a single LIG. However, inside karstic caves, there are small, differentiated places (microsites) or unique morphologies (elements), of geological importance at the scale of the cave considered or the immediate environment where it is included. In this work, the terms "Micro Sites of Geological Interest" and "Notable Elements of Geological Interest" (μLIG and EDIG, respectively, based on their acronyms in Spanish) are proposed for both concepts, respectively. The practical application of these concepts and the development of the corresponding inventories in caves (both show caves or caves in their natural state) can be very useful tools to identify, catalogue, protect, enhance, disseminate, and manage the underground geological heritage of a cave, karst massif or karst region. This work presents the work methodology, which includes the design of an inventory sheet, and the results achieved in the systematic study of the microsites of a cave with an exceptional geological value, Cueva de las Estegamitas or "Stegamites Cave" discovered in 2021, in an active limestone quarry, near the city of Málaga, southern Spain.

Key words: cave conservation, geoconservation, geological heritage, geosites, inventories.

Introducción

A la hora de abordar el marco de referencia para el conocimiento, inventario y protección del patrimonio geológico en general y del relacionado con el medio kárstico subterráneo en particular, es conveniente detallar, en primer lugar, una serie de conceptos generales, cuya aplicación permite acercarse de manera adecuada a la identificación y protección de dicho patrimonio.

Existen numerosas definiciones de patrimonio geológico, aunque la mayoría de los autores que han abordado el tema coinciden en señalar que es una parte importante del patrimonio natural que incluye formas, elementos y estructuras ligadas a cualquier disciplina de la geología, que presentan una especial singularidad debido, fundamentalmente, a su interés científico, didáctico-educativo y/o turístico-recreativo (Carcavilla et al., 2007). En la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad (modificada por la Ley 33/2015, de 21 de septiembre), el patrimonio geológico se define como "el conjunto de recursos geológicos de valor científico, cultural y/o educativo, ya sean formaciones y estructuras geológicas, formas del terreno, minerales, rocas, meteoritos, fósiles, suelos y otras manifestaciones geológicas que permiten conocer, estudiar e interpretar el origen y evolución de la Tierra, los procesos que la han modelado, los climas y paisajes del pasado y presente, y el origen y evolución de la vida".

La protección del patrimonio geológico se articula en esta ley de carácter básico a través de la obligación que tiene el estado, en colaboración con las comunidades autónomas, de elaborar el Inventario Español del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, que incluye el inventario de Lugares de Interés Geológico (IELIG), representativo, al menos, de las unidades y los contextos geológicos recogidos en el Anexo VIII de la mencionada ley.

Los contextos geológicos, denominados en inglés *geological contexts* (Wimbledon, 1996) o *geological frameworks* (García Cortés, 2008) pueden definirse como grandes unidades de referencia, geográficas o temporales, sin límites estrictos precisos, diferenciados por tener unas características geológicas propias, representativas y resultantes de una historia geológica común y que sirven como modelo para entender la evolución del planeta. Por lo general existen definidos contextos geológicos para cada país o para grandes regiones geológicas (de Lima et al., 2010). En España se han definido 21 contextos geológicos englobados en ocho unidades geológicas (García Cortés, 2008; Carcavilla y Palacio, 2011).

Por otra parte, y descendiendo a una escala de mayor detalle, los Lugares de Interés Geológico (LIG), por lo general incluidos en los contextos geológicos definidos de relevancia internacional, se definen como territorios o zonas de cierto tamaño con características geológicas singulares (científicas, didácticas y/o turísticas) que, por su carácter único y representativo, forman parte del patrimonio geológico de una región (García Cortés y Carcavilla, 2009). En España, estos LIG se encuentran recogidos en el IELIG, cuya base de datos gestiona y mantiene actualizada el Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC.

Además, desde una óptica internacional, ha aparecido hace pocos años la figura de Geoparque Mundial de la UNESCO (GpMU), que no es, en sentido estricto, una figura para la conservación. Los GpMU son territorios con límites espaciales claramente definidos, que albergan un patrimonio geológico de relevancia internacional, usado como base de su desarrollo socioeconómico sostenible. Son reconocidos como GpMU, dentro del Programa Internacional de Ciencias de la Tierra y de los Geoparques de la UNESCO. Ensayos de la estrecha relación entre los GpMU y las cavidades kársticas en España son los trabajos de Martín-Pinto *et al.* (2018) y Ballesteros *et al.* (2021).

En el caso particular del análisis de la relación entre el patrimonio geológico, espacios protegidos y los terrenos kársticos, atendiendo tanto a su naturaleza exokárstica como endokárstica, se han llevado cabo aproximaciones desde diferentes puntos de vista, tanto en España (Durán y Robledo, 2002; Carcavilla *et al.*, 2014; Carcavilla *et al.*, 2016; Ballesteros *et al.*, 2019), como a escala global (Williams, 2008). Adicionalmente, Robledo *et al.* (2009) establecieron las bases para la protección de los hábitats comunitarios relacionados con las cuevas no habilitadas para su visita turística, de acuerdo con la directiva europea Hábitats.

La mayor parte de los LIG de tipología kárstica se vinculan en España con la unidad geológica representativa número 8 ("Sistemas kársticos en carbonatos y evaporitas") y con el contexto geológico de relevancia mundial número 3 ("Sistemas kársticos en carbonatos y evaporitas de la Península Ibérica y Baleares"), contemplados en el Anexo VIII (Geodiversidad del territorio español) de la Ley 42/2007. Un cierto número de los LIG incluidos en el inventario, con interés principal geomorfológico y/o hidrogeológico, son cuevas, consideradas cada una de ellas como un LIG singular. Sin embargo, en la legislación española no se contempla ninguna figura específica de protección relativa a las cuevas, a excepción de la normativa de la Comunidad Valenciana, que con carácter general considera las cuevas como espacios protegidos (Desdentado, 2024).

Recientemente, la Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst (SEDECK) ha impulsado la figura (todavía no bien definida) de Lugar de Interés Espeleológico (LIE), siendo el GpMU Sobrarbe-Pirineos el primer enclave distinguido con esta "etiqueta", justificada por la importancia de sus áreas kársticas y por las numerosas cavidades que alberga.

Un elemento común de todos los conceptos citados hasta el momento, relacionados con el patrimonio geológico y de las definiciones que los desarrollan es la consideración de ámbitos y territorios relativamente amplios, coherentes con las visiones patrimoniales a macro y meso escala. Sin embargo, existe una ausencia casi absoluta de un marco lógico, conceptual y terminológico para la denominación, identificación, conservación y uso sostenible del patrimonio geológico a microescala, objetivo fundamental de este trabajo.

Micro Lugares de Interés Geológico y Elementos Destacados de Interés Geológico

Existen LIG en los que se pueden identificar unidades de menor tamaño que poseen un especial interés en relación con el conjunto identificado. Es decir, una cueva en su totalidad puede haber sido incluida en un inventario como un LIG, sin embargo, en su interior pueden existir algunos enclaves concretos que concentren determinados valores geológicos que destaquen claramente sobre el resto. Algunos ejemplos pueden ser algunas zonas determinadas de la cavidad, como una sala con morfologías características, un depósito sedimentario detrítico con estructuras sedimentarias notables o un conjunto de espeleotemas excepcionales. Pero también pueden encontrarse ciertos elementos puntuales, especialmente destacables y susceptibles de ser individualizados respecto al entorno inmediato circundante, al conjunto de la cavidad, e incluso en relación con la región kárstica o el territorio de mayor extensión donde se ubique.

Partiendo de estas premisas se ha considerado de interés la propuesta de dos nuevos términos relacionados con el patrimonio geológico: los Micro Lugares de Interés Geológico (abreviado como μ LIG) y los Elementos Destacados de Interés Geológico (abreviado como EDIG). Ambos términos serían aplicables tanto para el patrimonio geológico en general, como para el patrimonio subterráneo en particular. En este trabajo se presentan estos términos aplicados concretamente al endokarst, es decir, a las cavidades kársticas.

Los μ LIG son espacios con una delimitación concreta, con tamaño reducido, por lo general de escala métrica a heptométrica, que concentran un conjunto de elementos geológicos constitutivos o representativos de un determinado interés, (por ejemplo, geomorfológico, sedimentológico, tectónico, paleontológico, etc).

Los EDIG son, en cambio, unidades puntuales concretas, en los que, aunque su tamaño relativo es reducido (escala, por lo general, de centimétrica a decamétrica) no es este el criterio diagnóstico. Sobresalen por la singularidad o representatividad respecto a su entorno. Esta singularidad puede estar referida al entorno inmediato, o a un área más amplia, desde la escala del LIG, hasta la escala regional, nacional o incluso internacional. Los Elementos Destacados pueden ser tanto inmuebles (es decir estar ubicados *in situ*) como muebles, como en el caso de que los que hayan sido trasladados a centros de interpretación, museos o colecciones (en general, cualquiera que esté *ex situ*).

El concepto de μ LIG podría ser comparado con alguna de las figuras contempladas en el corpus legislativo autonómico español, relativo a los espacios naturales protegidos, como es el caso de las Microrreservas de Flora de la Comunidad Valenciana, que han sido un éxito en la política de conservación de esta Comunidad Autónoma. Se crearon en 1994, mediante el Decreto 218/1994 de la Generalitat Valenciana, que establece la base legal para la protección estricta de la vegetación y los sustratos. Se definen como zonas protegidas de una extensión máxima de 20 hectáreas, de elevado interés botánico, destinadas al seguimiento y conservación de plantas endémicas, raras o amenazadas y las comunidades vegetales que las habitan. En la actualidad existen 312 Microrreservas, cada una con una ficha de inventario y su correspondiente delimitación cartográfica. Aunque en este caso la extensión máxima pueda parecer relativamente amplia, hay que verlo desde la óptica de las dimensiones habituales de las masas vegetales protegidas mediante las figuras de protección habituales. Además, en este caso, el interés de la protección de

las microrreservas se centra en las pequeñas poblaciones de especies singulares, diferenciables de la masa forestal.

De la misma manera, existen inventarios de algunos “elementos” botánicos individuales. Un caso muy extendido son los denominados árboles singulares, contemplados en algunas legislaciones autonómicas, como la legislación de la Comunidad de Madrid, Decreto 18/1992. Un árbol singular (a veces llamado también monumental, notable, sobresaliente, excepcional o veterano) es aquel que destaca por su tamaño, forma, edad, rareza, origen biológico, estado de conservación, belleza o valores etnográficos. Estos árboles pueden, en algunos casos, estar protegidos por normativas específicas, bien locales, regionales o estatales.

En la figura 1 se ha querido representar de manera sintética algunas de las posibles relaciones espaciales de los conceptos relativos al patrimonio geológico citados en este trabajo hasta el momento.

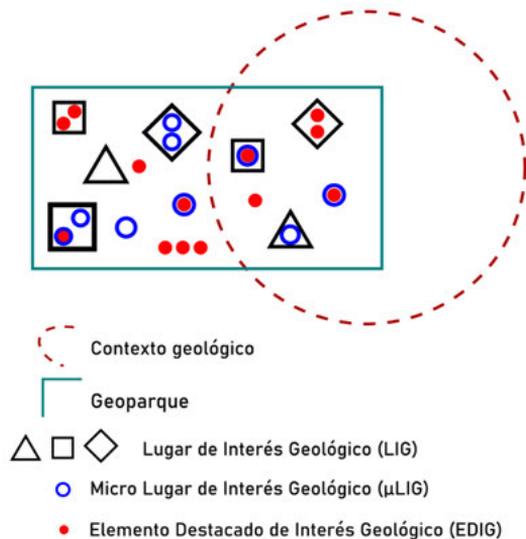


Figura 1. Relaciones espaciales entre los diferentes conceptos referidos a la definición del patrimonio geológico

Como puede observarse, pueden existir μLIG o EDIG dentro o fuera de Lugares de Interés Geológico incluidos en el Inventario. También podrían estar dentro o fuera de las figuras de mayor rango, como los Geoparques o los contextos geológicos, aunque por claridad no se han representado fuera de estos. En definitiva, los μLIG y los EDIG no tienen por qué encontrarse dentro de otras figuras de identificación del patrimonio geológico de menor escala, ya que constituyen figuras propias con independencia de su posición jerárquica.

En la figura 2 puede verse la aplicación estructurada de manera jerárquica en función de la escala de estos mismos conceptos, aplicados al caso concreto de una cueva ubicada en un GpMU representativo del Contexto Geológico incluido en la Ley 42/2007 relacionado con el karst.

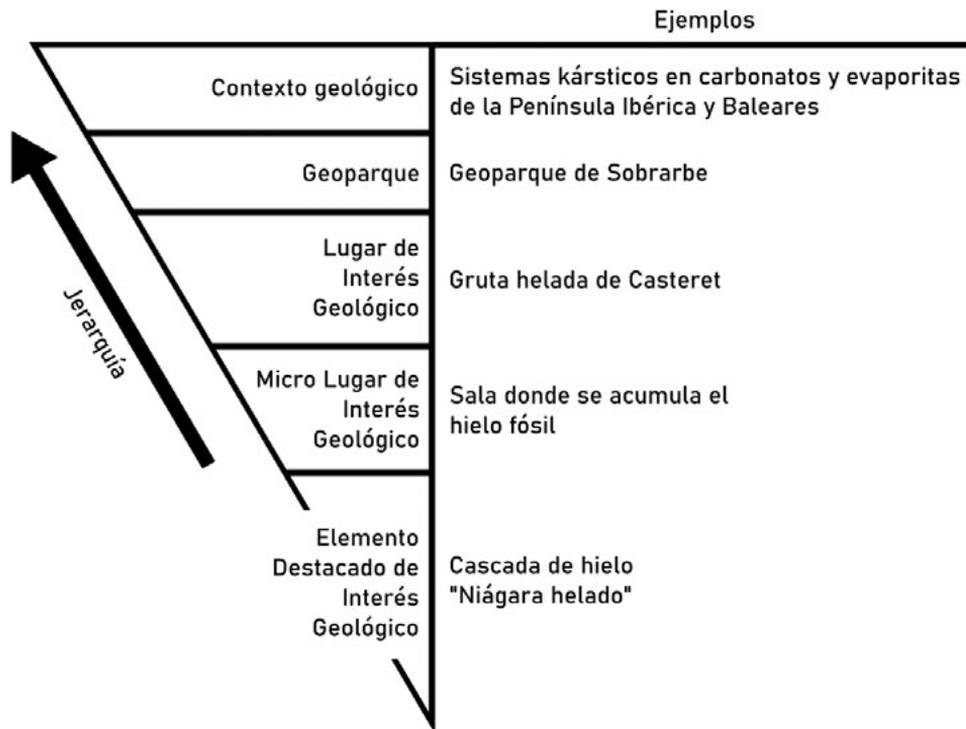


Figura 2. Ejemplo de la jerarquización de los diferentes conceptos y escalas del patrimonio geológico aplicado a un caso concreto relacionado con el karst

Por otra parte, en la legislación española de Espacios Naturales Protegidos se encuentra la figura de Monumento Natural, que ha sido utilizada con cierta frecuencia para la protección de LIG relacionados con el karst y para otros. No obstante, consideramos que en el caso de los elementos geológicos kársticos esta figura no se ha utilizado con un criterio estandarizado, pues en ocasiones se ha protegido una cavidad completa designada como LIG (como en el caso de la Cueva de las Ventanas de Píñar, en Granada), en otras solo una parte de un LIG (como la Cueva de Hundidero, una de las bocas del sistema espeleológico Hundidero-Gato, en Málaga), o incluso se ha utilizado también para elementos geológicos aislados de pequeño tamaño (como el denominado Tornillo del Torcal de Antequera, Málaga).

De igual manera, también pueden ser identificados tanto μLIG como EDIG en otros ámbitos protegidos cuyo interés principal es distinto del geológico, por ejemplo, en Bienes de Interés Cultural o en Zonas Arqueológicas, así como en áreas protegidas de interés fundamental biológico o ecológico. Este caso se da en muchas cuevas con registro arqueológico o paleontológico, protegidas directamente en base a la legislación relativa al patrimonio cultural, en las que se deberían desarrollar este tipo de inventarios, con el objetivo de no excluir el patrimonio geológico que presentan. Desde el punto de vista práctico, el uso de estos términos mediante el desarrollo de los correspondientes inventarios en cuevas (turísticas o no) pueden ser herramientas muy

útiles para identificar, catalogar, proteger, poner en valor, divulgar y gestionar el patrimonio geológico subterráneo de una cavidad o de una unidad geológica mayor donde esta se incluya.

El caso de la Cueva de las Estegamitas

La Cueva de las Estegamitas es una cavidad kárstica descubierta en el año 2021 en una cantera activa que proporciona caliza para una fábrica de cemento. Tanto la cantera como la fábrica se encuentran en el sector oriental del término municipal de Málaga, en la barriada de La Araña (figura 3). Se pueden encontrar más detalles del descubrimiento de la cueva y sus características en Durán Laforet *et al.* (2023).

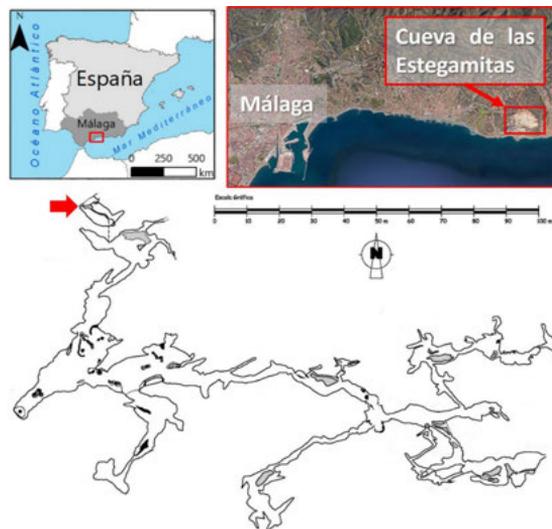


Figura 3. Situación de la Cueva de las Estegamitas y su topografía. La flecha roja indica la posición de la entrada artificial. Topografía del GES de la SEM (2022)

La fábrica se abastece de calizas del Jurásico, pertenecientes a la cobertera del Complejo Maláguide de la Cordillera Bética. En este afloramiento calizo, de pequeño tamaño, denominado como Cantal Chico, o de La Araña, los carbonatos presentan una disposición olistostrómica y una morfología actual en rasas marinas y paleoacantilados, presentando varios niveles de cavidades litorales asociadas a distintas posiciones relativas del nivel del mar durante el Pleistoceno.

Una de estas cavidades, situada en una de las rasas intermedias (ca. 80 m s.n.m.) es la Cueva de las Estegamitas. La cavidad, de tipo *flank margin cave*, se encontraba intacta hasta que una boca artificial se abrió en 2021 como consecuencia de las actividades rutinarias de la cantera. Presenta una morfología relativamente laberíntica, con alrededor de 1.300 metros de desarrollo. En el año 2022, un equipo multidisciplinar de científicos y espeleólogos pudo acceder a la cueva y estudiarla durante un corto periodo de tres meses (de abril a junio de 2022).

Entre las actividades que se llevaron a cabo en dicho periodo, estuvieron la realización de topografías (tradicional y 3D), así como el empleo de nuevas técnicas de modelización tridimensional y láser (Ruiz Tejada et al., 2022), la monitorización de los parámetros ambientales de la cavidad (Ojeda et al., 2023) y la determinación de algunos aspectos geomorfológicos de la cavidad (Durán Laforet et al., 2022a). Además, los trabajos permitieron determinar el excepcional valor de la cavidad y de su contenido, debido fundamentalmente a la existencia de un amplio conjunto de espeleotemas singulares que se encuentran en varios lugares de la cueva, las estegamitas (Durán Laforet et al., 2022b), cuya importancia destaca en el panorama internacional (Durán Laforet et al., 2023; Durán-Valsero et al., 2024).

Debido a la gran cantidad de lugares y elementos altamente singulares, con un excelente estado de conservación, distribuidos por toda la cavidad, se consideró conveniente el ensayo de una actividad novedosa: la identificación, el inventariado y la documentación de los μ LIG existentes en el interior de la cueva. Para ello, se diseñó una metodología específica, basada fundamentalmente en una inspección exhaustiva de la cavidad, la construcción de una ficha de inventario fácilmente rellenable por cualquier persona del equipo de trabajo, y el tratamiento posterior de los datos obtenidos.

En la Cueva de las Estegamitas se identificaron varios cientos de μ LIG y EDIG, aunque por las limitaciones temporales del estudio, sólo se realizaron 50 fichas de inventario de μ LIG, como prueba conceptual.

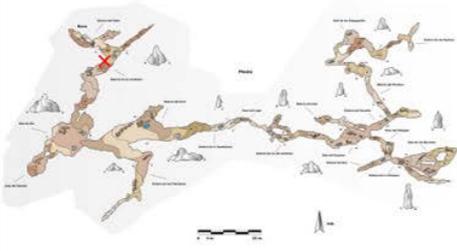
La ficha de inventario (figura 4) se estructura en 11 apartados, ordenados en 4 bloques. El primero de estos, correspondiente a los apartados 1 y 2 es igual para todos los μ LIG de una misma zona, en este caso de la Cueva de las Estegamitas, ya que en estos primeros apartados se establecen los datos generales de la cavidad y algunos datos geográficos y geológicos. Los apartados 3 y 4 se corresponden con la información del μ LIG en sí. En estos apartados se establecen las características más relevantes, como la tipología, descripción y una justificación de su importancia. En el apartado 4 se recogen aspectos relativos a la vulnerabilidad y a la fragilidad. En el siguiente bloque se establece la ubicación del μ LIG, así como varios aspectos relativos a su protección y potencial puesta en valor. Finalmente, se añaden fotografías, observaciones (si las hay), y la autoría y fecha de la ficha de inventario.

Del análisis estadístico de las fichas se desprende que existe una importante variedad tipológica de μ LIG (figura 5), donde los espeleotemas son predominantes, seguidos de las morfologías erosivas. Una de las características de este inventario es que es abierto, susceptible de revisiones y actualizaciones periódicas, vinculadas a nuevas exploraciones y descubrimientos.

Una vez realizado un detallado análisis de los resultados del ensayo conceptual, se observó la necesidad de diferenciar más claramente lo que es un μ LIG *sensu stricto* de lo que es un EDIG. Esta necesidad de diferenciación se fundamentó *básicamente en las consideraciones necesarias para* la delimitación espacial de los elementos geológicos (a veces un μ LIG es de dimensiones prácticamente centimétricas) y en el hecho de que muchos elementos identificados eran puntuales, y en la conveniencia de establecer unos rangos de diferente posición conceptual jerárquica, como se ha indicado anteriormente.

FICHA DE INVENTARIO	
Micro Lugares de Interés Geológico en Cuevas (μLIG)	
CÓDIGO: CP-01 // μLIG-16	
1. DATOS DE LA CAVIDAD	
Nombre de la cavidad: Cueva de la Cantera Principal 1 / Cueva FYM	
Término Municipal entrada principal: Málaga	
Provincia: Málaga	
Comunidad Autónoma: Andalucía	
Tipo de cueva:	
<input checked="" type="checkbox"/> Cueva <input type="checkbox"/> Sima <input type="checkbox"/> Abrigo <input type="checkbox"/> Otro	
Desarrollo y profundidad: 750 metros // -30 metros	
Génesis de la cavidad:	
<input type="checkbox"/> Epigénica <input checked="" type="checkbox"/> Hipogénica <input type="checkbox"/> Otro	
2. DATOS GEOLÓGICOS	
Mapa 1.50.000 del MAGNA: 1053 - MÁLAGA	
Litología en la que se abre: Carbonática (Calizas)	
Masa de agua subterránea: -----	
Edad geológica: Jurásico	
Edad de la formación (si se conoce): -----	

3. DATOS DEL MICROLUGAR DE INTERÉS GEOLÓGICO
Nombre del μLIG: Conjunto de Cúpulas de la Galería del Cruce
Ubicación en el entorno inmediato:
<input type="checkbox"/> Pared <input type="checkbox"/> Techo <input type="checkbox"/> Suelo <input checked="" type="checkbox"/> Mixto
Tamaño aproximado: Métrico (2 metros)
Color: Amarillento
Tipología:
<input checked="" type="checkbox"/> Forma erosiva <input type="checkbox"/> Espeleotema <input type="checkbox"/> Sedimento <input type="checkbox"/> Sección <input type="checkbox"/> Sala <input type="checkbox"/> Galería <input type="checkbox"/> Pozo <input type="checkbox"/> Elem. Geoarqueológico <input type="checkbox"/> Otro
Descripción: Conjunto de cúpulas erosivas desarrolladas a lo largo de una misma dirección, tanto en pared como en techo
Importancia: Las cúpulas se encuentran alineadas a lo largo de una dirección, cuyo sentido ascendente nos indica la paleodirección y el sentido del fluido que las generó, así como la dirección general de flujo (N-S)
4. VULNERABILIDAD/FRAGILIDAD
¿Es visible fácilmente? <input checked="" type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
¿Está situado en zona de paso? <input checked="" type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
¿Por su naturaleza es fácilmente degradable? <input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No
Estado del μLIG:
<input checked="" type="checkbox"/> Bien conservado <input type="checkbox"/> Con algunas alteraciones <input type="checkbox"/> Deteriorado <input type="checkbox"/> Muy deteriorado

5. UBICACIÓN EN LA TOPOGRAFÍA DE LA CUEVA

6. NECESIDAD DE PROTECCIÓN
¿Posee protección "natural"? <input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No
¿Necesita alguna acción para su protección? <input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No
En caso afirmativo, qué tipo:
7. POSIBILIDAD DE "PUESTA EN VALOR"
Si fuese visitable:
¿Se podría mostrar fácilmente a los visitantes? <input checked="" type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
¿Necesitaría alguna infraestructura? <input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No
En caso afirmativo, qué tipo:

8. FOTOGRAFÍA DEL μLIG

9. ARCHIVOS ADICIONALES (FOTOS/VIDEOS)
10. OBSERVACIONES
11. AUTORÍA Y FECHA
Sergio Durán Laforet- 08/06/22

Figura 4. Modelo de la ficha utilizada en el inventario de Micro Lugares de interés geológico de la Cueva de las Estegamitas

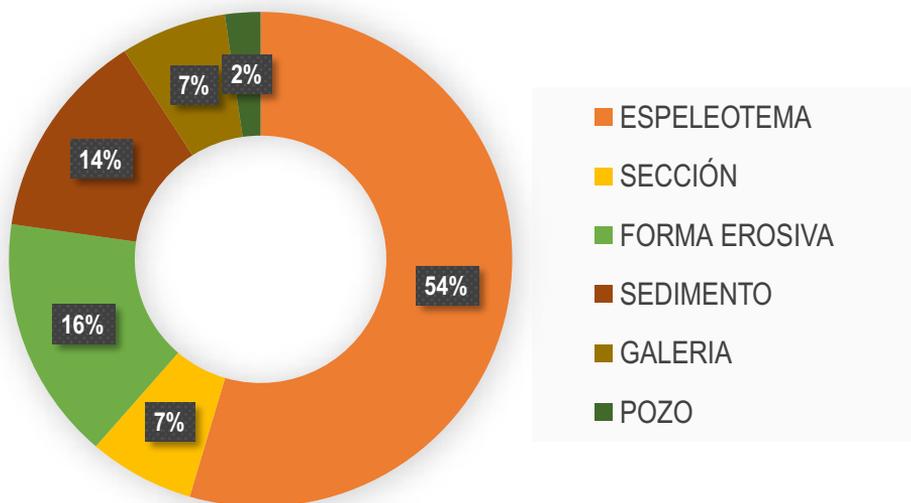


Figura 5. Tipologías de los Micro Lugares de Interés Geológico (μ LIG) de la Cueva de las Estegamitas

Siguiendo este criterio, la mayoría de las fichas de inventario realizadas deberían revisarse en el futuro, y re-denominarse con el término EDIG, ya que se refieren estrictamente a elementos singulares. Por el contrario, aquellos elementos geológicos que representan secciones, galerías, pozos, conjuntos de espeleotemas, formas erosivas o depósitos sedimentarios, deberán ser considerados como μ LIG en sentido estricto. Algunos de ellos engloban uno o varios EDIG en su interior.

Por otra parte, la Cueva de las Estegamitas ya ha sido incluida en el Inventario del IGME-CSIC de Lugares de Interés Geológico como una cavidad en su conjunto, así como su entorno inmediato, con el código BE008 (Geosite SK017) y puede consultarse la información al respecto en el visor web de dicho organismo (<https://info.igme.es/ielig/>).

Conclusiones

Tras el análisis de los conceptos existentes en relación con el patrimonio geológico se ha identificado un “hueco” conceptual relacionado con la inexistencia de términos aplicables a los elementos geológicos identificados a microescala, es decir a una escala de mayor detalle que la habitual aplicada a los Lugares de Interés Geológico.

Para cubrir ese “hueco” se han propuesto dos nuevos términos conceptuales, los Micro Lugares de Interés Geológico (μ LIG) y los Elementos Destacados de Interés Geológico (EDIG).

Después de la realización de un ensayo metodológico de inventario de μ LIG llevado a cabo en la Cueva de las Estegamitas, se ha concluido que es conveniente el uso de estos dos nuevos términos: los Micro Lugares de Interés Geológico (μ LIG) y los Elementos Destacados de Interés

Geológico (EDIG), diferenciables entre sí por su escala y, sobre todo, por la consideración o no de la unicidad (un único elemento) como criterio diagnóstico.

En la legislación actual existen figuras parecidas en otros ámbitos, como el botánico, que son semejantes a los aquí propuestos (Microrreservas de flora, árboles singulares), cuya aplicación desde hace décadas ha sido un éxito. Estos términos demuestran que es conveniente identificar y caracterizar figuras y elementos de mayor detalle que los contemplados habitualmente en las diversas normativas sectoriales de conservación.

Partiendo de la definición de estos términos, estas figuras pueden ser aplicables al patrimonio geológico en general, y al patrimonio subterráneo en particular, tanto en cuevas habilitadas al turismo, como en aquellas que se encuentren en estado natural.

Se considera que en las cuevas habilitadas para su vista turística es necesario y urgente la realización de inventarios de μ LIG y de EDIG. Muchos son altamente vulnerables y necesitan protección y actuaciones de geoconservación. En definitiva, se trata de proteger, gestionar adecuadamente, poner en valor e introducir el patrimonio geológico subterráneo a microescala en el discurso explicativo y divulgativo de las cuevas turísticas.

Agradecimientos

Al equipo de exploración e investigación de la Cueva de las Estegamitas, compuesto por integrantes del Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga y personal científico y técnico de la Universidad de Málaga y del IGME-CSIC.

Referencias

- Ballesteros, D., Adrados, L., Pérez-Cáceres, I., Vila, R., Mampel, L., Pérez-Mejías, C., Mir, X., Casillas, R., Sánchez, J.A., Serna, A., Martín-Pérez, A. 2021. *Las cuevas y el karst, un viaje a través de los geoparques españoles*, UNESCO, 115 pp.
- Ballesteros, D., Fernández, E., Carcavilla, L., y Jiménez, M. 2019. Evaluación patrimonial de cuevas kársticas para su gestión en espacios protegidos: Parque nacional de los Picos de Europa (N de España). En E. Martín González, J. J. Coello, y J. Vegas: *El Patrimonio Geológico: Una nueva visión de la tierra*, pp. 35-40. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Carcavilla, L., Belmonte, A., Durán, J.J., López-Martínez, J. y Robledo, P.A. 2016. Patrimonio geológico y geodiversidad en terrenos kársticos en España. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24-1, pp. 61-73.
- Carcavilla L., López Martínez, J. y Durán, J.J. 2007. *Patrimonio Geológico y Geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 360 pp.
- Carcavilla, L., Durán, J.J., Vázquez, A. y Vázquez-Navarro, J. 2014. Patrimonio geomorfológico: conservación y gestión de los edificios y paisajes tobáceos. En: González J.A. y Amuchastegui, M.J. *Las tobas en España*. Sociedad Española de Geomorfología, pp. 339-348.
- Carcavilla, L. y Palacio, J. 2011. *Proyecto Geosites: aportación española al patrimonio geológico mundial*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, 231 pp.
- de Lima, F.F., Brilha, J.B. y Salamuni, E. 2010. Inventorying Geological Heritage in Large Territories: A Methodological Proposal Applied to Brazil. *Geoheritage*, 2, pp. 91–99.

- Desdentado, E. 2024. La protección jurídica de los ecosistemas subterráneos: un mundo de oscuridades. La protección jurídica de los ecosistemas subterráneos: un mundo de oscuridades. *Ecosistemas*, 33(2).
- Durán, J.J. y Robledo, P.A. 2002. Karst y Patrimonio Natural. En: Carrasco, F., Durán, J.J. y Andreo, B. (Eds.). *Karst and Environment*. Fundación Cueva de Nerja, Málaga, pp. 261-266.
- Durán Laforet, S.R., Durán Valsero, J.J., Morales García, R. y Robledo Ardila, P. 2022a. Mapas y cortes geomorfológicos, elementos clave de la divulgación geológica en cuevas turísticas. VIII Congreso Español sobre Cuevas y Minas Turísticas, En: J.M. Calaforra y J.J. Durán (eds.), *Minas y Cuevas: Patrimonio Geológico y Turístico*, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. Pulpí (Almería), pp. 59-70.
- Durán Laforet, S.R., Durán Valsero, J.J., Morales García, R., Sánchez Pérez, J.E. y Vadillo, I. 2023. La cueva de las Estegamitas (La Araña, Málaga). Una cavidad karstica única en el mundo. *Péndulo*, XXXIV, pp. 90-105.
- Durán Laforet, S.R., Durán Valsero, J.J., Sánchez Pérez, J.E. y Vadillo Pérez, I. 2022b. 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. CUEVATUR. VII Congreso Español sobre cuevas y minas turísticas. En: Calaforra, J.M. y Durán J.J. (Eds.) *Minas y Cuevas: Patrimonio geológico y turístico*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. Pulpí (Almería), pp.71-83.
- Durán-Valsero J.J., Durán-Laforet S.R., Morales-García R., Vadillo I., Ojeda L. and Sánchez-Pérez, J.E. 2024. A karstic cave with and exceptional geological value: Cueva de las Estegamitas (Málaga, Southern Spain). *4th Eurokarst: The European Conference on karst landscape and carbonate reservoirs*. Rome, Italy.
- Durán J.J. y Robledo, P.A. 2009. Carbonate and evaporite karst system in the Iberian Peninsula and Balearics Islands. En: A. García Cortés (Ed): *Spanish geological frameworks and geosites: an approach to Spanish geological heritage of international*. Instituto Geológico y Minero de España. 200-214.
- García Cortés, A. (Ed.) 2008. *Contextos Geológicos españoles: una aproximación al patrimonio geológico español de relevancia internacional*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 235 pp.
- García-Cortés, A. y Carcavilla, L. 2009. *Documento metodológico para la elaboración del inventario español de lugares de interés geológico (IELIG)*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 61 pp.
- Martín-Pinto, E., Robledo Ardila, P.A., Moreno García, J., Bujanow, F. y Vadillo Pérez, I. 2018. Geoparques y cuevas: propuesta para el desarrollo de espacios naturales protegidos en el subsuelo en el marco de la UNESCO. En: Robledo, P.A y Durán, J.J. (Eds.) *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. CUEVATUR 2018, La Vall d'Uixó, Castellón. pp.131-140.
- Ojeda Rodríguez, L., Vadillo Pérez, I., Durán Laforet, S., Durán Valsero, J.J., Cañete Hidalgo, S. y Morales García, R. 2023. Control de parámetros ambientales en la Cueva de las Estegamitas: la zona no saturada del conjunto carbonático del Cantal Chico (Málaga). *XI Simposio sobre el Agua en Andalucía*, Club del Agua Subterránea, Granada.
- Robledo, P.A., Durán, J.J., Garay, P. y Gracia, J. 2009. 8310 Cuevas no explotadas por el turismo. En: VV.AA., *Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España*. Madrid, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 53 pp.
- Ruiz Tejada, M.A., Criado Valdés, M., Durán Valsero, J.J., Durán Laforet, S.R., Morales García, R. y Pardo Igúzquiza, E. 2022. Documentación geométrica tridimensional mediante métodos avanzados en cavidades complejas: el caso de la Cueva de las Estegamitas (La Araña, Málaga). VIII Congreso Español sobre Cuevas y Minas Turísticas. En: Calaforra, J.M. y Durán J.J. (Eds.) *Minas y Cuevas: Patrimonio Geológico y Turístico*, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. Pulpí (Almería), pp. 567-579.
- Williams, P. 2008. *World Heritage Caves and Karst. A thematic Study*. IUCN Repport, 34 pp. + 2 tablas.
- Wimbledon W.A.P. 1996. Geosites—a new conservation initiative. *Episodes*, 19 (3), pp. 87–88.

Comentarios jurídicos sobre la Cueva de Pozalagua (Karrantza, Bizkaia)

Moreno, J.

Letrado del Gobierno Vasco. Espeleólogo de ADES Espeleología Elkarte de Gernika

Resumen

Se abordan aquí dos cuestiones de índole jurídica sobre la cavidad de Pozalagua, un bien natural que ha estado afecto a la normativa minera, precisamente actividad que la descubrió, y que en la actualidad es un recurso turístico. El primer aspecto se refiere a su titularidad y se aborda con la finalidad de verificar, por un lado, si esta cavidad es un bien de dominio público o privado y, por el otro, quien ostenta su propiedad. La segunda cuestión se dirige a identificar el régimen jurídico que gobierna la cueva, esto es, qué reglas y normas se aplican en ese espacio subterráneo.

En relación con el primero de estos aspectos, se advierte que el objetivo no es emitir un dictamen u opinión jurídico sobre la cuestión, sino realizar un repaso por las diversas alternativas y apostar, quizá osadamente, por una de ellas con la información disponible. Para ello, se empieza recordando que la propiedad del suelo no se contagia a la del subsuelo, en aplicación de una doctrina no unánimemente aceptada de la "estratificación de la propiedad", y se desecha cualquier naturaleza pública, particularmente la de dominio público minero. Como bien de dominio privado, son tres los posibles titulares: a) el titular de la explotación minera, concluyendo que éste no puede ser por haber abandonado legalmente el bien inmueble; b) el Estado, al adquirirlo por ministerio de la ley en cuanto bien abandonado por la minería; o c) el Ayuntamiento de Karrantza por usucapición, esto es, habiéndolo adquirido a título privado por su posesión continuada durante el ejercicio de la actividad turística. Este trabajo apoya esta última opción, siempre basado en los datos accesibles públicamente y sin perjuicio de los posibles conflictos que pudieran surgir.

En cuanto a su régimen jurídico, son cuatro, al menos los regímenes legales que se han de respetar en los usos a desarrollar en esta cavidad. El primer proviene de la normativa del suelo, régimen al que se somete por encontrarse Pozalagua en terrenos en situación básica de suelo rural a los efectos de la normativa estatal de suelo y, a su vez, estar en suelo clasificado no urbanizable a efectos urbanísticos. El segundo tiene su origen en el derecho de turismo, en cuanto que este es el uso al que se ha destinado el bien. Los dos últimos regímenes provienen del derecho de protección de la naturaleza, uno es el régimen general que el derecho vasco ambiental ofrece a las cuevas y el otro, más concreto, por ser una cavidad que está bajo la regulación de dos figuras vascas de Espacio Natural Protegido que son la de Parque Natural y la de Red Natura 2000. Para cada régimen, la normativa y el gestor es diferente, por lo que se insiste en la necesidad de adoptarse medidas de coordinación para compatibilizar todos estos usos a los que sirve la cueva de Pozalagua.

Palabras claves: bien natural, destino y usos del suelo, dominio público, estratificación de la propiedad, propiedad, régimen jurídico, uso minero, uso turístico.

Introducción

Con el ánimo de alentar a una necesaria discusión aun no solventada con la debida seguridad jurídica, se esbozan aquí unas notas sobre dos cuestiones de índole legal en relación con la cueva de Pozalagua: su titularidad o propiedad y su régimen legal.

Este análisis, sujeto a la existencia de otros documentos o información no difundidos sobre la cavidad, parte de los datos conocidos de su realidad física¹ y jurídica. Pozalagua es una cavidad

1 Datos obtenidos de Wikipedia. Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Cueva_de_Pozalagua

que fue descubierta el 28 de diciembre de 1957 a raíz de la intercepción de las galerías naturales por unas voladuras de la empresa minera Dolomitas del Norte S.A. realizadas bajo una licencia minera obtenida en 1956. Tras el hallazgo, se modificaron los planes de explotación de la mercantil, dirigiendo la extracción hacia otro lado, y sacando de los límites de la explotación los terrenos en los que se encontraba la cueva. En 1976, la mercantil vio extinguidos sus derechos mineros tras la decisión municipal de no renovar la concesión.

Desde 1991, la cavidad ha sido objeto de explotación turística promovida desde instancias locales, siendo el elemento paisajístico su principal valor natural de reclamo, y con notable éxito, convirtiéndose en un punto referente del turismo en Bizkaia. En 2013, la Cueva de Pozalagua fue elegida “El Mejor Rincón 2013” de la Guía Repsol.

En 2006 pasó a formar parte del Parque Natural de Armañón. El decreto de declaración reparó expresa y singularmente en la importancia de Pozalagua, reconociendo que esta cavidad es uno los elementos de mayor interés geológico de la CAPV y el punto de mayor interés por su uso público en todo el ámbito.

Posteriormente, en 2016, el ámbito fue designado Zona Especial de Conservación Armañón, figura de protección de la Red Natura 2000, aunque con menor incidencia para la cueva de nuestro interés, ya que este instrumento europeo fija su atención en los hábitats de cuevas *no explotadas* por el turismo (HIC 8310), requisito que incumple la cueva Pozalagua.

Desde estas premisas, y con el principal objetivo de llevar a una reflexión, nos acercamos a los criterios para tener en cuenta para dar una respuesta a esas dos preguntas.

¿A quién pertenece la Cueva de Pozalagua?

A esta primera cuestión no podemos aquí ofrecer una respuesta definitiva ni concluyente. No nos consta un reconocimiento documental oponible a terceros de su titularidad, como bien pudiera ser una escritura de dominio o su inscripción registral. Pero, aun en inciertas condiciones, pasamos a realizar una aproximación con un carácter más académico que práctico.

En primer lugar, con carácter general, se descarta aquí que el propietario de la finca superficial sea el propietario del subsuelo por el mero hecho de encontrarse bajo sus lindes. Actualmente, la doctrina acoge de forma prácticamente unánime la estratificación de la propiedad², esto es, se admite que la extensión de un terreno en su dimensión vertical inferior no alcanza “hasta los infiernos”³, sino que es de alcance limitado y pueden coexistir fincas superpuestas, cada una de ellas con distinto propietario, régimen legal, destinos o aprovechamientos urbanísticos atribuidos por el urbanismo, por citar algunas de sus características jurídicas. En suma, la titularidad de la cueva no está indisolublemente unida a la situación de la finca o fincas suprayacentes en la superficie y la cueva puede ser una finca independiente de la superior.

2 *También se conoce como superposición de propiedades (art. 26.4 TRLSRU) o propiedad volumétrica.*

3 *El brocado cuius est solum eius est usque ad coelum et ad inferos no pertenece al derecho romano, sino que fue acuñado por un posglosador del siglo XIII, y no ha sido refrendado por los ordenamientos jurídicos.*

En el caso de Pozalagua, se ha de observar este aspecto para las dimensiones vertical y horizontal. En la dimensión vertical (figura 1), atendiendo a esta doctrina, la superficie corresponde con una finca y en la cueva con otra. En la dimensión horizontal (figura 2), donde se observa exclusivamente la situación legal de la superficie, el visor catastral de la Diputación Foral de Bizkaia muestra una única finca catastral sobre cueva, cantera y un amplio espacio circundante, aunque, cuando entra al detalle de las subparcelas ahí existentes, están separadas la explotación de la cantera y los terrenos superiores de la cavidad están en espacios separados, por lo que, sin más información, se puede deducir que los terrenos de la antigua cantera de dolomía no incluyen bajo su superficie a la cueva.

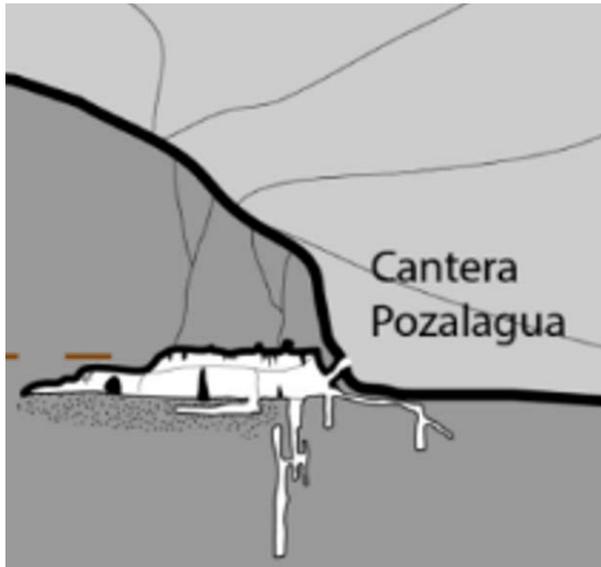


Figura 1. Corte del terreno obtenido de la última topografía 3D realizada por la UPV/EHU, donde se recoge en la vertical la cavidad y el lidar del terreno obtenido de IDE de Euskadi (geoeuskadi). La superficie es una finca, con el alcance hacia el subsuelo que sea preciso para satisfacer los intereses de los usos ahí realizados; la cueva del interior, por el otro lado, es otra finca. Fuente: VVAA, *La Torca del Carlista*, ed. Enbata Elkartea, 2016, Bilbao

La segunda aproximación, también general, pasa por negar la condición de dominio público a las cuevas por el simple hecho de encontrarse en el subsuelo. Aunque se encuentra muy extendida la opinión de que todo el subsuelo es dominio público⁴ (y junto a él las cavidades), ello no tiene fundamento jurídico en el derecho minero, ni se ampara en precepto legal o constitucional. La Cueva de Pozalagua no es dominio público únicamente por su situación bajo la superficie terrestre.

Ya en el caso concreto de la Cueva de Pozalagua, y a falta de una mayor profundización en los avatares de la autorización minera durante los veinte años que duró la explotación, desechamos

⁴ Aunque lo apoyan autores de gran trascendencia, como TOMÁS RAMÓN FERNÁNDEZ, apoyándose en la normativa minera, la gran parte de la doctrina que ha estudiado el subsuelo rechaza esta posibilidad, en donde destacan ALEGRE AVILA y MOREU CARBONELL

que sea dominio público minero. Si bien pudiera admitirse que adquirió este carácter con la licencia de 1956, rápidamente hubiese perdido esa condición con la modificación de los planes realizados tras su hallazgo en 1957, donde seguramente se extrajo expresamente la cavidad de la zona a explotar y con ello dejó de formar del yacimiento mineral a extraer. Además, hay que añadir que desde 1976 la concesión minera fue extinguida, y, en el entendido de que no concurre en la cavidad la condición de yacimiento mineral económicamente rentable para su explotación, como requiere la Ley de Minas, no parece defendible que actualmente haya de tener la consideración de dominio público minero.

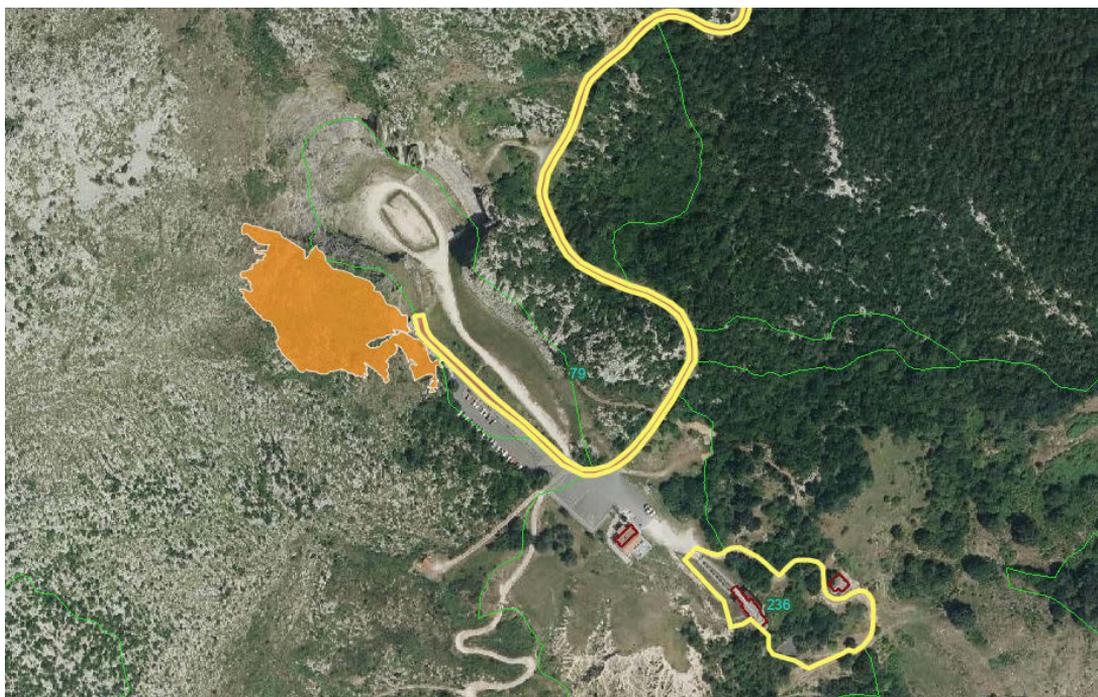


Figura 2. Captura del visor catastral de la Diputación Foral de Bizkaia con la planta de la Cueva de Pozalagua. Se observa que la cueva se encuentra bajo una parcela catastral de gran extensión (022 0002 00079), con varias subparcelas. Se puede comprobar que los terrenos de la antigua cantera (subparcela 039) están separados en la superficie de los terrenos bajo los que encuentra la cueva de Pozalagua (subparcela 02)

Por tanto, en nuestra opinión, la cavidad de Pozalagua no es un bien de dominio público al no encontrar amparo esta posibilidad en ninguna de las leyes estatales que regulan este tipo de bienes.

Descartada su naturaleza pública, hemos de comprobar si puede estar sujeta a un dominio privado. Un posible propietario bajo este régimen es la mercantil Dolomitas del Norte S.A. en su condición de titular de los terrenos en los que se llevó a cabo la explotación. Sin embargo, rechazamos esta posibilidad, aunque un estudio más profundo debiera analizar la cartografía de las autorizaciones mineras concedidas en la vida de la explotación y los registros dominicales

públicos. No obstante, aun admitiendo que la cueva hubiese ostentado derecho de propiedad sobre la cueva, tras la finalización de la explotación en 1976, y transcurrido los plazos previstos en la normativa civil, se puede entender que la empresa ha abandonado legalmente los terrenos y, con ellos, la cavidad (arts. 460, 1936, 1957 y 1959 Código Civil).

Ahora bien, ese abandono legal por la mercantil supondría, sin otras circunstancias concurrentes, que los terrenos ocupados por la cantera hubiesen mutado en bien inmueble vacante por el paso del tiempo. Consecuencia de ello, y ministerio de la ley, la cueva se hubiera convertido en propiedad de la Administración General del Estado en calidad de bien patrimonial o de dominio privado, tal y como dispone el art. 17 de la Ley 33/2003, de 3 de noviembre, del Patrimonio de las Administraciones Públicas. Sin embargo, esta posibilidad no puede ser pacíficamente asumida, porque ha aparecido otra entidad, el Ayuntamiento de Karrantza, realizando actos de posesión notorios sobre la cavidad: su cerramiento, su custodia, su mantenimiento y, sobre todo, su explotación turística.

Por ello, en la teoría que aquí se postula, la propiedad de la cueva corresponde al Ayuntamiento de Karrantza y ello porque, durante todos estos años de explotación del recurso turístico que es la cavidad, ha ostentado su posesión de manera ininterrumpida en concepto de dueño, de forma pública y pacífica, con buena fe y durante un plazo mayor de diez años (arts. 1941 y 1957 Código Civil), adquiriendo con ello la titularidad por usucapión.

Ciertamente, esto no deja de ser un ejercicio teórico, ya que los litigios sobre propiedad son de gran complejidad, como así ha sucedido en casos judicializados de cuevas que son o contienen bienes culturales. Sirvan estas líneas, como decimos, para realizar una simple reflexión al respecto y constatar que cada caso exige de un análisis de las circunstancias concretas.

¿Qué régimen jurídico es aplicable en el interior de la Cueva de Pozalagua?

Mucho más interesante que la cuestión anterior, y de mayor importancia para identificar la protección legal de la cavidad, es concretar su régimen jurídico.

De nuevo, hemos de desechar que la cueva pueda estar sometida de algún modo a la disciplina minera. Si alguna vez lo estuvo, ya no reúne la condición de yacimiento minero a los efectos de la Ley de Minas, ni se encuentra bajo un régimen de intervención bajo autorización vigente otorgada conforme a esa normativa.

En nuestra opinión, son cuatro los regímenes jurídicos que rigen en la cavidad, que pasamos a dejar apuntados.

El primero consiste en una protección general otorgada por la normativa del suelo y urbanismo. La cueva se sitúa en suelos en situación básica de suelo rural conforme al Real Decreto Legislativo 7/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana (TRLSRU), lo que le sujeta a un régimen estricto de uso, constriñendo el haz de facultades e imponiendo deberes a quien quiera que sea su propietario. Así lo recogen los arts. 13, 14 o 21.2 TRLSRU. Aun siendo esta la principal regulación a este particular, tampoco se puede obviar las previsiones de la normativa autonómica urbanística para los suelos clasificados como no

urbanizables (art. 13, 21 o 28 de la Ley 2/2006, de 30 de junio, de Suelo y Urbanismo), o la que pudiera provenir de los instrumentos de ordenación territorial de aplicación a esos terrenos, que, en el caso vasco, no nos consta ninguno (por ejemplo, el PTS agroforestal no rige para el subsuelo ni para las cavidades). Este régimen ha de ser cumplido por el propietario privado que resulte y vigilado por las autoridades urbanísticas, con acción pública para garantizar que cualquier persona pueda exigir el cumplimiento de la normativa. Solo queremos destacar una obligación general derivada de este régimen: la obligación de preservar la cueva en el estado natural en el que se encuentra hasta que los instrumentos legales oportunos dispongan otra cosa.

En segundo lugar, y dado el destino principal al que se dedica la cueva de Pozalagua, se encuentra la normativa de turismo, con gran influencia en el régimen legal de la cavidad. El ejercicio de esta actividad viene regulado en la Ley vasca 13/2016, de 28 de julio, de Turismo, para la que la cueva es indudablemente un recurso turístico (art. 7) y está sujeto en su art. 9 a un “deber de preservación y respeto medioambiental, de forma que las actividades turísticas, en el marco de un desarrollo sostenible, se diseñarán, ejecutarán y promocionarán con sujeción a la normativa de medio ambiente y conservación de la naturaleza, así como a la normativa de evaluación ambiental”. Señala este artículo que “las actividades turísticas se llevarán a cabo respetando, preservando y conservando el patrimonio (...) natural de Euskadi en armonía con otros sectores productivos y difundirán las costumbres y tradiciones de Euskadi y su riqueza cultural”. En este caso, la entidad pública responsable del cumplimiento de la normativa es el propio Ayuntamiento, con un control por una administración turística de Euskadi creada por esta normativa sectorial.

El tercer régimen de protección proviene de la normativa de conservación de la naturaleza vasca. A tal fin, la Ley 9/2021, de 25 de noviembre, de conservación del patrimonio natural de Euskadi dedica el art. 30 a la protección del karst y las cavidades, disponiendo que con, carácter general, deberán preservarse en condiciones naturales todas las cuevas, simas y demás conductos subterráneos sitios en los suelos calizos del territorio de la Comunidad Autónoma del País Vasco, evitando toda alteración o destrucción de sus características físicas o biológicas. Aquí, la competencia normativa es del Gobierno vasco, y todos los poderes públicos están implicados en su conservación (art. 6 de la ley 9/2021).

Por último, como una especialidad del régimen anterior, la cueva de Pozalagua se encuentra en el Parque Natural de Armañón, y así se incluye expresamente este bien natural en el Decreto 176/2016 de declaración del Espacio Natural Protegido, y en el ZEC del mismo nombre por Decreto 25/2016 de designado. Su declaración como ZEC no ha influido en el régimen de la cueva, como se ha apuntado antes, porque la normativa europea no incluye en su objeto de regulación las cuevas explotadas por el turismo y, de hecho, las medidas de conservación no son aquí de aplicación. No ocurre lo mismo con el régimen del parque natural, cuyo PORN, por ejemplo, prevé que el régimen para Pozalagua pasa por “consolidar sus visitas, sin menoscabo de su conservación y recuperación. Impulsar asimismo medidas de apoyo a la exploración espeleológica de la zona.” (art. 7.1.4.e del Decreto), además de otras previsiones más concretas en un fomento de su uso público. En este caso, la normativa de protección ambiental corresponde al Gobierno Vasco, y el desarrollo de la regulación de los usos humanos y la gestión a la Diputación Foral de Bizkaia.

Como se observan, varios regímenes diferentes sobre un mismo bien, cada uno con su gestor, y una pregunta habitual por todos ellos: ¿cuál es el régimen que prevalece en caso de conflicto? ¿puede alguno de estos gestores imponer su criterio frente al resto? La respuesta jurídica más

sencilla, pero la avalada por el Tribunal Constitucional (STC 102/1995, FJ 4, o 64/1982, FJ 3), es que todos estos gestores han de esforzarse por buscar la compatibilización y armonización de todos los usos y normativas en cuanto que todo son bienes constitucionalmente protegidos (protección natural, turismo, desarrollo económico...), y solo en el supuesto de que existan contradicciones insalvables sin que el legislador tome partido, se tomará una decisión caso a caso.

Conclusion

Muchas cuestiones jurídicas plantean sobre el régimen legal de las cavidades, turísticas o no, y no siempre se llega a una fácil respuesta. En numerosas ocasiones, el ordenamiento jurídico positivo no ofrece una solución jurídica clara. Esta inseguridad jurídica no tiene especial importancia en la gestión mientras no se generen conflictos, pero complica una solución rápida cuando estos aparecen.

A modo de reflexión, se aborda aquí el régimen de propiedad de la Cueva de Pozalagua, y se apunta a que una posible respuesta es que estemos ante un bien inmueble propiedad del Ayuntamiento de Karrantza a título privativo adquirido por usucapión tras muchos años explotando turísticamente el recurso. Sin embargo, no es descartable que otro actor pudiera aparecer en escena con un mejor derecho.

El régimen de usos, sin embargo, es más claro sobre el papel, pero no menos sencillo en la resolución de los conflictos que pudieran aparecer. Varios ordenamientos y poderes públicos confluyen con facultades normativas y ejecutivas, lo que exige la debida coordinación entre todos ellos. Sí queda claro, no obstante, es que toda la normativa, con independencia de su origen (derecho del suelo, turismo o medio ambiente) apunta hacia una finalidad común: la conservación ambiental de la cavidad. Ahora bien, cómo y en qué condiciones, es algo que los gestores deben aclarar.

Referencias

- Alegre Ávila, J.M. 2008. *Subsuelo: Hecho y Derecho. Planteamiento tradicional, estudio jurisprudencial y reconstrucción técnica del régimen jurídico del subsuelo*, Thomson Aranzadi, Navarra.
- Fernández Rodríguez, T. R. 2008. "La propiedad urbanística del suelo, el vuelo y el subsuelo", en *Revista Vasca de Administración Pública*, num. 41, pp. 587-606.
- Moreno García, J.J. 2015. *Los distintos estatutos jurídicos del subsuelo*, IVAP, Oñati.
- Moreu Carbonell, E. 2001. *Minas. Régimen jurídico de las actividades extractivas*, Tirant lo Blanch, Valencia.
- VVAA, 2016. *La Torca del Carlista*, Enbata Elkartea, 2016, Bilbao.
- Wikipedia. Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Cueva_de_Pozalagua

Reconversión turística del paisaje industrial: pasado y presente del patrimonio de Karrantza (Bizkaia)

Barreras Vía, L.¹, Damas Mollá, L.² y Ahedo Sainz, I.³

¹ Leykatur, servicios turísticos, Bº San Esteban 1A, 48891 Karrantza Harana, Bizkaia
leykatur@gmail.com

² Departamento de Geología. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU).
Facultad de Ciencia y Tecnología. Barrio Sarriena s/n. 48940. Leioa. Bizkaia. España.
laura.damas@ehu.eus

³ Oficina de turismo de Karrantza, Bº Ambasaguas 22, 48891 Karrantza Harana, Bizkaia.
turismokarrantza@gmail.com

Resumen

Un viaje por Bizkaia nos permite conocer el alcance de la industria de la siderurgia: su importancia económica, las estructuras que aún sobreviven, señas de identidad culturales... Los dos últimos siglos de este sector han condicionado el paisaje actual de este territorio. Estos paisajes que hoy se contemplan son el escenario de su historia y el testimonio material de los hechos del pasado, es su patrimonio y el de sus habitantes. Son sujetos activos y dinámicos en constante transformación. En este trabajo se analiza el pasado industrial del Valle de Karrantza desde el punto de vista de las posibilidades que ofrece como recurso turístico pero también con el objetivo de promover la conservación del patrimonio tanto industrial como natural.

Palabras clave: Karrantza, patrimonio, reconversión, revalorización, turismo.

Abstract

A journey through Bizkaia allows us to get to know the scope of the iron and steel industry: its economic importance, the structures that still survive, its cultural identity... The last two centuries of this sector have conditioned the current landscape of this territory. These landscapes that can be observed today are the scene of its history and the material testimony of the events of the past, it is its heritage and that of its inhabitants. They are active and dynamic subjects in constant transformation. This work analyzes the industrial past of the Karrantza Valley from the point of view of the possibilities it offers as a tourist resource, but also with the aim of promoting the conservation of both industrial and natural heritage.

Keywords: Karrantza, heritage, reconversion, revaluation, tourism.

Antecedentes

Gracias a la gran industrialización, Bizkaia vivió un crecimiento socioeconómico evidente y una transformación completa del modo de vida de nuestros antepasados que llegó hasta el Valle de Karrantza ubicado en la parte más occidental de la comarca de Enkarterri (Figura 1).

La reutilización y la puesta en valor del pasado industrial como recurso turístico es importante, no sólo para impedir su desaparición sino también para mantener y recuperar una parte de la historia. (Homobono Martínez, 2006/7). Además, el auge de un nuevo sector, como el turismo, activa la economía en aquellas zonas que se han visto afectadas por el cierre de las fábricas.

Las características geológicas de cualquier territorio definen su paisaje y constituyen la base

para comprender el entorno. Las Peñas de Ranero, ubicadas en la zona norte del valle, están compuestas por calizas que tras una serie de movimientos tectónicos se fracturaron. A través de estas fracturas circularon fluidos hidrotermales que contenían magnesio y que al reaccionar con las calizas dieron lugar a las dolomías (Fernandez Ortega y Valls Uriol, 2006).

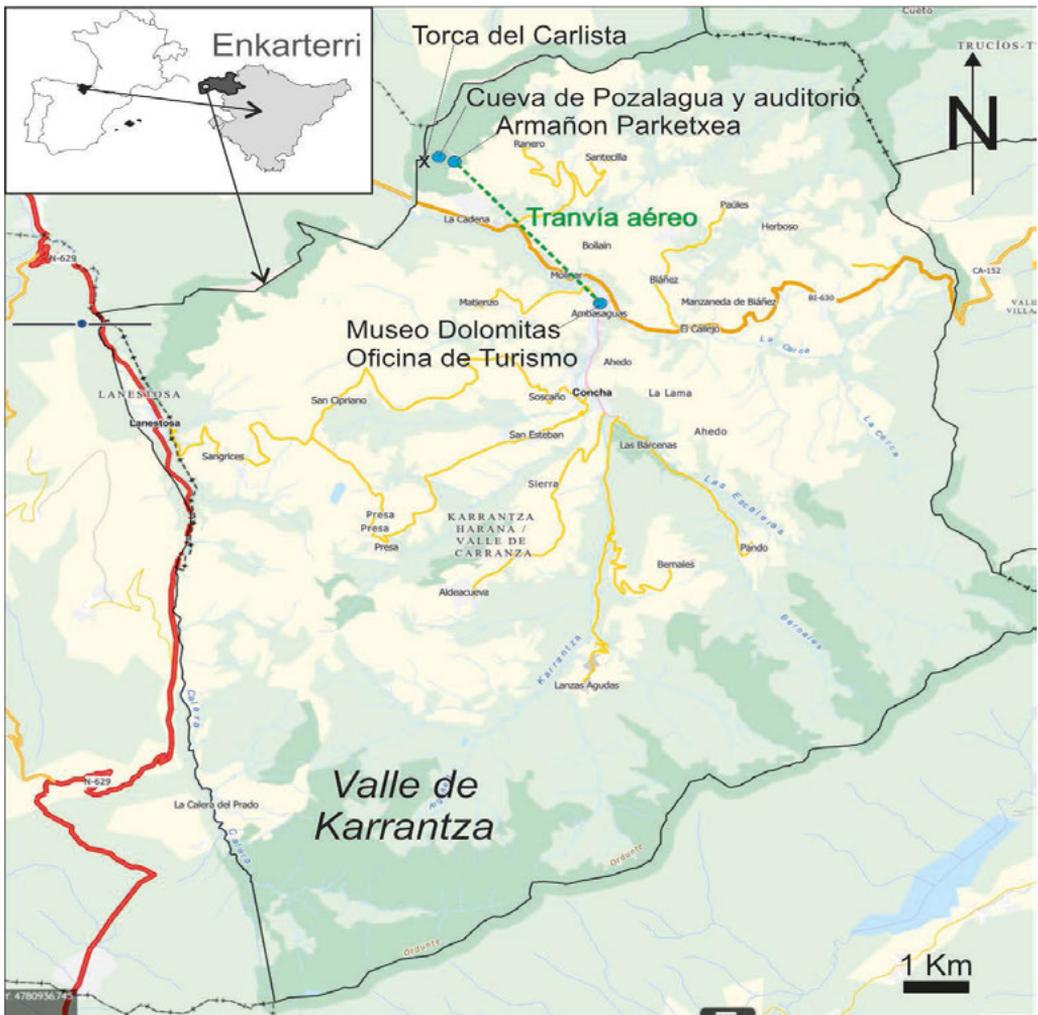


Figura 1. Mapa de localización del Valle de Karrantza (modificado de <https://www.geo.euskadi.eus/geobisorea>)

La principal actividad económica del Valle de Karrantza era la ganadería, (Saratzaga Garai, 1998) pero la explotación de sus recursos geológicos propiciaron un cambio en su actividad económica y laboral. En el año 1945, Serafin de Abaitua y Egidazu, Domingo Sarachaga Aza e Higinio Corral Herrero fundan la empresa *Dolomitas del Norte*, una fábrica situada en el barrio de Ambasaguas en Karrantza (Bizkaia). La construcción de esta planta lleva a la explotación de la *Cantera Donosa* en las Peñas de Ranero donde extraían dolomita, un mineral fundamental para

el desarrollo industrial que se estaba produciendo en esos años. Con este mineral, se hacían principalmente ladrillos refractarios que servían para revestir los altos hornos de las grandes fundiciones (<https://www.cuevadepozalagua.eus/entorno>).

El proceso de extracción de mineral era mediante cargas de dinamita. Una vez realizada la explosión, el material extraído se trasladaba hasta la "estación de trituración y de carga de mineral" desde donde partía un tranvía aéreo que hacía un recorrido de casi 3 km en línea recta hasta llegar a la fábrica. Una vez allí se sinterizaba y se distribuía a las inmediaciones de las zonas industriales para la elaboración de dichos ladrillos.

El descubrimiento de la Cueva de Pozalagua

Es precisamente como consecuencia de una de las explosiones realizadas en la Cantera Donosa como se descubre la **Cueva de Pozalagua** el 28 de diciembre de 1957. Esta cueva es una maravilla subterránea donde podemos contemplar toda clase de formaciones entre las que destacan las excéntricas por su increíble proliferación (Figuras 2 y 3). Su hallazgo va a cambiar el curso, la historia y el paisaje de una parte de la localidad de Karrantza.



Figura 2. Detalle de las excéntricas de la Cueva de Pozalagua

Entre 1975 y 1976 el Ayuntamiento decide no renovar el permiso de explotación a la empresa que gestiona la cantera para salvaguardar la cueva. Esta decisión y la crisis económica que vive la siderometalurgia a nivel europeo propician el cierre de la *Fábrica de Dolomitas* en el año 1990 (<https://patrimonioindustrialdeeskadi.com/elemento/dolomitas-del-norte/>). Todo ello provoca un gran impacto en la economía del valle ya que parte de la población tenía de forma directa o indirecta a algún familiar trabajando en este sector.

En el año 1991 el Ayuntamiento decide acondicionar una parte de la Cueva de Pozalagua y convertirla así en un recurso turístico. (Alvarez Ortega, 1999). En 1997 se amplía la zona visitable y en años posteriores se van realizando mejoras hasta completar el recorrido actual y la construcción del centro de recepción de visitantes. De esta manera, se crea un nuevo sector en

el valle, inexistente hasta ese momento y se da el primer paso para el cambio y la reconversión del paisaje industrial a un paisaje natural y cultural con un gran potencial turístico.



Figura 3. Techo de excéntricas en la Cueva de Pozalagua

Declaración del Parque Natural de Armañón

El área de Armañón se sitúa en el extremo noroccidental del Territorio Histórico de Bizkaia, comprendiendo parte de los municipios de Valle de Karrantza y Trucios-Turtzioz (Figura 1). Es un paraje de notable importancia paisajística. Las grandes diferencias de altitud originan un relieve muy abrupto dominado por las masas de Peñas de Ranero, Armañón y Los Jorrios, junto con los cordales entre ellos. La gran riqueza geológica (más de 200 cuevas y simas encabezadas por la Cueva de Pozalagua y la Torca del Carlista), los bosques autóctonos, la fauna y flora que se encuentran en la zona kárstica o en los macizos calizos de Ranero (Karrantza) y Los Jorrios (Turtzioz) favorecieron en el año 2006 que el Departamento de Medio Ambiente de la Diputación Foral de Bizkaia lo declarase Parque Natural (DECRETO 176/2006). Entre sus cumbres se encuentra el monte Armañón que con sus 856 m le da el nombre al Parque Natural (Figura 4).

De cantera a auditorio

Tras el cierre de la *Cantera Donosa*, el espacio de la explotación (Figura 5) queda en desuso hasta que se descubre que presenta una gran calidad acústica. Finalmente, tras varios años de acondicionamiento, se decide construir lo que actualmente es el Auditorio de Pozalagua (Figura 6). Este espacio es perfecto para representaciones artísticas ya que combina la sonoridad única

de su escenario con la luz natural de los cielos y, como telón de fondo, los macizos kársticos del *Parque Natural de Armañon*.



Figura 4. Panorámica del Parque Natural de Armañon

El *Auditorio de Pozalagua* no solo se ha convertido en uno de los lugares de interés cultural más importantes del territorio, sino que también forma parte del inventario de los Lugares de Interés Geológicos de Euskadi (http://bideoak2.euskadi.net/debates/geodiversidad/recursos_ide/138.pdf). Al realizar el corte en la pared rocosa con hilo diamantado se visualiza perfectamente el proceso de dolomitización y la formación de la dolomía cebrá. En la actualidad es uno de los mejores puntos de la península para observar este proceso. (López-Horgue *et al.*, 2010).

De Estación de Trituración y Carga de Mineral a Centro de Interpretación del Parque Natural de Armañon

Las voladuras de la *Cantera Donosa* producían bloques de roca de gran volumen. La carretera de acceso desde la cantera a la fábrica de Dolomitas no permitía el traslado adecuado de dichos bloques así que construyeron, a pocos metros de la cantera, un edificio que albergaba una estación de trituración (Figura 7) y de carga de mineral (Figura 8). Desde aquí el material se trasladaba mediante un tranvía aéreo.

Actualmente, el edificio de trituración y carga se ha reconvertido y alberga el Centro de Interpretación del Parque Natural de Armañon de la Diputación Foral de Bizkaia (<https://www.bizkaia.eus/es/-/centro-de-interpretacion-del-parque-natural-de-armanon>). .



Figura 5. Estado en el que queda la zona de trabajo al cierre de la cantera



Figura 6. Reconversión del espacio de trabajo de la cantera en un auditorio



Figura 7. Estación de trituración de mineral



Figura 8. Estación de carga de mineral



Figura 9. Estación de trituración y de carga de mineral reconvertido en Centro de Interpretación del Parque Natural de Armañon

De fábrica industrial a museo y oficina de turismo

Debido a la complejidad del transporte de mineral hasta la fábrica por el desnivel del terreno, se instaló un sistema muy utilizado en el sector de la minería de Bizkaia: el tranvía aéreo. Consta de 27 caballetes metálicos (Figura 10) en línea recta a lo largo de los 2,9 km desde la planta de molienda hasta la fábrica. Esos caballetes, de entre 2,5 m y 35 m, estaban unidos entre sí por un solo cable metálico sin fin, en constante movimiento, que realizaba al mismo tiempo una función portadora y tractora.

Del cable colgaban, sujetos mediante poleas, baldes (empujados y cargados a mano) y llegaban así a la *Estación de Descarga*, situada en el barrio de Ambasaguas, la cual conformaba junto con los *Silos de almacenamiento* y los *Hornos de calcinación y sinterización*, el conjunto completo de la *Fábrica Dolomitas del Norte* (Figura 11).



Figura 10. Caballete del tranvía aéreo

Los Hornos de Calcinación y Sinterización, con una temperatura de 800° y 1800° respectivamente, eran los encargados de procesar la denominada "dolomita cruda" en "dolomita fritada" que era el material adecuado para la realización de los ya mencionados ladrillos refractarios.

Con el cese de la producción en 1990 sus instalaciones fueron derribadas a excepción de las oficinas de la fábrica, la chimenea y el edificio que alberga la maquinaria de descarga del tranvía aéreo, es decir la *Estación de Descarga*. Dado su interés histórico e industrial, en 2002, lo que había sido la *Estación de Carga* y la *Estación de Descarga* son declaradas por el Gobierno Vasco *Bien Cultural* en categoría de *Monumento* (<https://www.euskadi.eus/app/ondarea/patrimonio-construido/dolomitas-del-norte-s-l-/fabrica-transformacion-de-la-piedra/patrimonio-industrial/karrantza-harana-valle-de-carranza/-ambasaguas/fichaconsulta/5151>). A partir de este momento se puso en marcha la recuperación y puesta en valor de las dichas instalaciones.

La *Estación de Descarga* del tranvía aéreo se convierte de esta manera en el Museo Dolomitas en el año 2015 (<https://www.cuevadepozalagua.eus/entorno>) (Figura 12), lugar donde poder

contemplar y conservar los elementos mecánicos de la fábrica, así como el sistema de poleas gigantes que manejaban este tranvía. A su vez, las oficinas de la empresa se han rehabilitado y acondicionado como Oficina de Turismo y diversas salas culturales (Figuras 13 y 14).

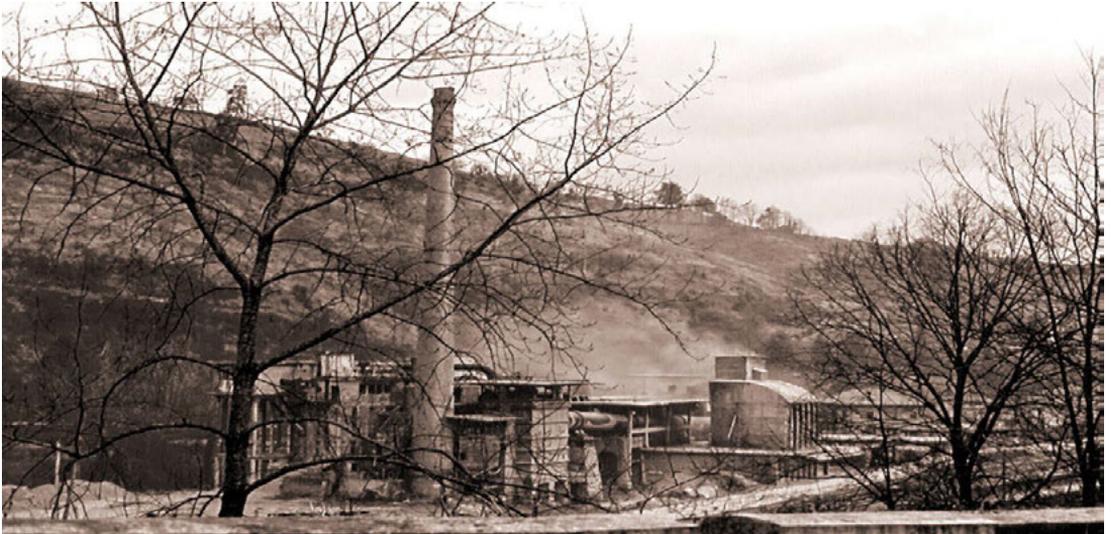


Figura 11. Fábrica de Dolomitas en plena actividad



Figura 12. Antigua fábrica de Dolomitas reconvertida en museo



Figura 13. Estado de las oficinas de la fábrica de Dolomitas en activo



Figura 14. Oficinas de la fábrica de Dolomitas reconvertidas en oficina de turismo y salas culturales

El cambio de industrialización al turismo

De acuerdo con la definición que se adoptó en la vigésima segunda reunión de la Asamblea General de la OMT (actualmente ONU Turismo) en el 2017, el turismo cultural es *“un tipo de actividad turística en el que la motivación esencial del visitante es aprender, descubrir, experimentar*

y consumir los atractivos/productos culturales, materiales e inmateriales de un destino turístico. Estos atractivos/productos se refieren a un conjunto de elementos materiales, intelectuales, espirituales y emocionales distintos de una sociedad que engloba las artes y la arquitectura, el patrimonio histórico y cultural, el patrimonio gastronómico, la literatura, la música, las industrias creativas y las culturas vivas con sus formas de vida, sistemas de valores, creencias y tradiciones”.

En este contexto, el turismo industrial es por tanto una forma de turismo cultural cuyo objetivo principal es difundir el patrimonio industrial.

En el caso del valle de Karrantza esa reutilización y puesta en valor del patrimonio genera los siguientes recursos turísticos:

- *Cueva de Pozalagua y Auditorio*: El trabajo humano en un proceso totalmente industrial (el trabajo de una cantera) por un lado realiza descubrimientos de paisajes naturales subterráneos y por otro lado modifica un espacio exterior natural convirtiéndolo todo ello en un espacio cultural y turístico.
Con el objetivo de ofrecer a los visitantes un servicio de calidad en destino, en la zona se dispusieron aparcamientos, aseos, un área recreativa, una fuente y una Cafetería - Restaurante. Además, en un proceso de mejora continua, la zona ofrece la posibilidad de realizar itinerarios a pie o en bicicleta, como la *Ruta Megalítica de Armañon* (<https://arkeoagiri.org/>). Todos estos cambios propician que la cueva reciba una media de 40.000 visitantes al año. Además, anualmente, en la época estival se celebra el Festival de Pozalagua en el Auditorio recibiendo aproximadamente unos 3.000 asistentes (Datos del Ayuntamiento de Karrantza).
- *Parque Natural de Armañon*: Se produce un cambio en los valores de los espacios geográficos: Un espacio catalogado como industrial para la extracción de mineral pasa a ser un espacio declarado Parque Natural donde se pone en valor ciertos aspectos de la biodiversidad.
- *Parquetxea Armañon*: Una transformación en el uso de los edificios, la antigua estación de trituración y de carga de mineral pasa a convertirse en el Centro de Interpretación del Parque Natural de Armañon y el Mirador de Pozalagua.
Según los datos recogidos por la Diputación Foral de Bizkaia, en el primer semestre del 2024 el Parque y su Centro de Interpretación han sido los espacios naturales más visitados del territorio de Bizkaia.
Estos dos espacios proporcionan al visitante la posibilidad de practicar un turismo de naturaleza en un entorno excepcional.
- *Oficina de Turismo*: La renovación de un inmueble genera un espacio distinto al original, las antiguas oficinas de la Fábrica de Dolomitas pasan a ser Oficina de Turismo.
Karrantza no sólo tiene una riqueza cultural, natural e industrial sorprendente, también la arquitectura de sus caseríos (caserío Trucense o Encartado), casas de indios, patrimonio eclesiástico (con más de 16 iglesias) y su gastronomía junto con la gran oferta de alojamientos y de otros recursos turísticos hacían necesario disponer de un centro de información turística.
- *Museo Dolomitas*: Musealización de un edificio, la Fábrica Dolomitas del Norte cesa su producción industrial y se convierte en museo.
Siendo un recurso relativamente nuevo y por lo tanto más desconocido se aprecia un aumento de visitantes cada año (Datos del Ayuntamiento de Karrantza) esperando que llegue a las mismas cifras que la Cueva de Pozalagua.

En España, la contribución del sector del turismo a la economía resulta fundamental. Es uno de

los principales motores de la economía española alcanzando un 12,8% del PIB en el año 2023 convirtiéndose en el mejor año desde que existen estadísticas (<https://www.investinspain.org/content/icex-invest/es/noticias-main/2024/exceltur.html>).

El turismo industrial y su patrimonio ha experimentado un crecimiento importante, se presenta como una nueva tendencia turística emergente. (Pardo Abad, 2004)

Todas las formas de turismo mencionadas (cultural, industrial, natural...) preservan el patrimonio y junto con un turismo sostenible son el nexo de unión necesarios hacia un equilibrio que valore los recursos naturales y culturales, aumente la conciencia sobre la calidad geo-ambiental y fomente el desarrollo local.

Agradecimientos

Gracias al Ayuntamiento de Karrantza por la puesta en valor del pasado, por su implicación en la revalorización y reconversión del patrimonio industrial y natural y por apostar por un sector nuevo en el valle: El turismo.

Agradecer a las distintas entidades públicas que han colaborado en la financiación para llevar a cabo estos proyectos.

Las autoras quieren expresar su gratitud al equipo de geólogos/as que a lo largo de los años han mostrado un gran interés en los estudios geomorfológicos y mineralógicos del entorno. Un agradecimiento especial a todos los/as guías que a lo largo de estos años han trabajado en la Cueva de Pozalagua, el Centro de Interpretación del Parque Natural de Armañon y el Museo Dolomitas. Su trabajo ha sido y es fundamental para transmitir a todos los visitantes esta parte de la historia del Valle.

Referencias

- Alvarez Ortega A, 1999. Valle de Carranza. Pozalagua, Torca del Carlista y Venta Laperra. Egía S.L (Ed) Karrantza.
- Fernandez Ortega F y Valls Uriol MC, 2006. Pozalagua. Patrimonio subterráneo de Karrantza.
- Homobono Martínez JI, 2006/7. El patrimonio industrial y sus activaciones: Turismo, museos, ecomuseos y reutilización. Kobie XII, 5-33 pp.
- López-Horgue MA, Aranburu A, Castellano A, Razkin A, Iridoy P, y Arriolabengoa M, 2010. La Cueva de Pozalagua (Karrantza, Bizkaia). En: Durán J. J, Carrasco F (Eds.), Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid pp. 383-396.
- Pardo Abad CJ, 2004. La reutilización del patrimonio industrial como recurso turístico. Aproximación geográfica al turismo industrial. Treballs de la Societat Catalana de Geografia, 7-32
- Saratxaga Garai A, 1998. Carranza. Estudio Histórico-Artístico (Monografías de pueblos de Bizkaia). Diputación Foral de Bizkaia (Ed). Bilbao. 627 pp.

Estudio preliminar de los procesos de degradación de los espeleotemas de la Cueva de Pozalagua (Karrantza, Bizkaia)

Damas Mollá, L.¹, Álvarez, I.², Bodego, A.¹, Yusta, I.¹, Meaurio, M.³, Uriarte, J.A.¹, Antiguada, I.¹ y Aranburu, A.¹

¹Departamento de Geología. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Grupo de Procesos Hidro-Ambientales (HGI). Facultad de Ciencia y Tecnología. Barrio Sarriena s/n. 48940. Leioa. Bizkaia. España. laura.damas@ehu.es

²Departamento de Expresión Gráfica y Proyectos de Ingeniería. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Escuela de Ingeniería de Bilbao. Rafael Moreno 'Pitxitxi', 3. 48013 Bilbao.

³Departamento de Química Aplicada. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Grupo de Procesos Hidro-Ambientales (HGI). Facultad de Química. Manuel Lardizabal Pasealekua 3, 20018 Donostia-San Sebastián. España.

Resumen

La degradación de los espeleotemas de cavidades patrimoniales es un riesgo tanto para los rasgos que las hacen singulares como para los visitantes, en el caso de su uso turístico. El estudio de las alteraciones sirve de punto de partida para establecer tanto los factores a analizar como la metodología más adecuada para cada uno. La Cueva de Pozalagua es una cavidad kárstica situada en la provincia de Bizkaia. Destaca por la belleza de sus espeleotemas excéntricos y está dentro del inventario de los Lugares de Interés Geológico de Euskadi. Además, Pozalagua es una cueva turística que atrae a visitantes y escolares a lo largo del año. En esta cueva se han determinado tres procesos de degradación principales: la disolución de estalagmitas, la corrosión del núcleo de espeleotemas excéntricos y el colapso reciente de una placa del techo de la cavidad. En este trabajo se presenta un estudio preliminar de dichas degradaciones y se plantean los posibles factores que pueden estar involucrados en su origen. Con estos datos se ve necesario establecer: 1) una red de seguimiento de datos ambientales del interior de la cueva: zonas determinadas y los parámetros a registrar; 2) la periodicidad y el tipo de análisis de aguas (interior y exterior) 3) el estudio petrológico y mineralógico de los materiales.

Palabras clave: afecciones/vulnerabilidad, Cueva Pozalagua, desprendimiento, disolución, red de seguimiento.

Abstract

The degradation of speleothems in heritage caves is a risk both for the features that make them unique and for visitors, in the case of their tourist use. The study of the alterations serves as a starting point to establish both the factors to be analyzed and the most appropriate methodology for each one. The Pozalagua Cave is a karst cave located in the province of Bizkaia. It stands out for the beauty of its eccentric speleothems and is included in the inventory of Places of Geological Interest of the Basque Country. In addition, Pozalagua is a show cave that attracts visitors and schoolchildren throughout the year. In this cave, three main degradation processes have been determined: the dissolution of stalagmites, the corrosion of the core of eccentric speleothems and the recent collapse of a plate in the ceiling of the cavity. In this work, a preliminary study of these degradations is presented and the possible factors that may be involved in their origin are proposed. With these data it is necessary to establish: 1) a network for monitoring environmental data inside the cave: specific areas and the parameters to be recorded; 2) the periodicity and type of water analysis (interior and exterior) 3) the petrological and mineralogical study of the materials.

Keywords: detachment, dissolution, monitoring network, Pozalagua Cave, vulnerability.

Introducción

Las cavidades kársticas son espacios de muy alta vulnerabilidad respecto a las variaciones de temperatura y precipitación que implica el actual calentamiento climático. El aumento de las temperaturas externas, la modificación de la cobertura vegetal y los suelos del epikarst, o la

variación del tipo de precipitaciones, por ejemplo, son algunos de los factores de mayor incidencia en las condiciones ambientales del interior de las cuevas (Cuezva *et al.*, 2011).

El punto de partida de los estudios de vulnerabilidad, además de la medición de las variaciones ambientales tanto del interior como del exterior de los sistemas kársticos, arranca con la descripción de las afecciones presentes en las cuevas. La disolución y corrosión de espeleotemas (Sala *et al.*, 2023; Martín-García *et al.*, 2010; Gázquez *et al.*, 2013), los colapsos de techos y paredes (Martínez *et al.*, 2021), los procesos de micritización de espeleotemas (Aranburu *et al.*, 2010) o la colonización de organismos (Domínguez, 2014), entre otros, son las más frecuentes. Su estudio de detalle puede ayudar a determinar si las causas que los generan son debidas a cambios ambientales, a usos y modificaciones antrópicas de las cuevas, o bien, son el resultado de la evolución natural del sistema. En el caso de las cavidades patrimoniales, ya sea por sus recursos naturales o culturales, los procesos de degradación tienen una doble afección. Por un lado, pueden dañar directamente los rasgos que hacen singulares dichas cavidades. Por otro lado, determinados procesos, como los colapsos, pueden generar riesgos a los visitantes en el caso de cuevas turísticas.

La Cueva de Pozalagua (Karrantza, Bizkaia) es una cavidad kárstica turística que destaca, entre otros rasgos, por sus espeleotemas excéntricos (López-Horgue *et al.*, 2010a). A lo largo de su evolución geológica ha pasado por diferentes fases de colapso de techos y de formación de espeleotemas (Aranburu *et al.*, 2019). En la actualidad, se ha observado en esta cueva el desarrollo de algunos procesos de degradación (disolución de espeleotemas y colapso de placas del techo, fundamentalmente), cuyo origen está en fase de estudio.

El objetivo de este trabajo es determinar cuáles son las afecciones por degradación de espeleotemas de la Cueva de Pozalagua y plantear hipótesis sobre los procesos que las originan. En este caso, el trabajo se centra en un colapso de una placa del techo que ha acontecido recientemente. Estos estudios servirán para establecer el protocolo de seguimiento más adecuado de cara a identificar los factores principales responsables de las alteraciones.

Contexto geográfico y geológico

La Cueva de Pozalagua se localiza en el Valle de Karrantza (Bizkaia, España) (Figura 1) y, forma parte de una extensa red de conductos y cavidades kársticas formadas en las calizas arrecifales (urgonianas) y dolomías cretácicas de las Peñas de Ranero, donde destaca por su volumen la cavidad de La Torca del Carlista (Álvarez *et al.*, 2016). Las calizas arrecifales se formaron en una extensa plataforma marina somera durante el Aptiense-Albiense (Cretácico) denominada plataforma de Ramales. Posteriormente a su depósito, la tectónica activa durante el Cretácico propició la fracturación de la plataforma mediante fallas, y a través de estas fallas se canalizaron fluidos calientes (hidrotermales) desde el subsuelo hacia la plataforma. La circulación de estos fluidos hidrotermales resultó en la diagénesis o alteración de la roca caliza, que la transformó, por reemplazamiento, a dolomía. Así, las unidades de dolomía suelen formar cuerpos irregulares en torno a las fracturas cretácicas, englobadas en la caliza. Dichas fracturas han sido y son hoy en día vías preferentes de circulación de fluidos, tanto hidrotermales durante el Cretácico, como meteóricos durante del Cuaternario. Como resultado de la infiltración del agua meteórica por

estas fracturas, y favorecida por la porosidad diferencial de la dolomía se han formado la Cueva de Pozalagua y la Torca del Carlista, ambas cavidades pertenecientes al mismo sistema kárstico (Álvarez *et al.*, 2016) y desarrollado principalmente en las unidades de dolomía (López-Horgue *et al.*, 2010a). Además de la localización de las cavidades, la fracturación del macizo también juega un papel importante en el desarrollo de las mismas. La infiltración de aguas meteóricas a través de dos sistemas de fracturas conjugadas entre sí ha condicionado la morfología de las cavidades de esta zona (López-Horgue *et al.*, 2010b). La Cueva de Pozalagua es una cavidad de orientación noroeste-sureste, con unas dimensiones discretas (100 m x 50 m) en comparación con La Torca del Carlista (500 m x 250 m) (Álvarez *et al.*, 2016). Son, sin embargo, dos cavidades hoy separadas por una gran colada o formación de espeleotema, pero que corresponde en origen a una misma gran cavidad. Tanto en La Torca del Carlista como en la cueva de Pozalagua destaca la existencia de conos formados por grandes bloques de colapsos gravitacionales de techo. El profuso y diverso desarrollo de espeleotemas es, sin embargo, la marca de identidad de Pozalagua, siendo las excéntricas lo que atrae principalmente al turista. A lo largo de su evolución, la cavidad ha pasado por, al menos, 7 fases evolutivas (Lopez-Horgue *et al.*, 2010a) y en sus espeleotemas se registran más de 500.000 años de historia (Aranburu *et al.*, 2019).

Tanto la Cueva de Pozalagua como las dolomías del macizo de Ranero forman parte del inventario de los Lugares de Interés Geológico de Euskadi (https://www.euskadi.eus/web01-a2inguru/eu/contenidos/informacion/lig/es_def/adjuntos/064.pdf; https://www.euskadi.eus/web01-a2inguru/eu/contenidos/informacion/lig/es_def/adjuntos/138.pdf) y se encuentran protegidos dentro del Parque Natural de Armañon (Bizkaia) (<https://www.bizkaia.eus/es/-/centro-de-interpretacion-del-parque-natural-de-armanon>).

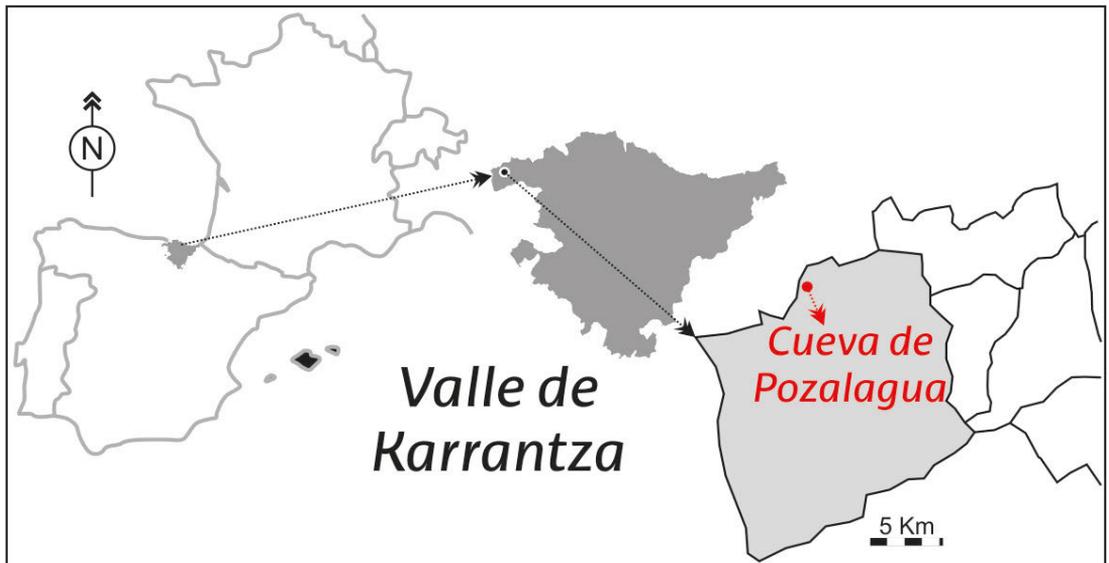


Figura 1. Localización geográfica del Valle de Karrantza y la Cueva de Pozalagua

Afecciones de la Cueva de Pozalagua

En la Cueva de Pozalagua se han observado tres tipos principales de afecciones, en concreto la disolución total en superficie o parcial en el interior de los espeleotemas y desprendimientos ocasionales de las placas de recubrimiento de techo que pueden afectar al uso turístico de la misma. El mapa de la figura 2 localiza estas alteraciones sobre la planta de la cueva:

- a. Corrosión del interior/núcleo de algunas excéntricas. En la zona de acceso a la cueva (sur - suroeste) se ha observado la disolución parcial o total del núcleo de algunas excéntricas, quedando, con frecuencia, la capa exterior de escasos 2 mm de grosor que permite mantener la forma original (Figura 3a) (López-Horgue *et al.*, 2010a).

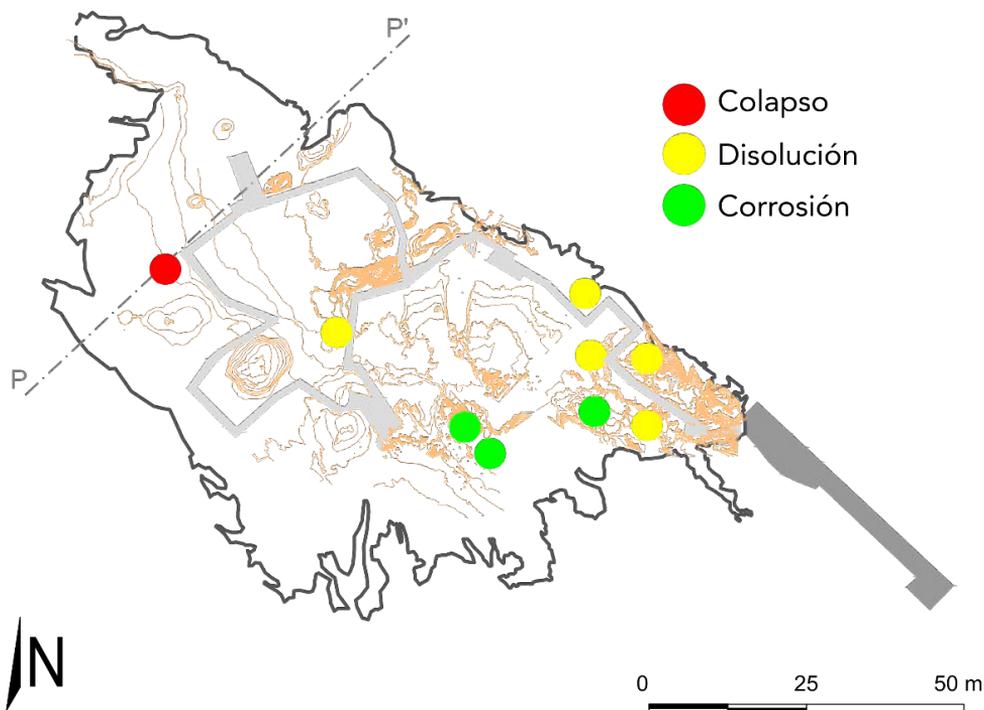


Figura 2. Mapa en planta de la Cueva de Pozalagua con las zonas donde se presentan procesos de degradación

- b. Disolución de la superficie de estalagmitas. Este proceso se desarrolla en la zona sureste y suroeste de la cueva. Las estalagmitas presentan diversas acanaladuras verticales a modo de surcos separados entre 0,5 y 2 cm (Figura 3b) producidos por disolución en la superficie que a su vez deja expuesta las zonas más internas del espeleotema. Genera una morfología de tipo lapiaz sobre estalagmitas.
- c. Colapso de placas. En el extremo noroeste de la cueva se ha desprendido una placa de

espeleotema que cubre el techo, formada principalmente por precipitados de carbonato sobre la roca de dolomía encajante (Figura 3c). Debido a la singularidad del evento y el peligro que conlleva este tipo de afección, teniendo en cuenta que es una cueva abierta al público, este trabajo se centrará en la caracterización y localización de las causas posibles, para diseñar un protocolo de control y/o mitigación de las causas.

Descripción del colapso del espeleotema

En el año 2023 en la zona noroeste de la cueva se registró un desprendimiento de una placa de espeleotema que recubre parcialmente el techo, de dimensiones aproximadas 1,5 m² de superficie y 3 cm de grosor (Figura 3c). La placa se encontraba en el techo de la cavidad a 4,5 metros de altura en un sector con una inclinación de 48° hacia el NE (superficie extraplomada). La zona donde se localiza la caída (Figura 2) se asocia a un escalón del techo de la cavidad posiblemente relacionado con un plano de falla o zona de debilidad, marcada por una alineación de estalactitas (Figura 4) reconocida en casi toda la cueva.

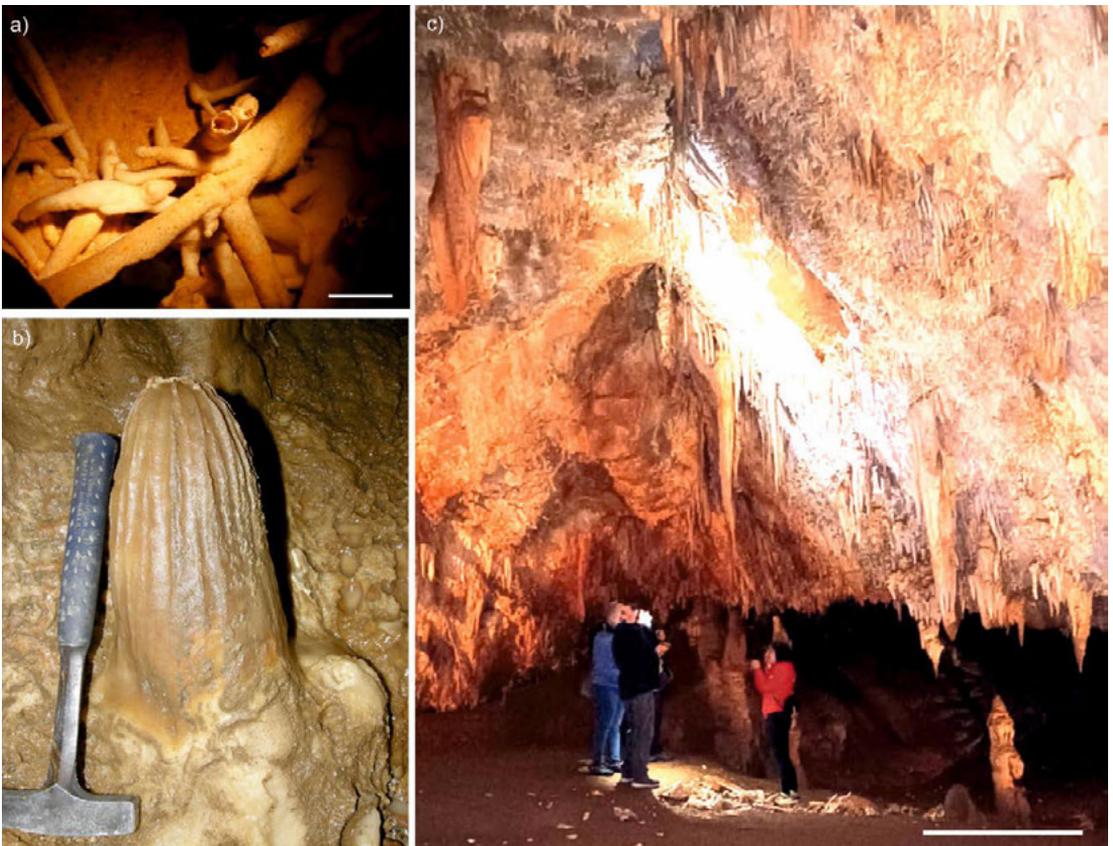


Figura 3. a) Corrosión del interior de algunas excéntricas (la barra de escala son 5 cm); b) disolución de la superficie de estalagmita; c) zona desprendida iluminada y restos de placa en el suelo

Caracterización macroscópica de la placa desprendida

La placa desprendida se encontraba directamente en contacto con la roca encajante, separada por una fina capa de arcillas de color ocre/anaranjada, hidratadas en agua (blandas al tacto) y grosor variable (detalle de la Figura 4), mayor hacia el este (Figuras 5 a-d), es decir en el sentido de la inclinación del techo. En general, la placa está constituida por distintas fases de formación de precipitados de carbonato, que tapizan la superficie de la roca con alguna discreta intercalación de arcillas, mostrando la siguiente estratigrafía (que quizá no corresponda con la edad de formación) (Figuras 6 a y b): i) capa de cristales de calcita de morfología aparentemente prismática y aspecto macroscópico traslúcido (Figuras 6 c y d); ii) capa de arcilla ocre; iii) capa laminada de cristales blancos prismáticos de calcita; iv) lámina de arcilla ocre con mayor o menos grosor (Figura 6 c y d); v) capa de cristales de calcita traslúcidos similar a la i) (Figura 6 c y d).

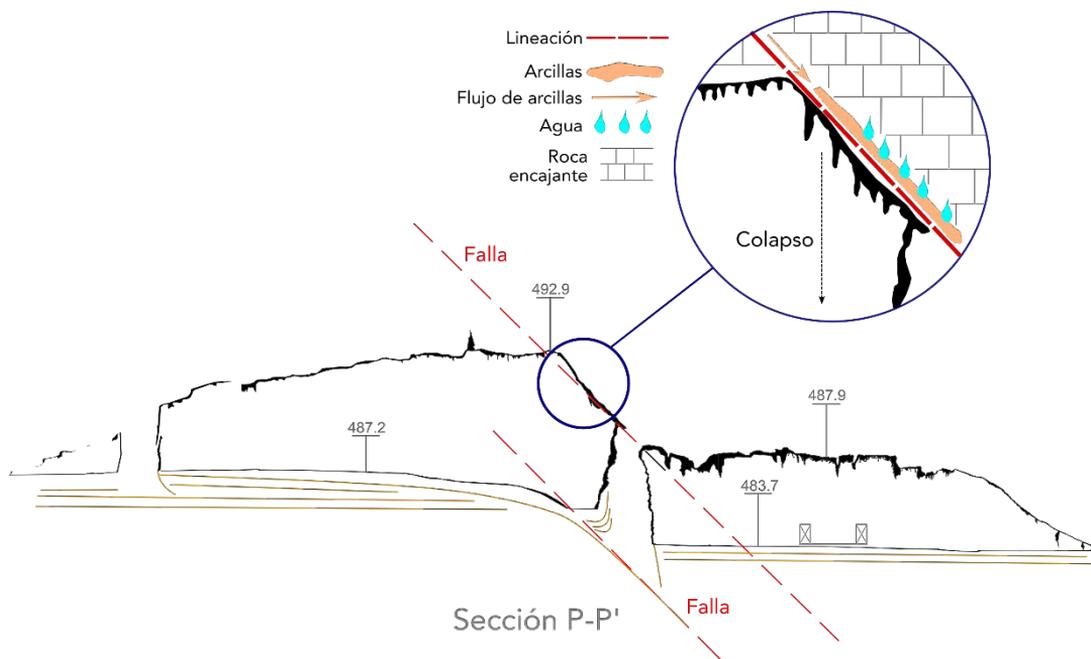


Figura 4. Sección P-P' (marcada en la Figura 2) de la Cueva de Pozalagua donde se ha producido el colapso de la placa de espeleotema

Se han seleccionado 10 muestras del material caído para su estudio en el laboratorio. El espeleotema Pzpc-1 (Figura 6), de 45 cm de longitud y 2-3 cm de grosor, muestra la superficie exterior tapizada por microcristales romboédricos de tono beige y 1 mm de grosor (Figura 6e). Junto a estos cristales se observan estalactitas de hasta 3 cm de diámetro, con una estratigrafía en sección similar a la descrita previamente, el conducto central cerrado por cristales de calcita blancos y el tapiz exterior de color beige (Figura 6f).

La muestra Pzpc -10 tiene un desarrollo mayor que la muestra Pzpc-1, con un grosor medio de unos 20 cm (Figura 7). Presenta una capa de arcillas en la superficie de contacto con la roca

encajante que puede alcanzar 2 cm de grosor. Al igual que la muestra anterior presenta una estratigrafía donde alternan distintos tipos de calcita y niveles de arcilla (Figura 7e). La superficie exterior, sin embargo, no presenta la formación de una película cristalina beige pero sí esta tapizada de microcristales de calcita de morfología romboédrica (Figura 7f). En la superficie se observan el desarrollo de cortinas (Figura 7 a), estalactitas (Figuras 7 b y c) y excéntricas (Figuras 7 a y d), si bien en éstas la lámina de arcilla central está ausente.

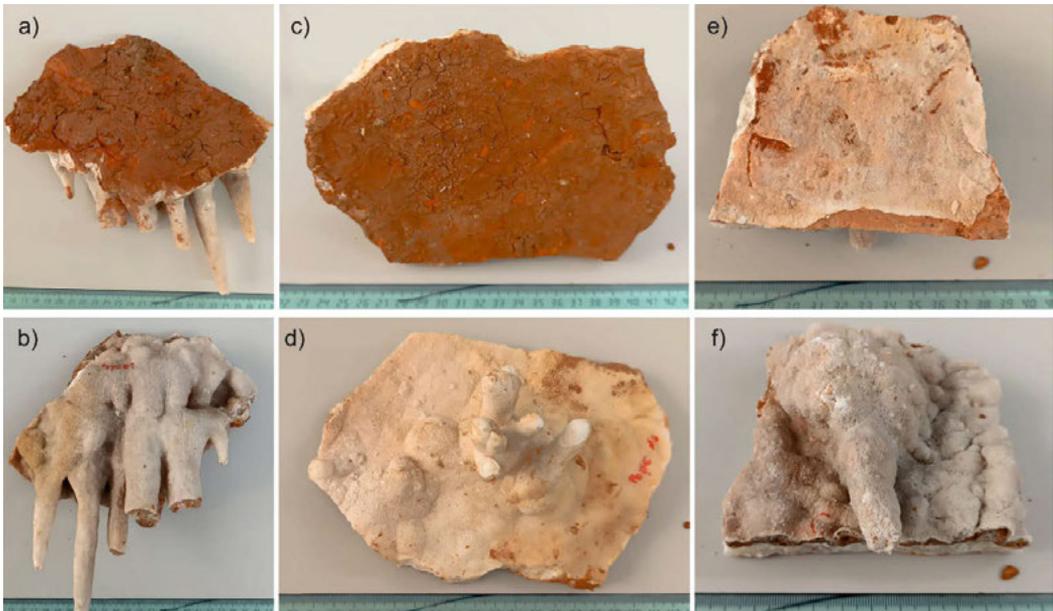


Figura 5. Vista interior y exterior de algunas muestras seleccionadas de la placa caída: a y b) muestra Pzpc-09, con gran cantidad de arcilla interior y estalactitas; c y d) muestra Pzpc-02, con una fina capa de arcilla interior y excéntricas en superficie. Destacan los cristales de la capa más exterior; e y f) muestra Pzpc-04 sin arcilla interior y con estalactitas

Análisis mineralógico e interpretación

La caracterización mineralógica se ha realizado tanto en las distintas fases de crecimiento de carbonato como en las capas más arcillosas de las muestras Pzp1 y 10. Los puntos de análisis de dichas muestras se detallan en las figuras 6 y 7. La mineralogía de roca total y de la fracción < 2 micras de los niveles de arcillas ocre se ha analizado en los distintos niveles que contenían dicha arcilla en los fragmentos de placa desprendida (muestras AE). Además, se han seleccionado 4 muestras de arcilla del suelo de la cueva (muestras A) en diferentes puntos de la cavidad (marcados en la figura 2) y otros 6 suelos rojizos del exokarst (muestras Pos) próximo a la cueva para su comparación con las de las muestras de la placa de la pared. Los análisis se han llevado a cabo en el laboratorio de rocas y minerales de los Servicios Generales de Investigación de la UPV/EHU (SGIker). Las muestras se han analizado mediante Difracción de Rayos X (DRX) de polvo (muestras molidas). Se han identificado los minerales constituyentes de cada muestra y se ha realizado una estimación semicuantitativa de sus contenidos relativos. La tabla I recoge

los resultados obtenidos. La composición de los distintos precipitados laminares de la muestra Pzpc-1 y de la muestra Pzpc-10 son de calcita. Solo se observa un 2% de dolomita y un 4% de cuarzo en la muestra Pzpc-1d, correspondiente a la capa traslúcida más externa.

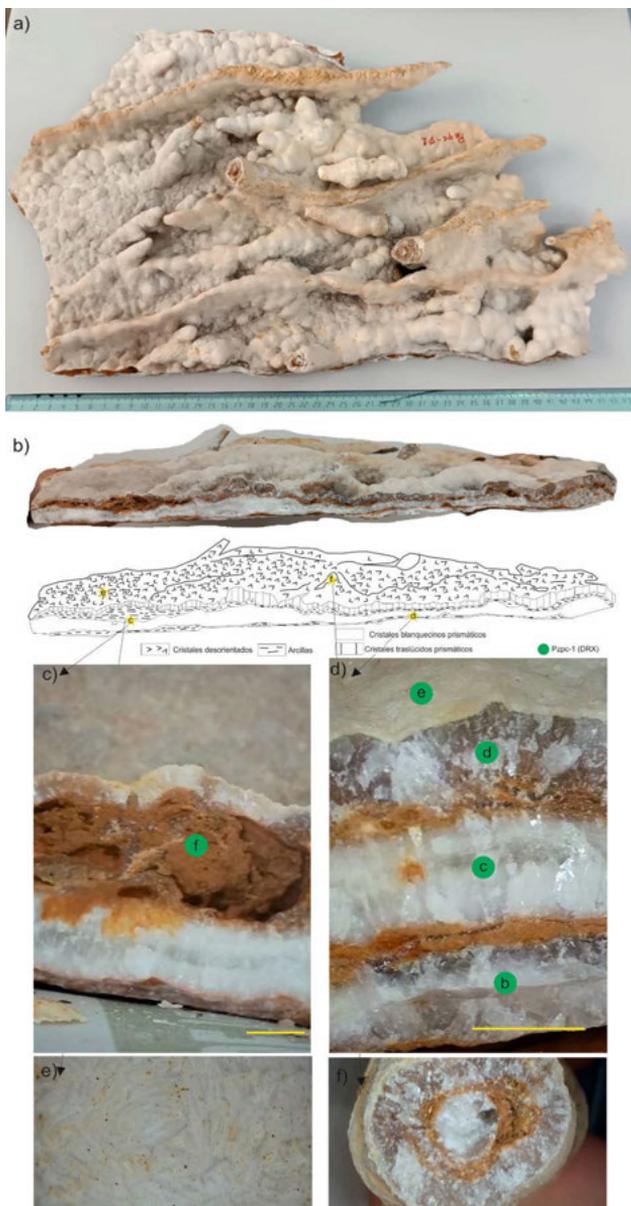


Figura 6. Muestra Pzpc-1 de la placa caída: a) aspecto exterior; b) sección transversal y esquema de las diferentes capas precipitadas (las estrellas se corresponden con las imágenes de detalle); c) detalle de la superficie exterior cristalina (la anchura de la fotografía son 1,5 mm); d) sección de estalagmita (el ancho de la imagen son 3 cm); e) detalle de concentración de arcillas exterior muestreada (la barra de escala son 5 mm); f) detalle de sección muestreada (la barra de escala son 5 mm)

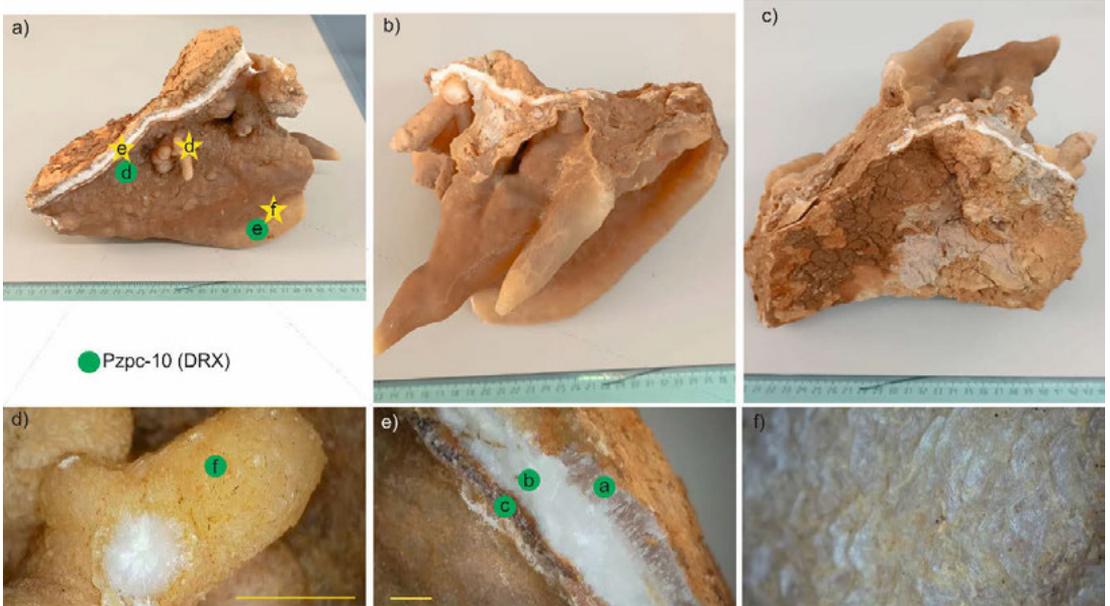


Figura 7. Muestra 10 de la placa caída (Pzpc-10): a, b y c) diferentes vistas exteriores; d) detalle de excéntrica (la barra de escala son 5 mm); e) detalle de la sección en la zona más cercana a la roca encajante (la barra de escala son 5 mm); f) detalle de la superficie exterior cristalina (la anchura de la fotografía son 1,5 mm). Las estrellas se corresponden con los detalles presentados en las imágenes d), e) y f)

Se confirma que los niveles de textura arcillosa del contacto con la roca encajante (muestras AE) están formados mayoritariamente por filosilicatos con porcentajes superiores en casi todas las muestras al 50%. También presentan cuarzo, (media de 20 %) calcita (muy variables, entre 4 y 39 %); goethita (< 8%); y gibbsita en tres de las muestras analizadas. Por último, los resultados obtenidos en las arcillas tomadas en el suelo de la cavidad (A) contienen porcentajes de filosilicatos y cuarzo como minerales mayoritarios, calcita (< 13 %) y en tres de ellas dolomita. La goethita solo está presente en dos de las muestras en cantidades traza (Tabla 1).

El carbonato cálcico analizado es calcita, si bien su hábito cristalino varía de una lámina otra. Estas variaciones pueden estar sujetas a la velocidad de cristalización, saturación en carbonato cálcico y la temperatura. La ausencia de aragonito, en un entorno principalmente dolomítico, puede sugerir que la concentración del Mg en agua no era elevada durante la fase de formación de dichos cristales, bien porque el agua no atraviesa roca dolomítica o porque el tiempo de residencia del agua en contacto con la roca es muy bajo. La presencia de cuarzo y dolomita en la última fase de crecimiento de cristales puede indicar una contaminación ambiental durante la formación de los cristales, quizás relacionado con el polvo de la propia cueva (debido a la acción antrópica).

La mineralogía de las arcillas del interior de la cueva de Pozalagua, tanto de las discretas intercalaciones de la placa desplomada como de las muestreadas tomadas en el suelo de la cavidad, es muy similar (Tabla 1) y, a priori, a falta de realizar un estudio más detallado, no parece diferir de la composición del suelo exterior. Predomina la illita y tiene proporciones medias

similares de 20% en clorita + hidrovermiculita y 25% de caolinita; únicamente varía el contenido en dolomita. La presencia de gibbsita en las muestras de espeleotemas, producto típico de la meteorización de silicatos aluminicos, podría relacionarse con la percolación desde los suelos del exterior, que a su vez son muy similares a los aquí analizados (de media 55% illita, 31% clor-HVer, 20% caolinita).

tipo de muestra	Roca total (%)							Fracción < 2 micras			
	Qz	Cal	Dol	Filosil.	Gth	Gbs	Kfs	Ill	Chl-HVrm	Kln	Hidroxidos
fragmentos de espeleotema desprendidos											
Pzpc-1b		100									
Pzpc-1c		100									
Pzpc-1d	4	94	2								
Pzpc-1e		100									
Pzpc-1f	16	39	10	30	3	2		63	13	24	Gbs, Gth
Pzpc-10a		100									
Pzpc-10b		100									
Pzpc-10c		100									
Pzpc-10d		100									
Pzpc-10e		100									
Pzpc-10f		100									
niveles arcillosos en espeleotemas											
AE-03	23	13		55	8	1		56	20	24	Gbs, Gth ± Lpc
AE-07	16	10		64	7	3		42	26	32	Gbs, Gth ± Lpc
AE-08	17	39		41	3			88	5	7	Gth, Lpc
AE-09	27	8		54	8	3		41	25	34	Gbs, Gth
AE-10	29	4		62	5			62	19	19	Gbs, Gth
AE-10b								91	4	5	Gth, Lpc
niveles arcillosos del suelo de la cueva											
A-01	35	13	31	20	<3		1	46	22	32	Gth ± Lpc
A-02	53	4	10	33				55	20	25	Gth ± Lpc ± Gbs
A-03	62	8	1	29	<3			49	24	27	Gth, Gbs ± Lpc
A-04	36	3		59			2	70	14	16	Gth ± Lpc ± Gbs
Contenidos medios (mediana) en muestras arcillosas											
espeleotemas (n=6)	20	11,5	10	54,5	6	2,5		62	19	24	
suelos interior (n=4)	44,5	6	10	31				52	21	26	
*suelos interior (n=4)								59	16	22	
*suelos exterior (n=5)								53,5	31	20	

Mineralogía: Qz = cuarzo, Cal = calcita, Dol = dolomita, Filos = filosilicatos, Gth = goethita, Gbs = gibbsita, Kfs = feldespatos potásico,

Ill = illita, Chl-HVrm = clorita + hidroxi-vermiculita, Kln = caolinita, Lpc = lepidocrocita.

* datos tomados de Arriolabengoa *et al.* (2015).

Tabla I. Mineralogía de la placa caída (Pzpc: Capas de las muestras 1 y 10) (AE: arcillas de la placa en contacto con la roca encajante a techo), arcillas del suelo de la cueva en diferentes puntos (A)

Discusión

Este trabajo es un estudio preliminar que permite describir los principales riesgos que presenta la cueva de Pozalagua y plantear hipótesis de estudio y mitigación de los procesos que generan dichas patologías. En este sentido, en lo que respecta a la disolución parcial por corrosión del interior de excéntricas tiene lugar en la zona más cercana de acceso a la cavidad y donde los techos son más altos. La corrosión de las excéntricas no se relaciona con puntos de goteo, y afecta a los espeleotemas más desde el interior, por lo que se infiere que el proceso que ocasiona dicha patología ha de estar relacionada con las condiciones ambientales de la cueva: corrosión por condensación en épocas de elevadas tasas de CO₂ en la cueva (similar a Faimon *et al.*, 2024 en las cuevas epigénicas del Karst de Moravian (Czech Republic). El aumento de la temperatura, la oscilación térmica, cambios en la concentración del CO₂ e incluso una mayor diversidad biológica, entre otras causas, pueden afectar las condiciones de condensación/

humedad de la zona. El estudio microambiental de este sector junto con la comparativa de los datos ambientales de los equipos instalados en otras zonas más bajas de la cueva permitirá esclarecer el proceso de corrosión.

En segundo lugar, la disolución completa de las estalagmitas, ésta podría ser consecuencia de la maduración natural del sistema kárstico (White *et al.*, 2021). El aumento del tamaño de las vías de circulación del agua por el epikarst provocaría una reducción del tiempo de residencia del agua meteórica en la roca y, por tanto, una disminución de la saturación de bicarbonato. En este escenario el goteo provocaría la disolución de los precipitados donde previamente formaba estalagmitas. Para corroborar esta hipótesis de trabajo se plantea muestrear el agua de goteo de estas zonas de disolución y el agua de goteo de estalagmitas activas para comparar los resultados del análisis hidroquímico en diferentes momentos del año hidrológico. Además, los datos obtenidos se podrán utilizar para realizar una modelización hidrogeoquímica que permita conocer mejor el sistema y simular posibles cambios de escenario.

Por último, para entender y mitigar el colapso de la placa o recubrimiento por calcita de las paredes se deben analizar diferentes factores: 1) Establecer las líneas de fracturación que generan escalones extraplomados en el techo, con tapices de espeleotemas, susceptibles de caer en la vertical de la pasarela; 2) Para poder establecer si una de las causas del colapso del recubrimiento del techo ha sido el aumento de carga (contenido de agua) dada la hidratación de las arcillas y por la acción de las fuerzas de gravedad, se realizarán observaciones en distintas zonas de la cueva, mediante microperforaciones, para conocer la distribución de arcillas en el contacto roca caja-precipitado de carbonatos; 3) Estudiar el posible cierre de la porosidad intercrystalina por incremento de la precipitación de carbonato, ligado a un aumento de la temperatura "puntual" de la cueva. Esta oclusión de la porosidad ha podido impedir la salida de la humedad (y/o acumulación de la fracción insoluble) de la roca a la cavidad, provocando el empuje y la caída de la placa. Para testar esta hipótesis se analizará el estado de los cristales y la porosidad intercrystalina mediante el uso del microscopio electrónico de barrido en las zonas seleccionadas tras el estudio petrográfico. Este estudio se completará con análisis de isótopos estables; 4) Se analizarán los datos ambientales (temperatura del aire, agua y roca, humedad ambiental, CO₂ ambiental y presión atmosférica) medidos en cuatro puntos del interior de la cueva. También se estudiará la dinámica de precipitaciones y los datos ambientales del exterior, y mediante herramientas estadísticas se tratará de identificar posibles cambios en las dinámicas que hayan podido afectar a las estructuras afectadas.

Agradecimientos

El estudio ha sido financiado por el Grupo de Investigación IT-1678/22 (Gobierno Vasco). Los autores agradecen el apoyo del Ayuntamiento de Karrantza y la colaboración de Jabier Les.

Referencias

Álvarez I, Andracka A, Aranburu A, Arriolabengoa M, Bilbao P, Dulanto D, Fernández-Pérez J, Granja J, Ibarrola M, Iriarte E, López-Horgue M, Moreno I, Moreno J, Prieto CE, Del Val M, Walters R, Yusta I, 2016. La Torca del Carlista. Uno de los mayores volúmenes subterráneos del mundo. Sua Edizioak, Bilbao.

- Aranburu A, Vadillo I, Damas L, García-Garmilla P, Iridoy P, Arriolabengoa M, Berreteaga A, Olaetxea C, 2010. Degradación de los espeleotemas de la Cueva de Praileaitz I (Deba, Guipúzcoa). En: Durán JJ, Carrasco F (Eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, pp. 435-450.
- Aranburu A, Álvarez I, Bodego A, Arriolabengoa M, Iriarte E, Del Val M, Bilbao P, Moreno J, García-García F, Cheng H, 2019. La cueva de Pozalagua (Bizkaia): CA 500 Ka de historia geológica registrados gota a gota. XV Reunión Nacional Cuaternario, Bilbao, pp. 277-280.
- Arriolabengoa M, Yusta I, Iriarte E, del Val M, Bilbao P, Alvarez I, Aranburu A (2015). Estudio mineralógico de las cavidades Pozalagua y Torca del Carlista. In "Estudio de las cavidades Pozalagua y Torca del Carlista. Un patrimonio espeleológico único" Enbata pp. 63-80.
- Cuezva S, Fernandez-Cortes A, Benavente D, Serrano-Ortiz P, Kowalski AS, Sanchez-Moral S, 2011. Short-term CO₂(g) exchange between a shallow karstic cavity and the external atmosphere during summer: Role of the surface soil layer. *Atmospheric Environment* 45, 1418-1427. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.12.023>.
- Domínguez I, 2014. Evolución y control de comunidades microbianas en cuevas turísticas. Tesis Doctoral Universidad de Sevilla.
- Faimon J, Baldík V, Štelcl J, Všíanský D, Rez J, Pracný P, Novotný R, Lang M, Roubal Z, Szabó Z, Hadac R, 2024. Corrosion of calcite speleothems in epigenic caves of Moravian Karst (Czech Republic). *Environ Earth Sci* 83, 184. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11449-w>.
- Gázquez F, Calaforra JM, Forti P, De Waele J, Sanna L, Rull F, Sanz A, 2013. Corrosion of calcite crystals by metal-rich mud in caves: Study case in Crovassa Ricchi in Argento Cave (SW Sardinia, Italy). *Geomorphology* 198, 138-146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.022>.
- López-Horgue MA, Aranburu A, Castellano A, Razkin A, Iridoy P, Arriolabengoa M, 2010a. La Cueva de Pozalagua (Karrantza, Bizkaia). En: Durán JJ, Carrasco F (Eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid pp. 383-396.
- López-Horgue MA, Iriarte E, Schröder S, Fernández-Mendiola PA, Caline B, Corneyllie H, Frémont J, Sudrie M, Zerti S, 2010b. Structurally controlled hydrothermal dolomites in Albian carbonates of the Asón Valley, Basque Cantabrian Basin, Northern Spain. *Marine and Petroleum Geology* 27, 1069-1092.
- Martín-García R, Martín-Pérez A, Alonso-Zarza AM, 2010. Petrological Study as a Tool to Evaluate the Degradation of Speleothems in Touristic Caves, Castañar de Ibor Cave, Cáceres, Spain. En: Andreo B, Carrasco F, Durán JJ, LaMoreaux JW (Eds.), *Advances in Research in Karst Media*. Springer Heidelberg, pp. 509-514.
- Martínez FJ, Galindo J, Liñán C, González L, Benavente J, Martínez M, Del Rosal Y, Fernández LE, Tendero V, Madarieta 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>.
- Sala P, Bella P, Postawa T, Wróblewski W, Gradziński M, 2023. Corrosion of carbonate speleothems by bat guano. *Sedimentary Geology* 454, 106454. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2023.106454>.
- White JH, Domínguez-Villar D, Hartland A, 2021. Condensation corrosion alters the oxygen and carbon isotope ratios of speleothem and limestone surfaces. *Results in Geochemistry* 2, 100008. <https://doi.org/10.1016/j.ringeo.2021.100008>.

Mina Garandina. Mina musealizada en las Minas de Santa Marta

Fernández Amo, F.J.¹

¹Técnicas Mineras de Santa Marta, S.L.
(C/ Estatuto de Autonomía s/n, 06150, Santa Marta, Badajoz)
e-mail: francis@tecmineras.com

Resumen

Las Minas de Santa Marta (Santa Marta, Badajoz), albergan un rico patrimonio geológico y minero. Actualmente se visita el poblado e instalaciones mineras, Museo de la Minería de Extremadura o el Museo Geológico de Santa Marta. Sin embargo, nunca se ha podido visitar una mina subterránea, ya que la mayoría de los accesos a las mismas es través de pozos y el acondicionamiento para visitas turísticas es complicado y muy costoso. No obstante, existe una mina cuyo acceso es más sencillo y desde hace más de 12 años se está intentando musealizar. Hablamos de la Mina Garandina, y ahora su visita es posible. Se trata de una mina de vanadio abandonada en el año 1905. Tiene un rico patrimonio geomínero en el que destaca la mineralogía, con presencia de filones de vanadatos y una amplia gama de minerales secundarios de Pb-Zn-V. Así mismo, alberga numerosas geodas, planos de falla mineralizados, que nos cuentan el origen del yacimiento, espeleotemas y otras formaciones geológicas; a lo que hay que unir los restos mineros de una explotación abandonada a principios de siglo XX, algunos de ellos de singular valor. Pero si por algo destaca la Mina Garandina, es por la gran cantidad de minerales fluorescentes, que son una seña de identidad de las Minas de Santa Marta; la presencia de calcita, adamita, smithsonita, hidrocincita, cerusita, esfalerita o aragonito aporta un cromatismo increíble cuando se encienden las luces ultravioleta (UV). Ese cromatismo también es muy llamativo sin fluorescencia, ya que el yacimiento es un gossan de vanadatos de plomo muy oxidado y silicificado, lo cual aporta una amplia gama de colores llamativos complementado por el brillo de innumerables pequeños cristales de cuarzo que tapizan las paredes de la vieja mina.

Palabras claves: geoturismo, luminiscencia, minas de Santa Marta, mina Garandina.

Abstract

The Santa Marta Mines (Santa Marta, Badajoz) have a rich geological and mining heritage. Currently, you can visit the town and mining facilities, the Extremadura Mining Museum or the Geological Museum of Santa Marta. However, it has never been possible to visit an underground mine, since most of the access to them is through wells and the preparation for tourist visits is complicated and very expensive. However, there is one whose access to mine is easier and for more than 12 years it has been trying to make it a museum, it is the Garandina Mine, and now its visit is possible. It is a vanadium mine abandoned in 1905. It has a rich geomining heritage in which the mineralogy stands out, with the presence of vanadate veins and a wide range of secondary Pb-Zn-V minerals. Likewise, it houses numerous geodes, mineralized fault planes, which tell us the origin of the deposit, speleothems and other geological formations; To which must be added the mining remains of an abandoned exploitation at the beginning of the 20th century, some of them of singular value. But if the Garandina Mine stands out for something, it is for the large amount of fluorescent minerals, which are a hallmark of the Santa Marta Mines; The presence of calcite, adamite, smithsonite, hydrozincite, cerussite, sphalerite or aragonite provides incredible chromaticism when ultraviolet lights (UV) are turned on. This chromaticism is also very striking without fluorescence, since the deposit is a gossan of highly oxidized and silicified lead vanadates, which provides a wide range of striking colors complemented by the brilliance of thousands of small quartz crystals that cover the walls of the old mine

Keywords: geotourism, luminescence, Garandina mine, Santa Marta mines.

Introducción y antecedentes

Las Minas de Santa Marta, junto con el Museo de la Minería de Extremadura y el Museo Geológico

de Santa Marta de los Barros (Badajoz, Extremadura) constituyen un interesante, atractivo y singular recorrido patrimonial geológico y minero de Extremadura. Además de albergar un rico patrimonio geológico, tiene en su conjunto numerosos espacios: poblado e instalaciones mineras, para que los visitantes puedan contemplar diferentes elementos de interés patrimonial geominero.

Las Minas de Santa Marta se declararon Lugar de Interés Científico de Extremadura, por su patrimonio mineralógico, geológico y minero, y tras su declaración se ha conseguido recuperar parte de las instalaciones y escombreras, convertidas hasta no hace mucho en un vertedero incontrolado de basuras y animales muertos. Así mismo, se ha conseguido recuperar algunos edificios e infraestructuras del poblado minero. La colaboración entre el Exmo. Ayto. de Santa Marta y TUGEOMINEX, S.L. como gestora de las Minas de Santa Marta ha conseguido convertir un espacio degradado en uno de los destinos geoturísticos y mineros más singulares de Extremadura.

Actualmente reciben unas 5.000 visitas anuales, pero para el desarrollo definitivo del proyecto y que las Minas de Santa Marta puedan valorizar su verdadero potencial geoturístico es necesario musealizar una mina de interior. Esto hasta hoy no ha sido posible, debido fundamentalmente a la complejidad de los accesos a las distintas minas, que son a través de profundos pozos mineros, lo que hace que sea extraordinariamente complejo y costoso habilitar el acceso a alguna de ellas. Sin embargo, existe una antigua mina de vanadio, perteneciente al antiguo distrito minero de Santa Marta, en el límite municipal entre Santa Marta y Villalba de los Barros. Se llama Virgen del Carmen, aunque popularmente se conoce como la Garandina. Su acceso es a través de un plano inclinado y permite un acondicionamiento más sencillo y menos costoso. Tras varios años de intento de compra de la finca, un particular ha conseguido adquirirla y se ha firmado un contrato de uso de la parcela con la gestora de las Minas de Santa Marta, TUGEOMINEX, S.L., para el acondicionamiento, musealización y gestión geoturística de la misma.

El acondicionamiento y recuperación patrimonial de la Mina Garandina es el complemento perfecto para el proyecto Minas de Santa Marta, y su apertura supondrá un impacto socioeconómico positivo para Santa Marta y para toda la comarca. La conservación de la riqueza patrimonial mineralógica y geominera de la Mina Garandina puede ser perfectamente compatible con el uso público, y este supondrá un nuevo y valioso recurso socioeconómico para la zona, aumentando considerablemente el número visitantes a las Minas de Santa Marta.

Mina Garandina

El área que comprende el antiguo distrito minero de Santa Marta está enclavada al sudoeste de la provincia de Badajoz, a unos 45 kilómetros al sudeste de la capital pacense, en los términos municipales de Santa Marta de los Barros y Villalba de los Barros. A la Mina Garandina se accede por un camino minero de 250 metros que parte hacia el norte del PK 88,300 de la carretera autonómica EX – 105 “Don Benito-Olivenza”.

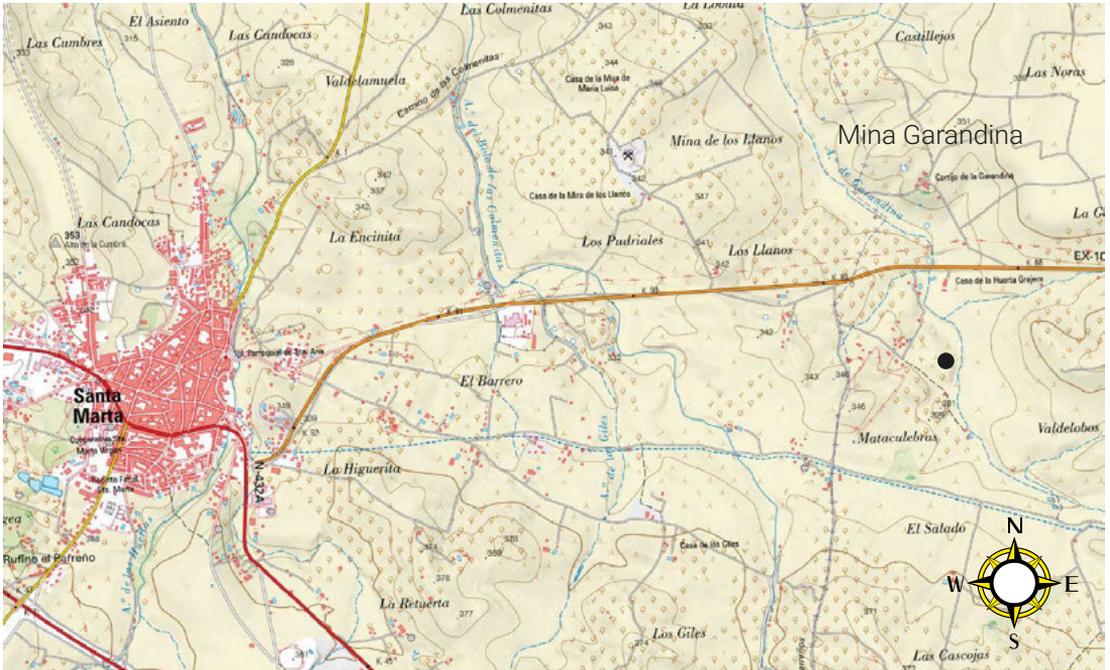


Figura 1. Mapa de localización. Fuente: Visor Instituto Geográfico Nacional

Patrimonio geológico de la mina Garandina

Como consecuencia del proceso de génesis de los yacimientos de plomo-cinc-plata-vanadio aparece la siguiente paragénesis mineral en la Mina Garandina: galena argentífera, esfalerita (marmatita), pirita, calcopirita, arsenopirita, cuarzo, calcita, siderita, malaquita, azurita, cerusita, adamita, anglesita, descloizita, smithsonita, aragonito, cuproadamita (var. de adamita), limonita, goethita, hidrocincita, rozenita, wulfenita, piromorfita, mimetita, vanadinita, endlichita (var. de vanadinita), campylita (var. de mimetita) y calderonita.

Destacan por el interés mineralógico las vanadinitas de la Garandina. Las vanadinitas de Santa Marta están reconocidas por su importancia mineralógica a nivel europeo, apareciendo citadas en numerosos tratados de mineralogía. En el interior de la mina Garandina se conservan espléndidos cristales de vanadinita, con una amplia variedad de hábitos y colores: prismas hexagonales, tabletas, fibroso radiada (figura 2), masiva, en forma de barrilete, globular, etc. Los colores varían entre anaranjado rojizo, amarillento, verde, crema, blanco y transparente. Pero no sólo por la variedad de hábitos y colores de la vanadinita tiene interés la Garandina, sino por la abundancia de las mismas a lo largo de la mina, donde se pueden encontrar filones, espeleotemas e incluso geodas con cristales de vanadinita (figura 3).



Figura 2. Vanadinita fibroso-radiada. (escala 4:1). Mina Garandina (Foto Francisco J. Fdez. Amo)

Existen así mismo otros minerales que si bien no tienen un alto valor mineralógico sí que son muy llamativos por la luminiscencia que tienen. En la Mina Garandina se encuentran los siguientes minerales luminiscentes: calcita, aragonito, plumbocalcita, hidrocincita, smithsonita, cerusita y adamita entre otros (figura 4).



Figura 3. Geoda con vanadinita y smithsonita (escala 3:1). Mina Garandina (Foto Francisco J. Fdez. Amo)

Estos minerales fluorescentes se localizan a lo largo de todo el recorrido por la mina, apareciendo en filones, geodas, costras, masivo, brechoide o minerales aislados, al ser expuestos a la luz UV, tanto de onda corta como de onda larga aportan unos colores y brillos de inusual belleza, y es uno de los principales atractivos de la Mina Garandina, por el impactante cromatismo que adquieren las paredes y bóvedas de la mina.

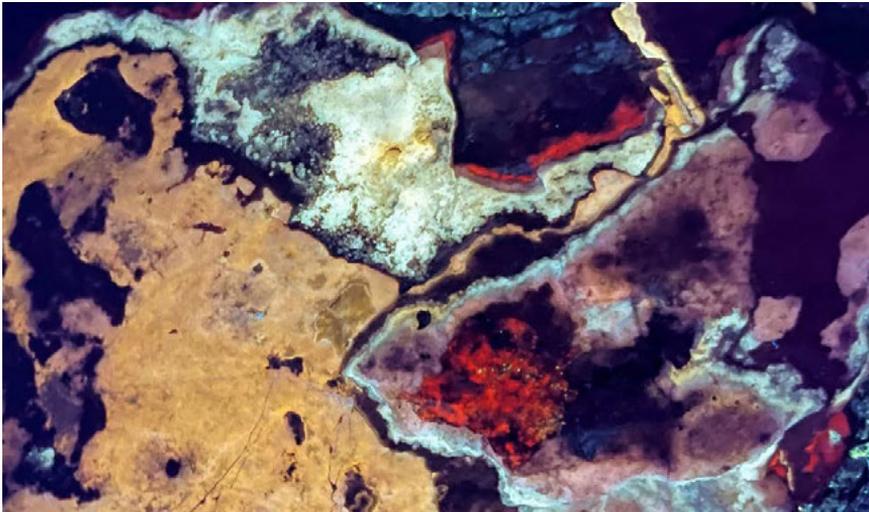


Figura 4. Calcita, plumbocalcita, cerusita, smithsonita e hidrocincita iluminadas con luz UV a 254 nm. (escala 1:1) Mina Garandina (Foto Francisco J. Fdez. Amo)

En las galerías de la Mina Garandina se observan diferentes elementos relacionados con la metalogénia del yacimiento: la presencia de numerosos filones (figura 5), texturas brechoides y fallas mineralizadas, nos indican una clara componente estructural en la génesis de la red filoniana de Pb-Zn. El origen de los fluidos mineralizantes está relacionado con el movimiento de fallas, y dentro de las galerías de la Garandina se pone de manifiesto un control estructural de la mineralización a favor de una zona de falla que ha servido como "canal o conducto" por donde ha circulado los fluidos mineralizadores en varias etapas. Estas zonas de falla actúan como una "trampa estructural" y su particular cinemática ha favorecido el depósito y concentración de los metales en determinados segmentos o partes de las mismas.

En la Mina Garandina se puede contemplar un potente yacimiento secundario de vanadio-plomo, con un espesor que supera los 40 metros de potencia. Las Minas de Santa Marta son un ejemplo de yacimiento secundario de vanadatos de plomo y su importancia llegó a ser tal que, entre los años 1908 y 1910, las minas fueron las que tuvieron mayor producción a nivel mundial de este metal. Las Minas de Santa Marta han sido objeto de estudio, investigación y explotación de vanadio desde finales del siglo XIX por parte de empresas mineras inglesas, francesas y españolas, y la Garandina se explotó desde el año 1897 hasta el año 1912 por parte de una empresa minera inglesa.



Figura 5. Filón de vanadatos (escala 1:10). Mina Garandina (Foto Francisco J. Fdez. Amo)

La génesis de este yacimiento ha generado numerosas formaciones de interés como estalactitas, estalagmitas o geodas; la abundante presencia de estas últimas llama la atención, con geodas de carbonatos, cuarzo y vanadinitas, que tienen tamaños variables de 2 cm a 50 cm de diámetro. De de todas ellas, destaca una gran geoda de calcita, smithsonita e hidrocincita con espléndidos cristales de vanadinita a unos 15 metros de la bocamina. Todo este conjunto de espeleotemas y mineralizaciones (óxidos de hierro, carbonatos y sulfatos de cinc, cobre, silicificaciones), aporta a la Mina Garandina una variabilidad cromática y de brillos que impactan en la visita, destacando los colores amarillentos y rojizos de las zonas de oxidación, los colores azules o verdosos de los sulfatos y carbonatos de cinc y cobre (figura 6), y los brillos de innumerables pequeños cristales de cuarzo que aparecen en drusas y geodas (figura 7) de la galería principal, resultado de una fuerte fase de silicificación del yacimiento.



Figura 6. Sulfatos de cinc y cobre (escala 1:3). Mina Garandina (Foto Francisco J. Fdez. Amo)



Figura 7. Geodas con microcristales de cuarzo (escala 1:2). Mina Garandina (Foto Francisco J. Fdez. Amo)

La Mina Garandina tiene un recorrido de unos 140 m., de los cuales solo son visitables unos 100 m. (figura 8). Se distinguen cuatro tramos visitables de galerías dispuestos irregularmente y siempre siguiendo la dirección del filón. En las paredes se pueden observar las huellas dejadas por las perforaciones (barrenos), que ayudan a explicar las técnicas de explotación empleadas; también quedan restos de testers (andamios mineros), pequeñas cámaras de explotación, pozo minero entibado, etc. Además, se conservan restos de la electrificación de la mina, así como utensilios mineros varios, conservados en el Museo de la Minería que se encuentra en el poblado minero de las Minas de Santa Marta.

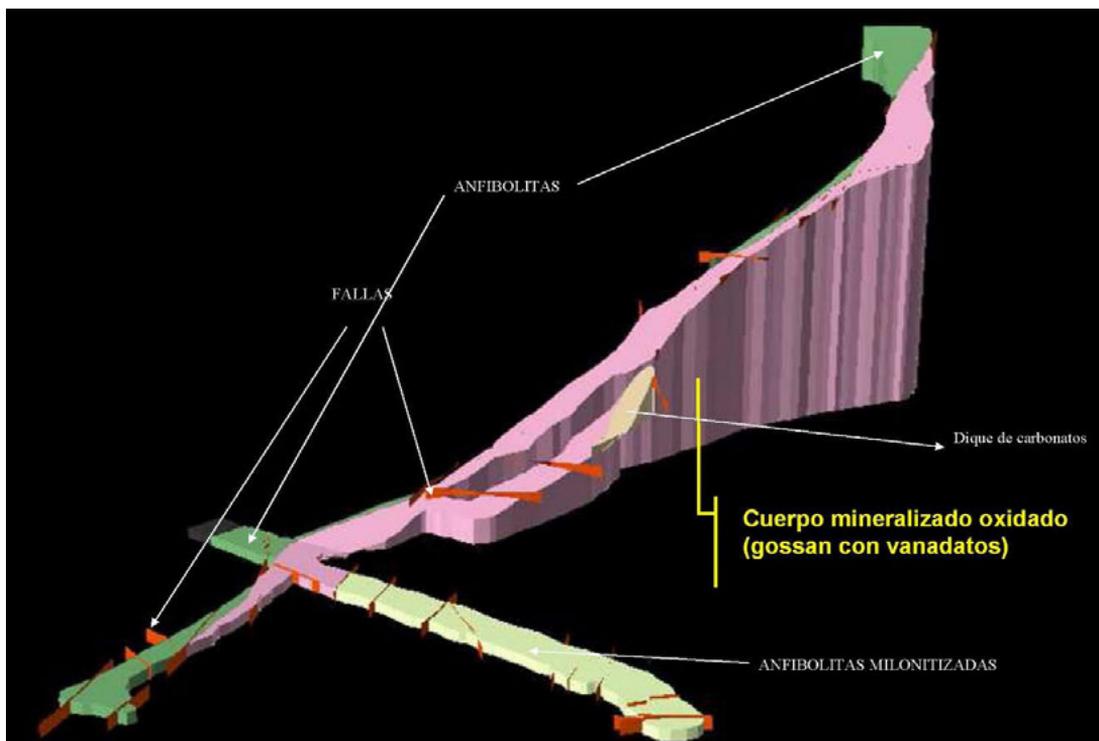


Figura 8. Croquis geológico galerías de la Mina Garandina (escala 1:300). (Foto Francisco J. Fdez. Amo)

Todo este patrimonio minero está musealizándose para que las visitas visualicen las técnicas y método de explotación, y cómo era la vida del minero de la Garandina hace más de un siglo.

Descripción de las obras de acondicionamiento

La Mina Garandina tiene situada su bocamina junto a un cortijo que le da nombre y que en su día albergó las instalaciones de las oficinas y almacén de la antigua mina (Virgen del Carmen) y posteriormente fueron acondicionadas y ampliadas para albergar una bodega de vino en los años 60 del siglo XX. La bocamina de la Mina Garandina se encuentra a 80 metros del Pozo Maestro.

La galería principal (figura 9) tiene su desarrollo en la dirección N140°E y se abre a través de una bocamina sin entibar. Las galerías no disponen de ningún tipo de estructura de entibado o sostenimiento, a pesar de esto último y tras más de 90 años abandonada las condiciones de estabilidad de la mina son óptimas.

Los trabajos tienen como objeto el acondicionamiento de la Mina Garandina para visitas turísticas, la recuperación del patrimonio geológico y minero, y la protección del espacio con cerramiento y vigilancia del mismo. Dentro de las diferentes actuaciones, la principal es la de recuperar las galerías mineras, y acondicionarlas para visitas turísticas, así como el acondicionamiento del acceso a la mina; mejoras de accesos actuales por caminos a la zona, suministro de luz y agua, iluminación, musealización, etc. Para todo ello se realizan obras de adecuación y accesos con limpieza y nivelación de pasos, instalación de escaleras de acceso, iluminación, construcción de zona de actividades, restauración de infraestructuras, y musealización de la Mina Garandina.

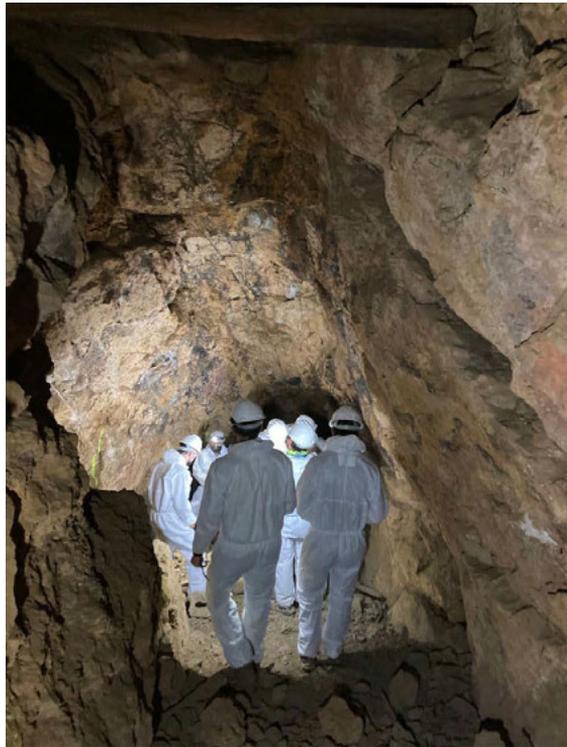


Figura 9. Galería de la Mina Garandina. (Foto Francisco J. Fdez. Amo)

En general las actuaciones consisten en la instalación de una escalera de tramex de acero galvanizado para el acceso desde el exterior hasta la Sala Central, la galería del Taho Calcitas se rebaja para un acceso cómodo de las visitas, así como la Sala Central y las galerías Taho Verde y Taho Polvorín. Así mismo, se equipa con iluminación la Mina Garandina, y para el suministro eléctrico se instalan placas solares sobre una de las naves existentes en el entorno. Se limpia

de pinturas las paredes de la mina, se retiran basuras y residuos del interior de las galerías. En lo relativo a la protección del patrimonio, se realiza un cerramiento del entorno minero, se instalan cámaras de videovigilancia y alarmas, y se realiza una musealización contextualizada en el espacio.

Descripción de la visita a la mina Garandina

La Mina Garandina se ha diseñado para que los visitantes puedan ver fenómenos geológicos de inusual belleza con mineralizaciones y un patrimonio industrial-minero de interés. La mina cerró en el año 1912 y no ha sufrido ninguna transformación desde entonces. El cromatismo y brillo de las paredes y techos de la galería, la impronta dejada por los mineros o la espectacular fluorescencia, unido al método de explotación (método de hurtos), antigüedad, y metal explotado, la hace diferente al resto de minas turísticas españolas.

La visita a la Mina Garandina es un complemento a la visita a las Minas de Santa Marta, la duración de la visita es de 45 minutos en los que los visitantes pueden ver la totalidad del primer nivel de la mina, con cuatro galerías y un recorrido aproximado de unos 100 metros. Es un recorrido corto pero lleno de elementos de interés geológico y minero, y con varios atractivos que no dejará indiferente a ningún visitante.

La Mina Garandina se encuentra en lo alto de un resalte topográfico con espectaculares vistas a la Comarca de Barros. En su exterior hay un espacio en el que se le explica a los visitantes cómo ha cambiado la economía local de la minería a la agricultura; se habla de la importancia de los cultivos de vid y olivo en la Comarca de Barros, en especial de los vinos de denominación de origen Ribera del Guadiana, ya que los viñedos que los visitantes contemplan están dentro de la ruta enológica Ribera del Guadiana. A unos 200 metros al norte de la Garandina, se pueden avistar distintos tipos de aves como aguiluchos cenizos, avutardas, sisones, milano real, milano negro, ánades, cigüeña blanca, garcillas, etc, que nidifican en las inmediaciones, en base a ello se explica la importancia de la ZEPA Complejo Lagunar de la Albuera espacio natural protegido donde se encuentran las Minas de Santa Marta. En el exterior de la mina, en un panel con un mapa geológico del entorno sitúa al visitante en el contexto geológico en el que se formó el yacimiento minero de vanadio y plomo.

La visita al interior de la Mina Garandina es a través de un plano inclinado en el que se habilitan unas escaleras cómodas con varias zonas de descanso que coinciden con zonas de parada y explicación de diversos recursos que alberga la mina. En la primera parada los visitantes empiezan a sorprenderse con los colores y brillos de las paredes y bóvedas de la mina, la sensación es que se encuentran en una cueva, más que en una mina. A la entrada, se observa un realce minero que coincide con el inicio del filón de vanadinitas. Este realce culmina en una pequeña cámara de 4 m² y 0,70 m de altura que está sobre de la galería principal. Dentro de esta cámara aún son visibles las huellas de la extracción con picos y martillos, e incluso en la misma se pueden encontrar espectaculares cristales de vanadinita. Esta pequeña cámara es un claro ejemplo de minería de hurtos, en la que los mineros trabajaban tumbados para extraer el mineral alumbrados por lámparas de aceite. En este hueco se aprecian las dificultades físicas para arrancar el vanadio de la mina. Bajo esta pequeña cámara, en uno de los hastiales, se encuentra una geoda con

espeleotemas de carbonato de cinc (smithsonita) incrustados en una roca limonitizada. Se trata de pequeñas estalactitas y estalagmitas y masas botroidales (figura 10) de tamaño decimétrico cuyo núcleo son cristales de vanadinita. La Mina Garandina conocida a nivel mundial en la que la vanadinita presenta este tipo de hábito mineralógico.



Figura 10. Estalactitas botroidales de smithsonita con vanadinita en el núcleo (escala 1:4). Muestra extraída de una escombrera de la mina Garandina. (Foto Francisco J. Fdez. Amo)

Tras pasar por debajo del realce hay un tramo de galería estrecho y bajo donde se sigue observando el filón mineralizado en los que ocasionalmente aparecen geodas silicificadas con minerales secundarios de Pb-Zn-V. Avanzando por la mina, tras sortear este tramo nos encontramos con un nuevo realce que está coronado con una chimenea de ventilación entibada con mampostería, típica de registros mineros finales del XIX, en los que no se efectuaban pozos de ventilación sino que dejaban pequeñas chimeneas para ventilar. Continúa la visita por un tramo con un realce de pequeñas dimensiones que en su punto más alto alcanza los cuatro metros, en el se observa un espejo de falla de considerables dimensiones y numerosas geodas de calcita y de cuarzo de dimensiones variables. Así mismo, hay numerosas marcas de barrenos mineros que conforman los restos de un cuele. En esta zona se explica cómo extraían el mineral y qué métodos de explotación empleaban. También se aprecian numerosos filones con vanadinitas y carbonatos que son fluorescentes, y hay una gran geoda de 0,4 m de diámetro con calcita, hidrocincita, cerusita, smithsonita y vanadinita, que a la luz UV es luminiscente.

Continúa la visita y varios metros más adelante aparece una cámara de 18 m² y 3,5 m de altura, en la que encontramos varios elementos patrimoniales geológicos de interés como: geodas de vanadita y calcita, espejo de falla, estalactitas de sulfatos de hierro hidratados (rozenita) y

limonitizados, filón oxidado de blenda y galena. En esta cámara se pueden observar filones con carbonatos y sulfatos que son muy fluorescentes, y bajo la luz ultravioleta el espectáculo de luz y color es espectacular (figura 11).



Figura 11. Luminiscencia de sala en el interior de la mina Garandina (Foto Manolo Tremiño)

De esta cámara parten cuatro galerías de desigual desarrollo, la primera de ellas (Taho Calcitas) comienza en la parte izquierda de la cámara, tiene su desarrollo a través del filón mineralizado, y concluye al llegar a un dique de calcitas. Esta galería alberga un rico patrimonio geológico: geodas, espeleotemas, mineralizaciones, filones, dique de calcitas, etc.; la fluorescencia es también muy espectacular en esta galería, mostrando grandes superficies fluorescentes con texturas brechoides de bellas tonalidades naranjas. También se observan hidrocincitas azules, calcitas blancas y adamitas verdes.

Volviendo a la cámara aparece un cruce de galerías, perpendicular a la galería principal parte una galería de unos 45 metros (Taho Verde). En esta galería podemos ver la falla que origina la mineralización, la galería es de fondo plano y se desarrolla desde el Pozo Virgen del Carmen hasta el fondo de galería que ocupa la parte más occidental de la explotación minera. Aún se pueden ver las marcas de los barrenos en las paredes sobre el filón mineralizado, la mayoría de la galería transcurre a lo largo de la roca encajante (anfíbolita). En las paredes de esta galería se puede ver una densa red de filones mineralizados, fluorescentes, y en este enclave se explica el origen del yacimiento. El Pozo Virgen del Carmen es un pozo que tiene 14 metros de profundidad

hasta el nivel de la galería del Taho Verde, pero se desconoce la profundidad del mismo. Este pozo está entibado con mampostería en los primeros 8 m., a partir de los cuales se puede ver que está excavado en la propia roca (anfíbolita)

Por último, hay un tramo de galería de 18 metros (Taho Polvorín) en la misma dirección del filón, y en el que los mineros no llegaron a localizar mineralización en esta galería ya que una falla desplaza la mineralización hacia el oeste, y por ello abandonaron la explotación.

Para finalizar la visita al grupo se le obsequia con un espectáculo natural de luminiscencia al apagar las luces y proyectar la luz UV sobre antigua vagoneta minera repleta de minerales luminiscentes, a la vez se iluminan las paredes y bóvedas generando una reacción de impacto visual sobre los visitantes.

La visita se hace en grupos de 12 personas, está permitida la visita con niños de todas las edades. También se realizan visitas teatralizadas al interior de la mina, donde los mineros ataviados como hace un siglo y con una iluminación similar hacen un viaje en el tiempo a los visitantes. La visita teatralizada culmina en el poblado minero con la posibilidad de una degustación gastronómica minera de finales de siglo XX.

Referencias

- Schneider Stuart, (2011) *The World of Fluorescent Minerals*. Ed. Schiffer
- González del Tanago, et al. 2003. Calderonita, un nuevo vanadato de hierro y plomo perteneciente al grupo de la Brackebuschita. *American Mineralogist*.
- F. J. Fernández Amo, C. Alcalde Molero y C. Subirón Garay. 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, nº 12. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 2010
- Solanilla Rodrigo, J.A. y Fernández Amo, F.J. (2021) Proyecto para el acondicionamiento de la Mina Garandina (Villalba de los Barros, Badajoz)
- Fernández Amo, F.J. (2023) Estudio de afección a red natura de la apertura de la Mina Garandina para visitas turísticas. (Villalba de los Barros, Badajoz)

Conociendo al turista de cuevas prehistóricas en Cantabria: ejemplo de metodología de diseño y realización de encuestas.

Moro Palacios, I.

CIESE- Fundación Comillas y Universidad de Cantabria

Resumen

Las cuevas prehistóricas de Cantabria han sido visitadas de manera sistemática desde principios del siglo XX, siendo la cueva de Altamira la más conocida pero no la única dentro del recorrido de cuevas visitables de la región. La innegable atracción por estos espacios patrimoniales a lo largo de este tiempo ha sido evidente. Sin embargo, el complejo comportamiento actual de la sociedad en cuanto a hábitos turísticos nos obliga a reflexionar sobre el perfil del turista que visita estos espacios patrimoniales. Con el objetivo de conocer los intereses y las motivaciones actuales del visitante de cuevas prehistóricas en Cantabria, se ha diseñado y realizado una encuesta específica en formato digital y online a través del formulario específico de la plataforma ArcGISsurvey. Los datos se recogieron durante los meses de junio a diciembre del año 2021 en los Centros de Recepción de Visitantes (CRV) de la Red de Cuevas Prehistóricas con régimen de visitas abierto durante la pandemia de Covid19 y que resultan una muestra significativa del conjunto. Esta metodología pretende acercarse a la realidad turística actual y promover nuevas investigaciones que conduzcan a la mejora de las políticas de gestión patrimonial y turística.

Palabras clave: cuevas prehistóricas, encuesta, motivación turística, sitios patrimoniales.

Understanding the tourist of prehistoric caves in Cantabria: A methodological example of survey design and implementation

Abstract

The prehistoric caves of Cantabria have been widely visited since the beginning of the 20th century, particularly the cave of Altamira. However, there are many other caves within the region that visitors can also tour. There is no question on the attraction that these heritage sites have had through time, functioning like tourist magnets. However, more recent tourists behavior patterns, makes research on this type of caves visitors, relevant and necessary in order to envision the changes that these sites are experiencing as well as to get a deeper understanding of the tourists themselves. In order to get a better insight into this matter, an online survey (ArcGISsurvey) has been conducted that aims to better understand current interests and the motivation behind tourists visits to these caves. The data collection took place from June through December 2021, at different visitor centers throughout Cantabria in partnership with the Prehistoric caves network. Those visitors centers remained opened through the Covid 19 Pandemic, and offer us a significant sample from which we can infer some valuable new trends on this particular tourism. New management policies and the improvement and maintenance of these heritage sites, should be reconsidered as a result, since there is a clear new visitor's pattern already taking place that should be addressed.

Keywords: heritage sites, prehistoric caves, survey, tourist motivation.

Introducción

La recolección de datos mediante encuestas se ha establecido como una herramienta útil para obtener información precisa y valiosa en diversos campos de estudio. Esta comunicación tiene como objetivo explorar una metodología innovadora para la realización de encuestas a visitantes,

dentro del contexto de una tesis doctoral llevada a cabo en la Universidad de Cantabria, centrada en el estudio del turismo en cuevas de Cantabria.

La metodología propuesta en esta investigación aborda varios de los desafíos tradicionales asociados con las encuestas, tales como la representatividad de la muestra y la formulación de preguntas claras y precisas. Además, se integran enfoques tecnológicos avanzados para optimizar el proceso de recopilación de datos y garantizar la exactitud de los resultados. La recogida de datos se realizó entre los meses de junio a diciembre del año 2021 en las cuevas de la Red de Cuevas Prehistóricas de Cantabria que permanecieron abiertas durante la situación excepcional del Covid-19.

Esta comunicación tiene como objetivo ofrecer un ejemplo detallado sobre cómo llevar a cabo encuestas sobre la demanda turística en el ámbito del turismo de cuevas. No solo se presenta un caso práctico, sino que también se ofrece una visión crítica de los métodos existentes, destacando sus limitaciones y proponiendo soluciones prácticas. De este modo, se pretende que esta investigación contribuya al campo del turismo subterráneo, proporcionando una línea de trabajo tanto para investigadores como para los gestores turísticos, con el fin de tomar decisiones sobre la gestión de la demanda turística. Así mismo, se espera no solo demostrar la validez de la metodología propuesta, sino también fomentar su adopción en estudios académicos y profesionales.

Los resultados obtenidos permitirán identificar las principales características y preferencias de la demanda turística que visita las cuevas prehistóricas, facilitando así la evaluación del comportamiento y la satisfacción general con los servicios ofrecidos. Finalmente, esta investigación tiene como objetivo proporcionar una herramienta valiosa para la toma de decisiones en el sector turístico, promoviendo un desarrollo más sostenible y eficiente del turismo de cuevas.

El estudio de la motivación de los turistas de cuevas

La oferta turística actual se caracteriza por su creciente diversidad y complejidad. En el ámbito específico del turismo subterráneo, esta diversidad se refleja en una amplia variedad de tipos de espacios subterráneos, que incluyen cuevas de interés geológico, sitios arqueológicos y espacios mineros (Durán *et al.*, 2006; Pillet, 2017). Estos lugares se destacan por la variedad de paisajes subterráneos y actividades turísticas que ofrecen (Castillo, 2022; Cigna, 2013). Cada uno de estos espacios presenta características y especificaciones concretas y particulares, donde se entrelazan el interés turístico con las exigencias de conservación y protección del medio patrimonial (Chiarini *et al.*, 2022; Cigna, 2016).

En cuanto a la demanda, las razones por las que la sociedad decide viajar y visitar ciertos lugares generan la necesidad de comprender y profundizar en las características de los diferentes tipos de visitantes y turistas. Es especialmente interesante observar el comportamiento en espacios catalogados como Patrimonio de la Humanidad por la Unesco caracterizados por una regulación muy estricta en cuanto a su uso y conservación (Adie y Hall, 2017; Antón *et al.*, 2017). Si bien, el objetivo de estas listas de la Unesco es preservar y conservar estos lugares, en muchos casos también representa un aumento significativo en el número de visitantes,

creando una fuerte relación entre la lista del Patrimonio Mundial, en particular la del patrimonio material, y el turismo (Musa *et al.*, 2024; Breakey, 2012) principalmente como podemos percibir en el caso del turismo de cuevas en Cantabria, con la marca Altamira como referente.

Hemos sido conscientes, además, de cómo en eventos extraordinarios, como fue la pandemia de Covid-19, la cultura supuso un revulsivo para la sociedad. Esto fue apreciable sobre todo en determinadas localizaciones vieron un aumento de visitantes, resultando especialmente atractivas las áreas rurales (Tegelberg y Griffin, 2024). En este contexto, la Red de Cuevas Prehistóricas de Cantabria experimentó un notable aumento en la demanda de visitas, a pesar de las restricciones impuestas en el número de visitantes debido a consideraciones sanitarias. Esto contrasta con otros destinos turísticos de alta demanda tradicional como la costa mediterránea y las Islas Canarias, especialmente durante los períodos estivales (Moreno-Luna, *et al.*, 2021; Muda *et al.*, 2024). Este fenómeno podría estar relacionado con el crecimiento del turismo nacional y la imposibilidad de recibir turistas extranjeros (Amissah *et al.*, 2022).

Todas estas características nos permiten reflexionar sobre la importancia de conocer a los visitantes, sus intereses y motivaciones al practicar el turismo cultural (Correia, *et al.*, 2013; Shanka y Phau, 2008). Acercarse a los motivos por los cuales los visitantes optan por el turismo subterráneo es de gran valor para las instituciones encargadas de gestionar este recurso patrimonial, ya que les permite adaptarse a las nuevas demandas (Jiao y Chen, 2019). Es importante recordar que este tipo de patrimonio es frágil y susceptible a daños (Ontañón, 2003). Por otro lado, es innegable que estos espacios tienen un gran valor social y desempeñan un papel crucial en la difusión del conocimiento y la valorización del patrimonio.

Ámbito espacial para la realización de la encuesta

La oferta de turismo de cuevas prehistóricas en Cantabria en la actualidad está formada por una variedad de espacios donde destaca, en primer lugar y como más conocida, la cueva de Altamira, declarada Patrimonio de la Humanidad por la Unesco en 1985. Más de dos décadas después, en 2008 la Unesco inscribió en la Lista del Patrimonio Mundial otras nueve cuevas cántabras con arte paleolítico: Las Monedas, El Castillo, Las Chimeneas y La Pasiiega, el Pendo, La Garma y Covalanas, Chufín y Hornos de la Peña. No fueron las únicas, Asturias y País Vasco también sumaron sus recursos patrimoniales a la lista¹. Es en este momento cuando el bien en su globalidad pasó a llamarse “La cueva de Altamira y el Arte Rupestre Paleolítico del norte de España” (Ontañón, 2015), comenzando así a gestarse la idea de conjunto patrimonial, traspasando territorialmente la comunidad autónoma de Cantabria y dando lugar a un significativo complejo interprovincial e interregional.

En la actualidad, a pesar de que no es posible visitar la cueva de Altamira siguiendo los mismos procedimientos que otras cuevas prehistóricas abiertas al público en Cantabria², su pasado turístico ha creado una marca de valor incuestionable. Por otro lado, es importante señalar que

1 *Las cuevas de Tito Bustillo, La Peña de Candamo, Llonín, Covaciella y El Pindal en Asturias; y Ekain, Altxerri y Santimamiñe en el País Vasco.*

2 *A pesar de que la cueva de Altamira tiene un pasado de gran afluencia turística, en la actualidad las visitas turísticas se concentran en el Museo Nacional y Centro de Investigación de Altamira, donde se halla la denominada Neocueva. Por estos motivos no se ha incluido la cueva de Altamira dentro de este estudio.*

solo algunas de las cuevas que forman parte de la Red de Cuevas Prehistóricas de Cantabria estuvieron abiertas durante la realización de este trabajo, como muestra la Tabla 1.

Cueva o Centro Cultural	Nombre y ubicación	Titularidad y gestión
Cuevas prehistóricas de titularidad estatal y Museo Nacional	Neocueva de Altamira, Museo Nacional y Centro de Investigación de Altamira, Santillana del Mar.	Estatal, Ministerio de Cultura, Gobierno de España
Cuevas prehistóricas de titularidad autonómica	El Castillo, Puente Viesgo. Abierta al público Las Monedas, Puente Viesgo. Abierta al público Hornos de la Peña, San Felices de Buelna. Cerrada al público El Pendo, Camargo. Abierta al público Chufín, Rionansa. Cerrada al público Covalanas, Ramales de la Victoria. Abierta al público La Cullalvera, Ramales de la Victoria. Abierta al público	Consejería de Cultura, Turismo y Deporte Gobierno de Cantabria, a través de la Sociedad Regional de Educación, Cultura y Deporte, s.l.

Tabla 1. Cuevas visitables en Cantabria durante el año 2021. Elaboración propia

Encuestas a visitantes: consideraciones previas

La encuesta tiene como objetivo investigar las motivaciones de los visitantes que frecuentan las cuevas pertenecientes a la Red de Cuevas Prehistóricas de Cantabria, así como sus intereses, fuentes de información y patrones de visita. El propósito es obtener información detallada sobre aspectos que serían difíciles de obtener de otra manera, como los intereses y motivaciones actuales de los turistas que visitan cuevas en Cantabria, así como sus características particulares. Para llevar a cabo este estudio, se elaboró y ejecutó una encuesta específica. Previamente, se diseñó un modelo de encuesta que fue aprobado por el director de la Red de Cuevas Prehistóricas visitables³. Posteriormente, se contó con la colaboración del coordinador de cuevas prehistóricas y los guías culturales⁴ para asegurar que la información sobre cómo participar en la encuesta estuviera disponible en los CRV.

³ Responsable Dr. Roberto Ontañón Peredo, quien concedió la autorización para la realización de dichas encuestas.

⁴ El coordinador de las cuevas prehistóricas de Cantabria, Dr. Daniel Garrido Pimentel, supervisó la colocación de carteles y folletos en los CRV.

Se estableció un período temporal para la recopilación de datos, abarcando las temporadas baja, media y alta, como se detalla en el siguiente apartado. Con el propósito de facilitar y asegurar una recolección efectiva de resultados, se optó por diseñar la encuesta en formato digital utilizando un formulario en línea dentro de la plataforma ArcGIS Survey. Esta elección no solo ha permitido la captura de datos de manera eficiente, sino también la posibilidad de cartografiar algunos de los hallazgos más significativos.

Diseño de encuesta: conociendo al turista de cuevas

La encuesta está compuesta por 15 preguntas de respuesta sencilla que pueden completarse en un tiempo aproximado de 5 o 10 minutos, lo que facilita a su vez la labor de clasificación y valoración⁵. En ella se incluyen diversas preguntas significativas para el análisis, alguna de las cuales se presentan, de manera sintética, en la Tabla 2. Con el fin de conocer las motivaciones de los visitantes, las preguntas se centraron en los siguientes aspectos:

- Los recursos utilizados para informarse sobre las visitas guiadas, tales como webs oficiales, folletos informativos distribuidos en puntos turísticos y centros de interpretación, recomendaciones en redes sociales y plataformas de reseñas de viajes.
- El conocimiento previo sobre el recurso patrimonial, indagando si los visitantes conocieron las cuevas a través de referencias directas de amigos y familiares, programas educativos, documentales, literatura, cine, guías turísticas y artículos de prensa especializada en arqueología y turismo.
- Las experiencias previas en otras cuevas, centros de interpretación y museos, que pueden ser valiosas para comprender cómo influyen en la percepción y expectativas de los visitantes.
- La motivación para la visita, ya que algunos visitantes buscan una experiencia educativa y cultural; otros buscan una experiencia emocional, mientras que algunos sienten una motivación personal o familiar, deseando compartir una actividad enriquecedora con sus seres queridos.

Además, se incluyó una pregunta abierta con el objetivo de realizar un estudio cualitativo sobre las opiniones de los visitantes. Este enfoque permitirá posteriormente un análisis comparativo con las opiniones manifestadas en otros medios, como Google Reseñas, TripAdvisor, entre otros.

Metodología en la recogida de datos

La recolección de datos representó un desafío considerable debido a la diversidad de los centros donde se llevó a cabo. Para abordar esta complejidad, se optó por utilizar encuestas estructuradas que facilitaran la participación de los visitantes. Además, se diseñó para que fuera una actividad atractiva, utilizando una tecnología intuitiva y ágil que permitiera a los encuestados responder utilizando su propio teléfono móvil, sin necesidad de recurrir a herramientas externas o al método tradicional de recoger respuestas en papel.

⁵ Para la realización de la encuesta por parte de los visitantes, se aprovechó el período de espera para adquirir la entrada o para entrar a visitar la cueva.

Pregunta	Respuestas de opción múltiple
Qué recursos han utilizado para informarse sobre las visitas guiadas.	Páginas web, redes sociales.
Cómo han conocido el recurso patrimonial.	Etapa educativa, literatura, cine, documentales, guías turísticas.
Experiencias previas en otras cuevas o centros de interpretación y museos, tanto en España como en el extranjero.	Selección entre cuevas en España.
	Selección entre cuevas situadas fuera de España.
El carácter de la motivación para la visita.	Conocer la prehistoria, interés en la geología, tiempo de ocio.

Tabla 2. Encuesta a visitantes. Algunas preguntas y tipo de respuestas. Elaboración propia

No obstante, un aspecto positivo fue la variedad de las cuevas accesibles al público, lo cual facilitó obtener una visión integral y representativa de las opiniones y experiencias de los participantes. Este enfoque contribuyó significativamente a asegurar la validez y la fiabilidad del estudio. A continuación, se expone la metodología empleada para la recopilación de datos.

La primera acción que se tuvo en cuenta fue el diseño de carteles y folletos atractivos para captar la atención de los visitantes (Figura 1). Tras varias pruebas, se colocaron carteles visibles en cada uno de los CRV que estaban abiertos durante el estudio, como las cuevas de Covalanas, La Cullalvera, El Castillo, Las Monedas y El Pendo. Estos centros funcionan como puntos de venta de entradas y ofrecen servicios para los visitantes. Dado que todos los visitantes deben pasar por la taquilla, se aprovechó esta ubicación estratégica para asegurar la visibilidad de los carteles. Además, se buscó generar una sensación de uniformidad entre los visitantes, considerando que muchos de ellos visitan más de una cueva. En cada CRV se distribuyeron también folletos junto a la taquilla, que los visitantes recibían junto con su entrada, asegurando así que llevaban consigo la encuesta y las instrucciones para completarla. En dichos carteles se incluía un código QR y un enlace web para que el visitante pudiera rellenar la encuesta desde su propio dispositivo móvil.



Figura 1. Diseño de folleto informativo sobre la encuesta. Elaboración propia

Se eligió esta forma de acceso a la encuesta debido al incremento en el uso de lectores de códigos QR durante la pandemia, lo que facilitaba una participación cómoda y accesible para el visitante, permitiéndole completar la encuesta desde su propio móvil de la siguiente manera:

- Leer el código QR a través de una app. Dicho QR lo tenemos visible en el cartel y en el folleto
- En caso de no disponer de una app de este estilo, podemos escribir el enlace web en el navegador del móvil. Este enlace estaba escrito tanto en el cartel como en el folleto.

Los datos se recogieron durante los meses de junio a diciembre del año 2021 en los siguientes CRV de las cuevas prehistóricas con visitas turísticas que permanecieron abiertos y que resultan una muestra significativa del conjunto⁶:

- Cuevas de Monte Castillo: El Castillo y Las Monedas, Puente Viesgo.
- Covalanas, Ramales de la Victoria.

⁶ Dada las restricciones motivadas por la pandemia Covid-19, durante la realización de la encuesta, no se dispone de datos para las cuevas de Hornos de la Peña y Chufín, debido a que permanecieron cerradas durante el proceso de recogida de datos. Sin embargo, durante esta etapa de restricciones sociales, el resto de estos espacios patrimoniales permanecieron abiertos y recibieron visitas.

- La Cullalvera, Ramales de la Victoria.
- El Pendo, Camargo.

Durante el periodo de recogida de datos, se registraron un total de 413 respuestas sobre un total de 46.273 visitantes⁷ que acudieron a las cuevas prehistóricas de Cantabria. La recogida de datos se llevó a cabo entre las temporadas alta, media y baja, comprendida entre los meses de junio a diciembre. Esta división estacional permitirá analizar las variaciones en el comportamiento y motivaciones de los visitantes en diferentes momentos del año, proporcionando una visión más completa y detallada sobre la gestión de estos importantes sitios arqueológicos.

Conclusiones. Problemas y posibles soluciones en la recogida de datos

Durante el período de recogida de datos, se evidenciaron diversas cuestiones debido a la naturaleza de los centros y sus notables diferencias. Una de las principales discrepancias fue la disparidad en el número de visitantes. Aunque los centros compartían el mismo horario de apertura, el número de visitantes varía considerablemente. Esta variación se debe a la naturaleza específica de cada cueva y a cuestiones de conservación.

La tecnología utilizada para recoger las encuestas fue bastante útil tanto para la recogida como para el análisis posterior. Sin embargo, se observó que los encuestados encontraron dificultades al seleccionar su lugar de origen, ya que la interfaz no resultaba del todo intuitiva. En ocasiones, se debió proporcionar asistencia en el lugar para ayudar a los visitantes a completar esa pregunta.

En cuanto al contexto de recogida de datos, esta se realizó durante un período en el que el turismo era principalmente nacional, debido a las normas vigentes para evitar el contagio de Covid-19. Por este motivo, resulta interesante continuar con esta labor y ampliar el trabajo en la actualidad, con el fin de considerar la variabilidad del turismo internacional y nacional en diferentes períodos, adaptando las estrategias de recogida de datos a estas fluctuaciones.

Agradecimientos

Deseamos agradecer la colaboración del Departamento de Geografía y Urbanismo de la Universidad de Cantabria por su apoyo técnico, así como a la Consejería de Cultura por otorgar los permisos necesarios. Queremos expresar nuestro especial agradecimiento al equipo de guías culturales de la Red de Cuevas Prehistóricas de Cantabria por su labor de difusión y asistencia en la realización de las encuestas.

Referencias

Adie B. A. y Hall. C. M. (2017). Who visits World Heritage? A comparative analysis of three cultural sites. *Journal of Heritage Tourism*, 12(1), 67-80. <https://bit.ly/3BZSn3QAdie>,

⁷ El margen de error aproximado para una muestra de 413 encuestados sobre una población de 46,273 visitantes, con un nivel de confianza del 95%, es aproximadamente $\pm 4,8\%$.

- Antón, C., Camarero, C. y Laguna-García, M. (2017). Towards a new approach of destination royalty drivers: Satisfaction, visit intensity and tourist motivation. *Current Issues in Tourism*, 20(3), 238–260. <https://doi.org/10.1080/13683500.2014.936834>
- Amissah, E.F., Addison-Akotoye, E., y Blankson-Stiles-Ocran, S. (2022). Service quality, tourist satisfaction, and destination loyalty in emerging economies. *Marketing tourist destinations in emerging economies: Towards competitive and sustainable emerging tourist destinations*, 121-147. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83711-2_6
- Castillo Parra, C. A. (2022). Geografía del turismo y el paisaje. *GeoGraphos*, 13(151), 227-263. <https://doi.org/10.14198/GEOGRA2022.13.151>
- Chiarini, V., Duckeck, J. y De Waele, J. (2022). A Global Perspective on Sustainable Show Cave tourism. *Geoheritage*, 14(82). <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00717-5>
- Cigna, A. A. y Forti, P. (2013). Caves: The most important geotouristic feature in the world. *Tourism and Karst Areas*, 6(1), 1-8.
- Cigna, A. A. (2016). Tourism and show caves. *Zeitschrift Für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 60(2), 217–233. https://doi.org/10.1127/zfg_suppl/2016/00305
- Correia, A., Kozak, M. y Ferradeira, J. (2013). From tourist motivations to tourist satisfaction. *International Journal of Culture, Tourism and Hospitality Research*, 7(4), 411-424. <https://doi.org/10.1108/IJCTHR-05-2012-0022>
- Durán, J. J., Fatás Monforte, P., Unzúe Pérez, F., y Ontañón Peredo, R. (2006). Los paraísos subterráneos, un bastión en el turismo de Cantabria. En *III Congreso Regional de Turismo de Cantabria. Cantabria Comunidad en progreso: el turismo de hoy en adelante* (pp. 109-126). Consejería de Cultura, Turismo y Deporte. Gobierno de Cantabria.
- Jiao, E., y Chen, J. (2019). Tourism forecasting: A review of methodological developments over the last decade. *Tourism Economics*, 25(3), 469–492.
- Moreno-Luna, L. Robina-Ramírez, R. Sánchez-Oro Sánchez, M. Castro-Serrano, J. (2021). Tourism and Sustainability in Times of COVID-19: The Case of Spain *International Journal Environmental Research and Public Health* 18(4), 1859; <https://doi.org/10.3390/ijerph18041859>
- Muda, I., Vohra, S.K., Gangwar, V.P. et al. Evaluation of economic, environmental, and social impacts of COVID on rural tourism. *Environment Development and Sustainability* (2024). <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04884-z>
- Musa, H. G.; Fatmawati, I.; Nuryakin, N.; y Suyanto, M. (2024). Exploring how sustainable destination preference mediates the effects of tourists' motivation on satisfaction. *GeoJournal of Tourism and Geosites*, 54(2), 941–952. <https://doi.org/10.30892/gtg.542spl18-1269>
- Ontañón Peredo, R. (2003). Protección, conservación y gestión sostenible de las cuevas con arte rupestre en la Cornisa Cantábrica. En *Actas Jornadas Técnicas La Conservación del Arte rupestre: Sostenibilidad e integración en el paisaje* (pp. 123-132). Junta de Castilla y León, Consejería de Cultura y Turismo.
- Ontañón Peredo, R. (2015). La conservación de las cuevas prehistóricas de Cantabria y la declaración de Patrimonio Mundial. *Instituto de Prehistoria y Arqueología. Sautuola*, XX, 445-456.
- Shanka, T., y Phau, I. (2008). Tourism Destination Attributes: What the Non-visitors Say – Higher Education Students' Perceptions. *Asia Pacific Journal of Tourism Research*, 13(1), 81–94. <https://doi.org/10.1080/10941660701883383>
- Tegelberg, M. y Griffin, T. (2024). Remembering for resilience: nature-based tourism, COVID-19, and green transitions. *Frontiers in Sustainable Tourism*, 3 <https://doi.org/10.3389/frsut.2024.1392566>

Marketing y el poder del merchandising: cuando aportas un poco de la cueva a casa

Jorge, N.A.⁽¹⁾⁽²⁾

⁽¹⁾ Diretor Grutas de Mira de Aire, SA. Av. Dr. Luciano Justo Ramos, 470 - 2485-050 Mira de Aire (Portugal).
geral@grutasmiradaire.com

⁽²⁾ Segundo Vice Presidente de International Show Caves Association

Resumen

Desde antes de la creación de los conceptos modernos, el ser humano utiliza técnicas para vender sus productos haciendo que sobresalgan sobre los de su competencia. Este proceso ha evolucionado no solo en la venta directa, también como una vía para que las marcas queden en el subconsciente de los clientes, haciendo que vuelvan a adquirir los mismos o diferentes productos de una misma marca. Así como los productos evolucionan, también lo hace su promoción y eso es válido también en el espeleo turismo. A lo largo del tiempo surgen nuevas formas de visitar y promocionar las cuevas y su entorno. Manteniendo como premisa que el atractivo principal es la cueva, ¿cómo podremos maximizar la experiencia de las personas a lo largo del tiempo? La respuesta puede pasar por un recuerdo para que te rememores lo bien que lo has pasado, o un regalo a un familiar o amigo. Demostraré en el desarrollo del texto cómo algunos cambios han mejorado nuestras ventas de recuerdos y así maximizar la memoria de la experiencia que es visitar la cueva.

Abstract

Since before the creation of modern concepts Man has been using different techniques to sell its products making them stand out from their competition. That process has been evolving not only for direct product sales but also in a way that brands will stay within the buyer's subconsciousness making them reacquire the same products or different products from the same brand. Both products and their promotion have evolved which is also valid for speleotourism, as time goes by, new forms to visit caves are developed as well as ways to promotion caves and their region. Keeping in mind that the cave is the main asset, how do we maximize our guests experience through time? The answer might lie with the gifts, either by a souvenir bought to remember the good time spent at the cave or as a gift for a family member or friend. Through this text, I will show how some changes have improved our gift sales and thus maximizing the memory of the experience that is to visit the cave.

Introducción

El objetivo de cualquier negocio es generar ganancias. A través de los tiempos se inventaron formas de maximizar el beneficio de los negocios, expandiendo actividades y creando nuevas técnicas para promocionar los productos.

En este trabajo voy a demostrar cómo han evolucionado las técnicas de promoción de los productos y cómo la diversificación puede ser una herramienta muy valiosa en la promoción de las cuevas y minas turísticas, así como para maximizar la experiencia de la visita.

Concepto y evolución del marketing

Según el diccionario Etimológico, el término marketing viene del inglés *Market* (mercado).

Originalmente tendría origen en el término *mercari* o *mercare* que significa negociar o el acto de practicar la compra y la venta, que a su vez viene del latino *merx* que es el nombre atribuido a la mercancía en la época romana.

Durante siglos, la gente vendía sus productos en los mercados pregonando su mercancía verbalmente.

En 1450 Johannes Gutenberg inventó imprenta moderna, que llevo a una producción masificada de folletos y a partir del año 1600 los anuncios eran ya muy utilizados en Italia y Inglaterra.

En 1605 se publica el primer periódico en Alemania y en 1730 los periódicos diarios ingleses dedican ya más de la mitad del espacio disponible a anuncios de productos.

Alrededor de 1800, con el telégrafo, se da el primer caso del fenómeno que hoy conocemos como SPAM y se empiezan a utilizar las cartelerías.

Cuevas como Postojna en Eslovenia recibe visitantes desde 1819, y la Cueva de Han-Sur-Lesse en Bélgica, empieza a promocionarse con carteles desde 1856 (Figura 1).

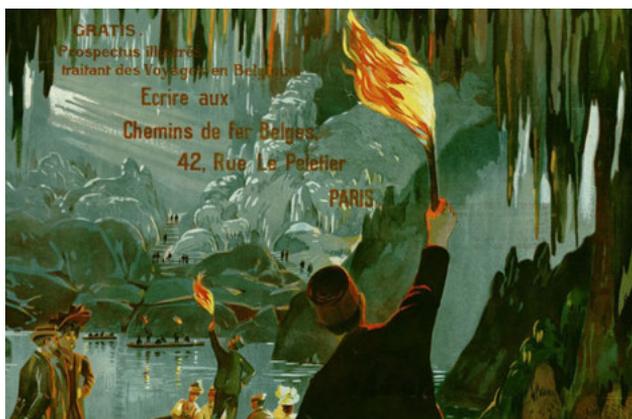


Figura 1. Cartel turístico de la cueva de Han-sur-Lesse (Bélgica)

A partir del año 1880 empiezan los primeros conceptos de marca comercial y en 1902, finalmente, se imparte el primer curso de marketing en la Universidad de Michigan por Edward David Jones.

Cuevas como Luray en el Estado Americano de Virginia (abierta al público en 1906) o la Gruta de las Maravillas en Aracena (abierta al público en 1914) aparecen en periódicos, llevando la noticia de los descubrimientos a todo el país (Figura 2).

En 1935, una de las primeras definiciones del Marketing dice: *“La comercialización es la realización de las actividades comerciales que dirigen el flujo de bienes y servicios de los productores a los consumidores”* (Ringold y Weitz, 2007).

Por los años 40 se hace una reevaluación del marketing, tras un cambio en la demanda y una definición más científica y se hace el primer cartel publicitario en la tele.

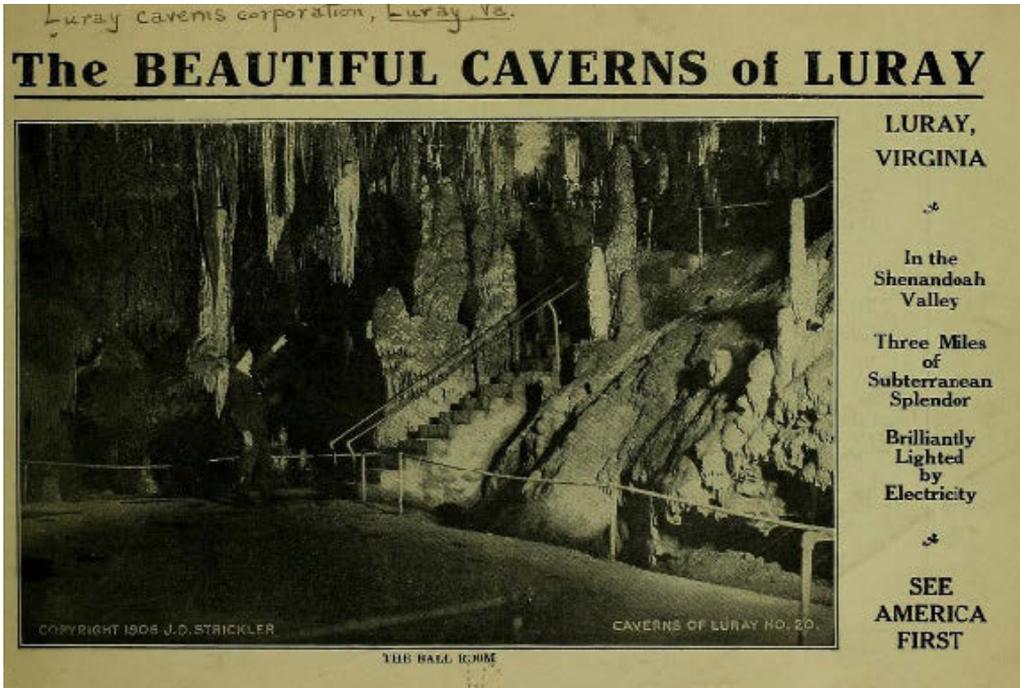


Figura 2. información en periódico sobre las cuevas de Luray (1906)

En los 50 el número de anuncios publicitarios en la tele ya sobrepasa el de la radio y se publican tres libros clave del Marketing: "Comportamiento de marketing y acción ejecutiva" de Wroe Alderson (1957), "Gestión de Marketing" de John Howard (1963) y "Marketing gerencial: perspectivas y puntos de vista" de William Lazer (1962). Además, se empiezan a estudiar los comportamientos de los consumidores, sobre todo las razones y los hábitos por los que los consumidores eligen entre marcas comerciales.

En 1960 E. Jerome McCarthy publica lo que es ya un clásico del marketing, "Marketing Básico: Un Enfoque Gerencial".

En los años 70 se empieza a desarrollar el e-commerce y el macromarketing, con un abordaje a las consecuencias sociales y ambientales que generan las prácticas de mercado.

En los 80 se da un boom de desarrollo electrónico y de tipos de marketing. Llega la comercialización de bases de datos, el marketing relacional, marketing de guerrilla, la autoedición y el "spam" orientado por ordenador.

En 1991, las comunicaciones de marketing integradas (IMC) adquirieron reconocimiento académico y se consolidaron en el ámbito de las promociones y la planificación de marketing. A mediados de la década de 1990, se introdujo el marketing viral (1996) y comenzaron a surgir los primeros motores de búsqueda, destacando la creación de Google en 1998.

En el nuevo milenio, el marketing integrado adquiere una gran aceptación, lo que se refleja en la apertura del primer centro de investigación académica en 2002. Posteriormente, surgen las redes sociales, con MySpace y LinkedIn en 2003, Facebook en 2004 y Twitter en 2006.

En 2010 se habla ya del marketing digital que estudia el comportamiento de consumidores y las prácticas del marketing online y en redes sociales.

Marketing estratégico

Como dicen Kotler, Wong, Saunders y Armstrong en la cuarta edición europea (2005) de "Principios de Marketing", *"el marketing trata de los clientes (...) cada uno de nosotros es un cliente en un área de la interrelación humana, desde el consumo de educación y salud o la cola en la oficina de correos, a volar en una aerolínea con descuento, en cada transacción financiera, de la compra de galletas a la compra de un teléfono móvil. Crear valor y satisfacción para el cliente es el núcleo del pensamiento y de la práctica del marketing moderno."* (introducción).

Desde un punto de vista más simple, la función del marketing es la de generar beneficios con la satisfacción del cliente.

Una herramienta esencial para influir en la elección de un producto o marca es la mezcla de mercadotecnia o Marketing Mix, también conocida como las cuatro "P". Su origen se remonta a la década de 1940, cuando el profesor James Culliton de la Universidad de Harvard fue el primero en hablar de ello (Banting y Ross, 1973).

En los años 60, McCarthy empezó a presentar las cuatro P del Marketing con una visión gerencial que cubría análisis, comportamiento del consumidor, investigación de mercado, segmentación de mercado y planeamiento (McCarthy, 1960).

Algunos autores más modernos han cambiado algunas de las cuatro P del Marketing o juntado otras, teniendo en cuenta más aspectos como las personas o los procesos de creación de productos.

Las cuatro P iniciales son, Producto, Precio, Distribución (*Place*) y Promoción.

El producto se refiere a cualquier bien o servicio que se ofrezca en un mercado para su adquisición o uso, con el fin de satisfacer una necesidad. Esto incluye no solo bienes tangibles, sino también ideas, personas, lugares, organizaciones e instituciones. El producto abarca aspectos como su diseño, innovación, marca, embalaje y etiquetado, así como las garantías y el soporte asociados (McCarthy, 1960).

En nuestro caso, como gestores de cuevas turísticas, el Producto se compone de un bien, que es la cueva en sí, y un servicio, que consiste en ofrecer visitas a un entorno que, de otro modo, estaría accesible únicamente para espeleólogos.

El precio se refiere al proceso de asignar un valor a un producto, lo cual incluye la consideración de descuentos y otros ajustes. Este valor se determina en función de la satisfacción o utilidad que el cliente obtiene al adquirir y consumir el producto. No necesariamente implica un intercambio monetario; el precio también puede representarse en términos de tiempo, energía, atención u otro sacrificio que el cliente esté dispuesto a realizar para obtener el producto o servicio (McCarthy, 1960 pp 12-13).

¿Qué precio tiene esta experiencia de visitar una cueva turística? Hay muchos factores que influyen en el precio que tiene una cueva, la singularidad de sus formaciones, si tiene o no hallazgos arqueológicos, qué tipo de visita se hace e incluso, la realidad económica del país. A los visitantes provenientes de un país con mayor poder adquisitivo, la visita a una cueva puede parecerles económica, mientras que los habitantes locales podrían percibirla como costosa. La distribución o plaza es el medio por el cual un producto llega satisfactoriamente al cliente. Incluye los canales e intermediarios, como los mayoristas y minoristas, refiriéndose también a cómo el entorno en el que se vende el producto puede afectar a las ventas (McCarthy, 1960 pp 11).

La mayoría de las cuevas abiertas al público realizan ventas directas a los visitantes; sin embargo, hay algunas que solo pueden ser visitadas mediante reserva anticipada, lo que a veces requiere la intervención de un intermediario para facilitar la visita. De manera similar, casi todas las cuevas reciben grupos organizados por excursionistas o agencias de viajes, que se encargan de promocionar sus servicios.

La promoción abarca todos los aspectos comunicacionales del marketing, tales como la publicidad, promociones, relaciones públicas, ventas personales, colocación de productos, entretenimiento de marca, eventos de marketing, exhibiciones y ferias (McCarthy, 1960 pp 12).

En el caso de las Cuevas de las Güixas, visitas especiales como las temáticas o teatralizadas atraen a nuevos visitantes, así como a aquellos que, ya conociéndolas, buscan una experiencia diferente. Por nuestra parte, con las nuevas visitas "Viaje al Centro de la Tierra", hemos optado por contar con comunicadores diversos que presentan la cueva desde su propia perspectiva. Del mismo modo, la visita "5 Sentidos" surgió tras observar cómo varias cuevas ofrecían experiencias más deportivas; aunque no está dirigida al público masivo, ha tenido una excelente acogida.

En respuesta a las críticas que algunos autores han planteado sobre las limitaciones de las cuatro "P", en la década de 1990 surgió el marketing moderno, propuesto por Robert Lauterborn en la revista Advertising Age, quien introdujo el concepto de las cuatro "C": consumidor o cliente, coste, conveniencia y comunicación.

El consumidor se refiere a la persona o grupo que hace la compra del producto, es un aspecto del modelo que tiene enfoque en sus necesidades y voluntades (Hester, 2019).

¿Quiénes buscan visitar la cueva? Generalmente, se trata de una mezcla de diferentes grupos: familias, escuelas, jóvenes, adultos, entre otros, dependiendo de la época del año. En Portugal, por ejemplo, en el mes de agosto se observa un aumento significativo de portugueses que residen en el extranjero y regresan al país para visitar a sus familias. Estos visitantes suelen aprovechar la ocasión para mostrar a los más pequeños una parte de su país de origen.

El coste se refiere a lo que se intercambia por el producto. Normalmente, esto se traduce en el valor monetario del producto, pero también puede incluir otros sacrificios que el consumidor debe realizar para obtenerlo, como el tiempo o los gastos de transporte (Hester, 2019).

La conveniencia, que en el modelo original corresponde a la distribución o plaza, se refiere al lugar donde se vende el producto. Este no se limita a una tienda o lugar físico, sino que también incluye la venta personal o en línea. El concepto de conveniencia enfatiza la facilidad con la que las personas pueden adquirir los productos (Hester, 2019).

Hoy en día, algunas cuevas han adoptado el modelo de venta en línea con reserva anticipada, mientras que otras siguen el enfoque de "primero en llegar, primero en ser atendido". Esta elección puede estar influenciada por la propia naturaleza de la cueva o mina, que a menudo tienen recorridos circulares y limitaciones en el número de visitantes que pueden recibir.

La comunicación, equivalente a la promoción en las cuatro "P" originales, se refiere a cómo las personas conocen los productos. A diferencia de la promoción tradicional, la comunicación abarca no solo la publicidad, sino también el retorno generado a través de medios digitales o redes sociales (Hester, 2019).

Las ferias de turismo, como FITUR, representan otro canal importante de distribución y comunicación, ya que muchas personas asisten a estas ferias en busca de destinos para visitar durante sus vacaciones.

El merchandising y el ciclo de vida de los productos

El merchandising es la práctica destinada a fomentar la venta de productos al consumidor. Su objetivo principal es aumentar la rentabilidad de los puntos de venta a través de estrategias como la disposición visual de los productos, el diseño del embalaje, el precio y las promociones. En resumen, el merchandising busca captar la atención del cliente, dirigirlo hacia el producto y facilitar el proceso de compra.

El merchandising a menudo se centra en las costumbres culturales, festividades y épocas del año. Del Día de San Valentín hasta el fin de año, numerosas son las festividades que se utilizan para resaltar los productos típicos de esas fechas, integrando el enfoque cultural del país y región donde se hace la venta. Además, este enfoque cultural no siempre está limitado a la estacionalidad.

A los productos se asocia una evolución de ventas mientras están disponibles en el mercado. Esto se llama Ciclo de Vida del Producto (Levitt, 1981) y tiene cuatro etapas principales: introducción, crecimiento, madurez y declive (Figura 3).

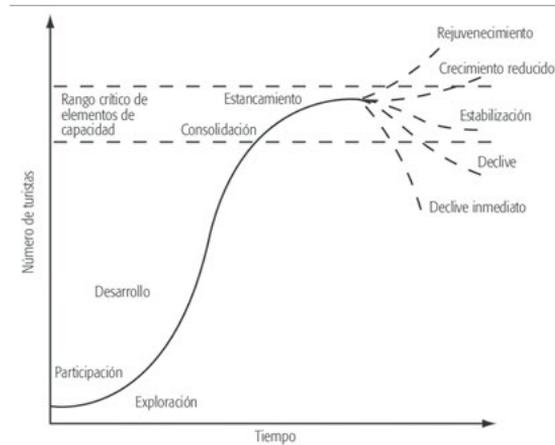


Figura 3. Ciclo de vida de los productos (Butler, 1980)

Desde el concepto de un nuevo producto a su primera venta, se habla de la Introducción, que incluye la publicidad que se hace al producto con objetivo de estimular la venta.

En la fase de crecimiento la demanda del producto aumenta, por ser una novedad, tener interés, un precio atractivo o por la moda. Los competidores imitan las ideas para intentar posicionar sus propios productos, incluso se testan precios y canales de distribución diferentes.

Con la madurez, los consumidores ya están acostumbrados a los productos o marcas y los mercados se saturan, comienza la competencia de precios mientras los distribuidores de los productos aumentan y se intenta valorar un producto o marca en comparación con los de los rivales más directos.

A medida que la demanda de los productos empieza a disminuir se puede entrar en una fase de declive, en esta fase la empresa tiene varias opciones. Mantener el producto desarrollando su rejuvenecimiento con nuevas funcionalidades, atractivos o atributos. Quitar el producto del mercado reduciendo sus costes y continuando su distribución solo en determinados nichos de mercado o terminar con la producción y liquidar el estocaje, con ofertas o promociones.

A veces, para una promoción efectiva de los productos en cada fase de su vida, es necesario un planeamiento estratégico y un análisis de escenarios, lo que se llama análisis DAFO (Debilidades, Amenazas, Fuerzas y Oportunidades) (Weihrich, 1982).

El poder de tu recuerdo

En nuestras cuevas el producto principal es la experiencia de visita en sí, es una mezcla de protección de la naturaleza, educación ambiental y entretenimiento.

Juan José Duran Valsero y colaboradores, en su *“Manual de Instrucciones – Como visitar una gruta turística”* dicen *“Inmediatamente después de la visita... Cuando vuelva a salir a la superficie, se dará cuenta, con toda probabilidad que el tiempo ha pasado muy rápido. Su visita al interior de la cueva le habrá parecido muy corta. No se preocupe, aún le quedan muchas maneras de ampliar su experiencia... También es probable que exista una tienda., donde quizás pueda encontrar material divulgativo sobre la cueva, libros, folletos, o incluso artículos relacionados con la cueva, como camisetas o similares...”*

Sigue con *“(...) Después de la visita”* es un concepto también muy dilatado en el tiempo. Por lo general, el momento para volver a disfrutar de la visita presencial a la cueva, extendiéndola todo lo posible, es una vez de regreso al domicilio, días o semanas más tarde.” (Durán et al., sin fecha)

En seguida, en las actividades que sugiere encontramos la creación de un álbum fotográfico, realización de una sesión fotográfica con la familia y amigos, publicación de la experiencia en las redes sociales, terminar de resolver las dudas que quedaron después de la visita y comenzar a preparar su nueva a visita a una cueva.

Me atrevo añadir la separación y catalogación de los recuerdos, entre los que se quedan con el visitante y el recuerdo para el amigo o familiar que no compartió la experiencia.

Volviendo a los principios del marketing, el objetivo es la satisfacción del cliente, y como dicen Durán et al. (sin fecha) nos interesa extender la visita a nuestras cuevas lo más posible.

Como caso práctico, en el gráfico 1 se puede ver la evolución en los últimos diez años. Aquí se compara la evolución de las ventas en tienda con el número de visitantes, teniendo en cuenta, solo ventas de recuerdos.



Gráfico 1. Evolución de las ventas en tienda con el número de visitantes en los últimos 10 años

En el caso de las Cuevas en Mira de Aire, se notó un cambio de demanda del visitante y del recuerdo que se lleva. En el gráfico 1 se demuestra como en los últimos 10 años cambió el número de visitantes y las ventas de recuerdos. Si comparamos los números, en 2023 se vendieron 227.101€ de recuerdos para un universo de 178.439 visitantes lo que no parece mucho, pero es una media de 1,27€ por visitante.

No parecen datos muy alentadores, pero utilizando el mismo sistema, la media por visitante fue de 0,40€ en 2013 y también de 0,40€ en 2019.

Considero también que, dado que entre los visitantes hay personas nacionales y extranjeras, todo el regalo que tenga el nombre de la cueva es publicidad, pagada por los propios compradores, que lleva el nombre del producto a todas las partes del mundo.

También, hay que señalar también un cambio y evolución en los productos disponibles en tienda, ya que lo que se vendía en los años 1980 puede no ser lo mismo que se ofrece en 2020. Por ejemplo, hace unos años se vendían muchos productos en barro rojo, que en la actualidad han caído en desuso. Sin embargo, hay algunos productos que siempre tienen demanda, especialmente los minerales y los imanes.

En el gráfico 2 se puede ver la evolución de los datos de 2013, 2019 y 2023. Entre 2013 y 2019 el porcentaje de ventas de recuerdos es el mismo (4%), incluso, un poco por debajo de las ventas de Bares (cafetería y el restaurante) (6%).

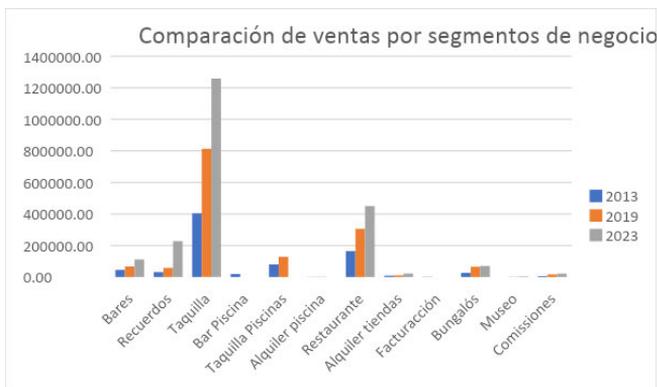


Gráfico 2. Comparación de ventas por segmento de negocio.

En 2023, con nuevos productos y más diversidad, incluso con la introducción de algunos productos locales, las ventas de recuerdos superan las ventas del bar. Si analizamos el gráfico, se puede ver que en los distintos segmentos el único que más que dobló en porcentaje de ventas fue precisamente la venta de recuerdos, pasando a contribuir con el 11% del total de los ingresos.

Se hizo un análisis a los proveedores de la cueva, y se cogieron los que mejores condiciones hacían, garantizando una buena relación coste/ calidad/ venta, y manteniendo como meta la satisfacción del cliente.

En el último congreso de ISCA en Tejas se habló de la importancia del marketing y del mantenimiento de una promoción diaria en las redes sociales. La cueva ya no es sólo un medio de información, tiene que ser un conjunto de información científica, espectáculo y entretenimiento.

A través del uso de redes sociales hace que la gente se acuerde que existes, que aún estás en mercado y que sigues teniendo novedades. Se pueden utilizar las redes como herramienta de promoción tanto de la cueva, como de los productos disponibles en tienda. Puede que no tenga una relación directa, pero a algunos de los seguidores de las redes sociales les gustará tener algo nuevo que ver. Además, puede que a través de algún enlace se llegue a alguien que aún no conozca la cueva y que despierte su interés en conocerla.

Conclusiones

Hoy usamos con normalidad conceptos como marketing o merchandising, a veces, sin tener en cuenta su origen. Antes de la invención de la prensa por Johannes Gutenberg, en 1450, la única vía de promoción para aumentar la venta de los productos, era el boca a boca.

Con el paso del tiempo se inventaron nuevas formas de promocionar productos y servicios y se empezó a poner nombres a las técnicas que iban surgiendo.

Nos hemos convertido en sociedades de consumo, con convenciones sociales que funcionan como leyes no escritas y que cambian con el tiempo. Ya no se recibe un regalo sólo por los Reyes o en el cumpleaños. Quien se desplaza a un lugar para hacer turismo, no se conforma sólo con la visita, quiere servicios complementarios, donde los regalos tienen cada vez mayor peso.

El turismo subterráneo no es diferente a los otros sectores del turismo, quien busca una cueva o mina para visitarla, si está satisfecho con la visita y con el tiempo que ha dedicado a ella, querrá mantener en la memoria esa visita y la mejor opción es a través de un recuerdo.

Referencias

- Alderson, W. (1957) *Marketing Behavior and Executive Action*. Homewood, Ill.: Richard D. Irwin, Inc.
- Banting, P.M.; Ross, R.E. (1973). "The marketing mix: A Canadian perspective". *Journal of the Academy of Marketing Science*. doi:10.1007/BF02729310. S2CID 189884279
- Butler, R. (1980). *The Concept of a Tourist Area Cycle of Evolution: Implications for Management of Resources*.
- Durán, J.J., Laforet, S.R., García, R., Ardila, P.R., (sin fecha) *Manual de instrucciones - Como visitar una cueva turística*, www.cuevasturisticas.es. Disponible en: <https://www.cuevasturisticas.es/documentos-ap/noticias/instruccionesvisitarcuevasturisticasdefcomprimido.pdf> (Accessed: 19 September 2024).
- Hester, Brittany (2019). "Marketing Strategy: Forget the 4 P'S! What are the 4 C'S?". CATMEDIA Internal Communication.
- Howard, J.A. (1963), *Marketing Management*, Homewood, Ill.
- Kotler, P., Wong, V., Saunders, J., Armstrong, G. (2005). *Principles of Marketing – Fourth European Edition*.
- Lazer, W. and Kelley, E.J. (1962) *Managerial Marketing Perspectives and viewpoints William Lazer ; Eugene J. Kelley*. Homewood, Ill: Irwin.
- Levitt, Theodore (1981). El ciclo de vida del producto: gran oportunidad de marketing. *Harvard-Deusto Business Review* (2º trimestre).
- McCarthy, E.J., (1960). "Basic Marketing: A Managerial Approach Irwin", Homewood.
- Lauterborn, B (1990). "New Marketing Litany: Four Ps Passé: C-Words Take Over". *Advertising Age*.
- Ringold, D. J., & Weitz, B. (2007). *The American Marketing Association Definition of Marketing: Moving*

from Lagging to Leading Indicator. *Journal of Public Policy & Marketing*, 26(2), 251-260. <https://doi.org/10.1509/jppm.26.2.251>

Wehrich, H. (April 1982). "The TOWS matrix—a tool for situational analysis". *Long Range Planning*. 15 (2): 54–66. doi:10.1016/0024-6301(82)90120-0. S2CID 154914972

Geomuseo de Aracena. Socialización del patrimonio geológico

Fernández Amo, F.J.⁽¹⁾, Guerra González, M.⁽²⁾, Torres Asensio, A.B.⁽²⁾,
Barroso Rodríguez, P.⁽¹⁾, Romero Bomba, E.⁽²⁾, Piñera García, S.⁽²⁾,
Moya Díaz, R.⁽²⁾

⁽¹⁾ Técnicas Mineras de Santa Marta, S.L. C/ Estatuto de Autonomía s/n, 06150, Santa Marta, Badajoz.
francis@tecmineras.com

⁽²⁾ Ayuntamiento de Aracena. Plaza Marquesa de Aracena, s/n. 21200. Aracena (Huelva).
turismo@ayto-aracena.es

Resumen

Aracena cuenta con un interesante recurso patrimonial: el Gabinete Geominero. Se trata de una completa y extensa colección de minerales, rocas y fósiles que llegó a la localidad serrana en el año 1983, cedida por el geólogo Francisco Orden Palomino. Las piezas de esta colección constituyen una muestra representativa de la variedad de elementos que componen la naturaleza inerte del planeta. El Ayuntamiento de Aracena (Huelva) ha materializado una propuesta para la socialización de este patrimonio geológico mediante una musealización en el entorno del paisaje exokarstico del Cerro del Castillo, en cuyo interior se desarrolla la Gruta de las Maravillas. El Geomuseo tiene como objetivos: divulgar y difundir el patrimonio geológico así como ser un espacio que genere sinergias con el medio donde se enclava la cavidad. Esta comunicación expone los planteamientos, actuaciones y contenidos del geomuseo como medida para dar a conocer elementos del patrimonio geológico y diversificar la oferta turística en el entorno de una cavidad.

Palabras clave: geomuseo, Gruta de las Maravilla, patrimonio geológico.

Abstract

Aracena has an interesting heritage resource: the Geomineral Cabinet. It is a comprehensive and extensive collection of minerals, rocks, and fossils that arrived in the mountain town in 1983, donated by the geologist Francisco Orden Palomino. The pieces in this collection represent a sample of the variety of elements that make up the inanimate nature of the planet. The City Council of Aracena (Huelva) has implemented a proposal to make this geological heritage accessible through a museum display in the exokarstic landscape surrounding the Castle Hill, within which lies the Grotto of Marvels. The Geomuseum aims to disseminate and promote geological heritage, as well as serve as a space to generate synergies with the environment in which the cave is located. This presentation outlines the concepts, actions, and content of the Geomuseum as a measure to raise awareness of geological heritage elements and diversify the tourist offerings in the vicinity of the cave.

Keywords: geomuseum, Grotto of Marvels, geological heritage.

El proyecto de musealización del Gabinete Geominero continua en la línea marcada por el Ayuntamiento de la localidad, de consolidar el destino Aracena mediante la diversificación de la oferta. Esta propuesta no es un proyecto aislado y carente de sentido, sino que se engloba en una planificación dirigida a un desarrollo turístico sostenible.

Objetivos

Se ha tratado de diseñar una exposición museística abierta y diferente a los espacios expositivos fijos, en el que el visitante se divierta a la misma vez que aprenda y valore el patrimonio paleontológico,

geológico y mineralógico y se sorprenda con la colección de minerales luminiscentes que alberga el museo.

Con todo, el objetivo final que se persigue es enseñar al visitante la importancia y singularidad de la geología (más allá de la impresionante Gruta de las Maravillas) en un espacio diferente en el que se valore la colección geológica actual y se impacte a los visitantes con la nueva colección, con el objetivo de crear una demanda turística ampliada al sector del geoturismo, turismo natural y subterráneo existente actualmente en Aracena.

El mensaje del Geomuseo de Aracena, es contar a través de las piedras (minerales, rocas y fósiles) las singularidades que esconde nuestro planeta. Para ello se utiliza un discurso expositivo contemporáneo en el que el visitante aprenda a apreciar los diferentes recursos como los elementos patrimoniales singulares que son, y que estos recursos son atractivos y diferentes, de modo que la visita no pierda interés, con rigor científico, pero huyendo de un mensaje y exposición excesivamente técnico que aburra al visitante.

Localización

El Geomuseo de Aracena se ubicará en el antiguo depósito de aguas de la localidad que se localiza en la ladera norte del cerro donde se ubica el Castillo de Aracena (figura 1). Se trata de un edificio de principios de siglo XX, de unos 200 m² de superficie. El edificio se dispone en dos espacios o salas diferenciadas con similares medidas (≈ 95 m²), en una sala se expondrá la exposición geológica y en la segunda la Sala Negra (figura 2).

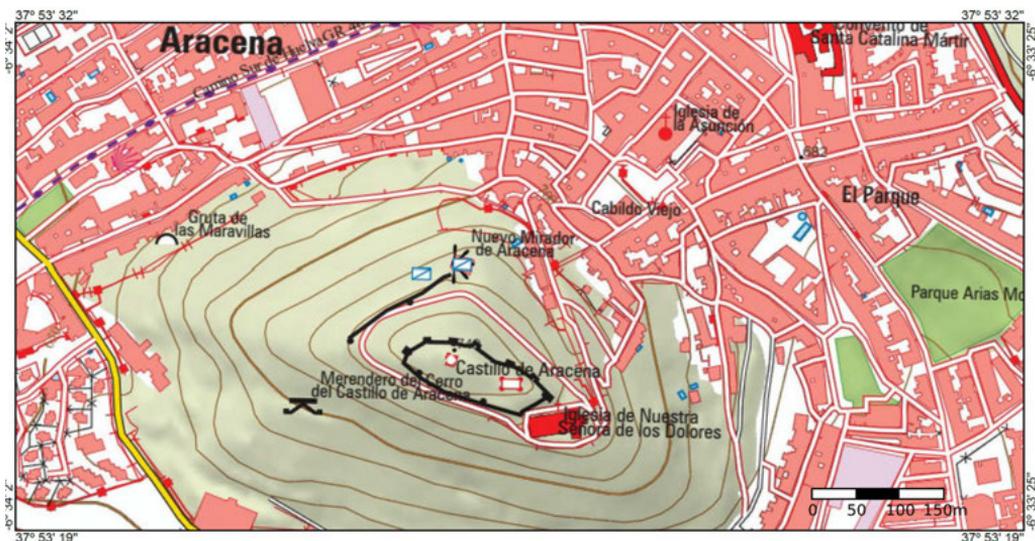


Figura 1. Mapa de localización del Geomuseo de Aracena

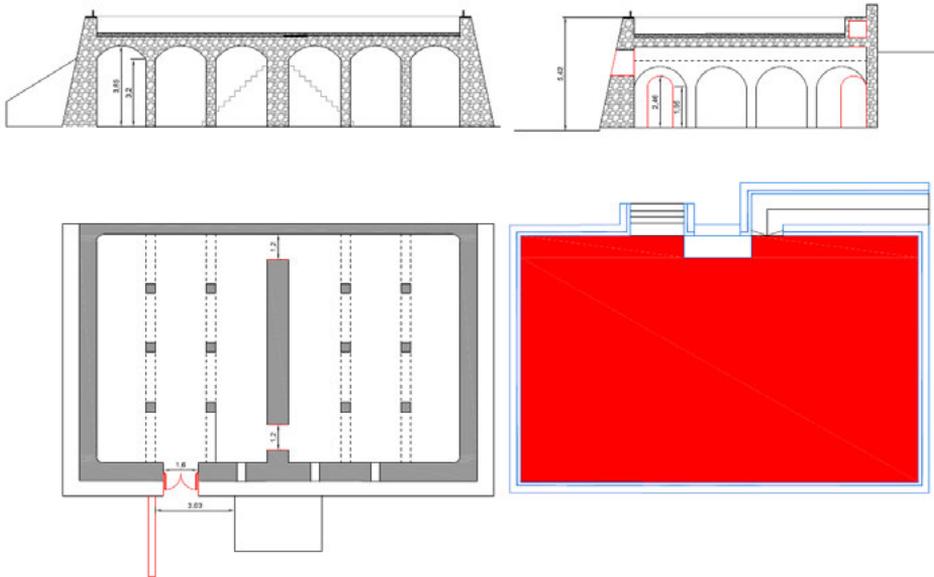


Figura 2. Plano del acondicionamiento del antiguo depósito de aguas para albergar el Geomuseo de Aracena

Distribución del Geomuseo de Aracena

El Geomuseo de Aracena está distribuido en tres áreas, la primera de ellas es la sección de mineralogía.

La mayoría de las muestras expuestas proviene de la antigua colección de Francisco Orden Palomino, colección que ha sido complementada con la donación de Francisco Javier Fernández Amo.

En esta sección los visitantes se acercan al mundo mineral, a la importancia que ha tenido para la sociedad, y podrán experimentar a través de diversos soportes, la evolución de la humanidad asociada a los distintos minerales: desde el sílex al litio. Podrán contemplar los minerales de mayor valor patrimonial. Así mismo este espacio sirve también para mostrar el rico patrimonio mineralógico de la provincia y la región.

Otro aspecto importante a destacar dentro de esta sección, son los usos de los minerales, en una vitrina central se exponen muestras minerales y objetos (figura 3), y los visitantes se quedan sorprendidos al observar que los minerales son básicos para la humanidad en la actualidad, mostrando los minerales en la vida cotidiana, en el colegio, en la medicina, en las nuevas tecnologías o en el arte.

La sección de mineralogía está expuesta en 10 vitrinas, además de la de los usos. En otras vitrinas se exponen las distintas clases minerales, y en la primera se expone aspectos didácticos de la mineralogía y algunas particularidades que llaman la atención del visitante, como son los minerales con hábitos que simulan paisajes, plantas o animales. También hay una colección

de minerales falsos que por sus llamativos colores y formas pueden confundir al que no los conozca (figura 4).



Figura 3. Vitrina de usos de los minerales del Geomuseo de Aracena

Se destacan las principales piezas dentro de cada vitrina, singularizándolas y valorando las de mayor valor patrimonial. Este último hecho es muy importante, ya que suele pasar que las muestras de mayor valor patrimonial no sean las más vistosas y viceversa. Es por ello que se destacarán mediante un soporte destacado una serie de muestras de elevado valor mineralógico describiendo el porqué, de manera que el visitante se fije en ellas y no sólo en las que tienen colores o brillos llamativos.



Figura 4. Sección de curiosidades minerales y minerales falsos del Geomuseo de Aracena

Dentro de la colección de D. Francisco Orden hay una gran cantidad de minerales de Andalucía, que es una región minera. Lo que se quiere destacar es su riqueza mineral. Es una región donde se han descubierto minerales a nivel mundial, donde se encuentran algunas minas históricas como Riotinto. Dentro de esta sección se expondrán y contextualizarán geológicamente muestras minerales de Aracena y su comarca.

La sección de mineralogía se complementa con paneles que interpretan la evolución de la humanidad asociada a los distintos minerales y otros conceptos mineralógicos de interés.

Para comprender el mundo mineral, hay que saber qué es un mineral, o cuáles son sus principales propiedades. Como este tipo de descripciones suele tener siempre una índole muy técnica, en otros museos este tipo de exposición suele pasar desapercibido. Pero, en nuestro caso, se pretende hacer una descripción diferente y atractiva del mundo mineral y de sus principales propiedades.

Para ello se destacarán las propiedades más llamativas (magnetismo, propiedades ópticas y propiedades físicas), que, mediante la experimentación y juegos, los visitantes podrán experimentar y también aprender sus curiosidades.

Para ello la visita a esta sección concluye en un entorno de experimentación, en el que se pueden observar mediante diversas experiencias, distintas propiedades minerales como el magnetismo, las capacidades de absorción de la arcilla, propiedades ópticas como la labradorescencia, asterismo, pleocroísmo, tenebrescencia o *cat-eye*, además de otros pequeños experimentos que llaman la atención y sorprenden a los visitantes.

A continuación, la visita continua por la sección paleontológica, en el que se expone la colección de fósiles de Francisco Orden Palomino. A esta colección se suma otras muestras de fósiles o réplicas para complementarla donadas por Francisco Javier Fernández Amo.

Los contenidos de esta sección tratarán de integrar los distintos fósiles con la historia geológica de la Tierra (figura 5), en un panel de la escala el tiempo, con ilustraciones y muestras fósiles reales existentes en las vitrinas. La presencia de organismos animales y vegetales extintos contextualizados cronológicamente mediante diversos soportes, trasladarán en un viaje en el tiempo a los visitantes.

Los contenidos de esta sección tratan de integrar los distintos fósiles con la historia geológica de la Tierra. La presencia de organismos animales y vegetales extintos contextualizados cronológicamente mediante diversos soportes, trasladarán en un viaje en el tiempo a los visitantes. Los fósiles se expondrán en dos vitrinas y se complementará esta sección con panelería y otros soportes que ayuden a comprender la historia geológica de manera entretenida, interactiva y didáctica.

Se complementará esta sección con una experiencia inmersiva. Mediante gafas VR, se expondrán videos de la vida en la Tierra en el Cámbrico (la época de la formación de las calizas donde se desarrolló la Gruta de las Marañas de Aracena). Los visitantes podrán experimentar de manera inmersiva cómo era la vida en Aracena hace 560 millones de años, cuando había un mar. Se complementará con otros vídeos VR del Mesozoico, cuando los dinosaurios dominaban la Tierra, y del Mioceno.



Figura 5. Vitrina paleontológica del Geomuseo de Aracena

Junto a la sección de paleontología hay una sección petrológica. Con el material lítico y con la panelería adjunta se trata de trasladar al visitante la importancia de las diferentes rocas y formaciones geológicas explicando cómo se formaron. Se describen los distintos ambientes (magmático, metamórfico y sedimentario) en los que se forman las rocas y estructuras geológicas. Serán el vehículo para que los visitantes aprendan la importancia de las fallas, pliegues, volcanes, terremotos, procesos erosivos, sedimentarios, etc.; y la influencia de los mismos para la formación de los diferentes relieves terrestres, entre ellos el de la Sierra de Aracena.

Junto a esta sección hay un espacio para una exposición de meteoritos, en el que se exponen varios ejemplares que llaman la atención del visitante (figura 6).



Figura 6. Exposición de meteoritos del Geomuseo de Aracena

La visita continua pasa a la otra sala del edificio. En esta segunda sala se encuentra el museo de minerales luminiscentes (figura 7), conocida como Sala Negra de Aracena. Los fondos del Geomuseo cuentan con unos 1.300 minerales luminiscentes, una de las mayores exposiciones de Europa de minerales de este tipo. Solo un selecto grupo de minerales y gemas poseen la propiedad lumínica de fluorescencia , entre ellos se destacan algunos ejemplares por su brillo excepcional.



Figura 7. Sala Negra del Geomuseo de Aracena

Además de las vitrinas y panelería, a través de otros equipos y soportes, los visitantes pueden experimentar con la luminiscencia.

Por último, se sale de la Sala Negra nuevamente a la primera sala a través de una pequeña recepción y una tienda de venta de productos relacionado con la temática del centro.

Se ha realizado la adecuación de una infraestructura en desuso como un espacio público tanto interiormente como exteriormente para desarrollar múltiples funciones y así se pueda rentabilizar socialmente. Entre estas funciones se encuentran: mirador, planisferio, área recreativa, avistamiento de aves, auditorio al aire libre y punto de interpretación del paisaje. Estas funciones se conciben en el exterior del inmueble, mientras que el interior se está acondicionando por el Ayuntamiento para albergar el Geomuseo de Aracena. Su ubicación y sus características constructivas, le han dado uso para constituirse en un área de interpretación del paisaje. El gran dominio visual del entorno que presenta el Cerro del castillo lo convierte en un observatorio perfecto para contemplar el paisaje. Esta función de mirador se ha completado con una opción didáctica y divulgadora que permita al visitante de Aracena interpretar los principales hitos paisajísticos, entre ellos, los valores exokársticos de la Gruta de las Maravillas. El objetivo específico de la actuación es impulsar la imagen general del Cerro del castillo y ligarlo a los recursos turísticos de Aracena.

Metodología para el establecimiento de rangos óptimos de visitas turísticas en cavidades con arte rupestre: caso de El Castillo, Las Monedas y Covalanas (Cantabria)

Fernández-Cortés, Á.¹, Palacio-Pérez, E.², Martín-Pozas, T.¹, Cuezva, S.³, Ontañón, R.^{2,4}, Lario, J.⁵, Sánchez-Moral, S.³

¹ Departamento de Biología y Geología, Universidad de Almería, 04120 Almería.
acortes@ual.es; tmp785@ual.es

² Cuevas Prehistóricas de Cantabria. Cuevas de Monte Castillo, 39670 Puente Viesgo, Cantabria.
palacio_e@cantabria.es

³ Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN-CSIC), 28006 Madrid.
ssmilk@mncn.csic.es; scuezva@csic.es

⁴ Museo de Prehistoria y Arqueología de Cantabria, 39009 Santander.
ontanon_r@cantabria.es

⁵ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), 28232 Las Rozas, Madrid.
javier.lario@ccia.uned.es

Resumen

La región cantábrica alberga un gran número de cuevas con arte parietal, algunas de ellas incluidas en la lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO, como las de El Castillo, Las Monedas y Covalanas. Estas tres cavidades están actualmente abiertas al turismo y cuentan con un excepcional patrimonio arqueológico que incluye magníficos ejemplos de arte rupestre paleolítico. A través de un proyecto de investigación plurianual (2020-2022), auspiciado por el Gobierno de Cantabria, se ha realizado una caracterización precisa de la dinámica ambiental de cada cueva bajo diversos contextos meteorológicos, así como una evaluación de la evolución de los impactos de origen antrópico en el microclima subterráneo, bajo diferentes grados de afluencia de visitantes, a escala interanual. Una vez establecidos los parámetros microclimáticos de control para la conservación de las pinturas, grabados y roca soporte, como son la temperatura y la concentración en CO₂ del aire, se implementó un método gráfico estandarizado basado en la distribución de frecuencias de las variaciones de cada parámetro, agrupadas conforme a los diferentes rangos crecientes de visitas diarias. Con este método es posible evaluar, de forma probabilística y en términos porcentuales, la desestabilización microclimática de la cueva generada por cada grupo de visitantes, tomando como referencia los rangos de variación diaria de cada parámetro de control en condiciones naturales, es decir durante los días o periodos de tiempo en los que cada cavidad permaneció cerrada a las visitas turísticas. Los valores recomendados de capacidad de carga máxima de visitas para cada cavidad, en promedio mensual de afluencia diaria de visitantes, se han establecido en 60, 40 y 15 personas/día para El Castillo, Las Monedas y Covalanas, respectivamente. A partir de estos resultados, los gestores de las cuevas están llevando a cabo, desde mayo de 2024, una adaptación progresiva en la gestión turística de estas cavidades hasta adecuarlas plenamente a los parámetros de sostenibilidad ambiental definidos en este estudio.

Palabras clave: capacidad de carga, CO₂, control ambiental, temperatura.

Abstract

The Cantabrian region is home to a high density of caves with parietal art, some of them included in the UNESCO World Heritage list, such as El Castillo, Las Monedas and Covalanas. These three caves are currently open to tourism and have an exceptional archaeological heritage that includes magnificent examples of Paleolithic cave art. Through a multiyear research project (2020-2022), sponsored by the Government of Cantabria, a precise characterisation of the environmental dynamics of each cave has been carried out under different meteorological contexts, as well as an evaluation of the evolution of anthropogenic impacts on the cave microclimate, under different degrees of influx of visitors, on an interannual scale. Once the microclimatic control parameters for the conservation of the paintings, engravings, and supporting rock, such as temperature and CO₂ concentration in the air, were established, a standardised graphic method was implemented based on the frequency distribution of the variations of each parameter, grouped

according to the different increasing ranges of daily visits. With this method, it is possible to evaluate probabilistically and in percentage terms, the microclimatic destabilisation of the cave generated by each group of visitors, taking as a reference the daily variation ranges of each control parameter under natural conditions, i.e. during the days or periods of time in which each cave remained closed to tourist visits. The recommended values of maximum visitor capacity for each cave, in terms of monthly average of daily visitors, have been set at 60, 40 and 15 people/day for El Castillo, Las Monedas and Covalanas, respectively. Based on these results, the cave managers have been carrying out, since May 2024, a progressive adaptation in the tourist management of these caves until they are fully adapted to the environmental sustainability parameters defined in this study.

Key words: carrying capacity, CO₂ environmental control, temperature.

Introducción

La conservación y protección de cavidades necesita de herramientas de gestión adecuadas y fundamentadas en un conocimiento de la evolución temporal y variación espacial de los parámetros ambientales del medio subterráneo. La monitorización de la temperatura y la concentración de CO₂ en el aire, con una adecuada resolución y extensión temporal, es esencial para realizar una caracterización básica del estado y dinámica ambiental de una cavidad, así como para analizar la desestabilización del ambiente subterráneo ante cambios de origen antrópico de cierta entidad. Ambos parámetros son críticos por su papel clave en los procesos biogeoquímicos implicados tanto en la espeleogénesis de una cavidad como en los mecanismos de deterioro de los elementos que ésta pueda albergar.

La principal herramienta de gestión del karst es la definición y delimitación de áreas de protección y, en el caso de cavidades turísticas, el establecimiento de un régimen de visitas ambientalmente sostenible. Hay numerosos ejemplos de cavidades turísticas bajo un control ambiental en continuo, pero, en muchos casos, el análisis de la desestabilización microclimática generada por las visitas continuadas en el tiempo suele abordarse una vez que la cavidad ha sido abierta al turismo o tras un amplio historial de visitas, lo que impide conocer sus características ambientales en régimen natural. En estos casos, la monitorización en detalle de parámetros microclimáticos básicos y bajo diferentes tasas de afluencia de visitantes y cierres puntuales al público, es esencial para obtener la base de datos de partida para definir herramientas numéricas de gestión sostenible de la cavidad (de Freitas, 2010). Estas herramientas están enfocadas a definir la capacidad de carga de cada cavidad turística, entendida ésta como el flujo máximo de visitantes en una cavidad que producirá cambios de un parámetro microclimático de control dentro de un rango de fluctuación natural (Hoyos et al., 1998; Calaforra et al., 2003; Lobo, 2015). En este estudio se presenta una caracterización de la dinámica ambiental de tres cuevas con arte parietal de Cantabria abiertas al público; El Castillo, Las Monedas y Covalanas, incluidas en la lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO. A partir de los registros obtenidos durante tres ciclos anuales, se ha estudiado la evolución de la temperatura y de la composición gaseosa del aire subterráneo de cada cavidad en relación a los cambios estacionales en la meteorología local, así como la evolución a escala interanual de los impactos de origen antrópico en el microclima subterráneo bajo diferentes regímenes de visitas diarias. El análisis conjunto de estos datos ha permitido definir los rangos óptimos de visitas diarias paracada cavidad con el objetivo de evitar que se generen cambios en los parámetros ambientales de control (temperatura y concentración en CO₂ del aire) de una magnitud menor a sus variaciones naturales a escala diaria y/o estacional y no provoquen efectos acumulativos en dichos parámetros.

Cavidades estudiadas: régimen de visitas turísticas

Hasta siete cuevas cántabras de la lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO están abiertas al público, incluidas las de El Castillo, Las Monedas y Covalanas, siendo uno de los principales puntos de conflicto cómo mantener las visitas públicas a esas cavidades sin poner en peligro la conservación de las pinturas (Ontañón Peredo et al. 2014). La demanda turística de las cuevas ha aumentado en las dos últimas décadas. En 2003, 64.570 personas visitaron los conjuntos de arte rupestre de la región y, tras su consideración como Patrimonio de la Humanidad, la cifra aumentó a 117.731 en 2019 (Palacio-Pérez, 2024). La mayoría de los visitantes acuden en temporada alta y media de turismo (de mayo a septiembre).

El calendario y horario de apertura al público a las tres cavidades estudiadas fueron inicialmente preestablecidos por el Gobierno de Cantabria (<https://cuevas.culturadecantabria.com/>), fijando como día de cierre a las visitas turísticas todos los lunes de cada semana y los días festivos. Los cupos máximos en cada grupo de visitantes que es acompañado por un guía también se establecieron en 14 personas/grupo (El Castillo y Las Monedas) y de 8 personas/grupo (Covalanas). En las tres cavidades cada visita guiada tiene una duración de aproximadamente 45 minutos. Desde la reapertura de las cavidades al turismo el 26/05/2020, tras el cierre forzoso al público el 14/03/2020 como consecuencia de la pandemia del COVID19, estos cupos de visitantes por grupo han ido cambiando de acuerdo a la situación sanitaria.

Desde el año 2020, marcado por las limitaciones y cierres temporales al público, hasta 2022, se ha producido un notable incremento en la afluencia de visitantes a las tres cavidades. En la Cueva de El Castillo se registró en 2021 un aumento del 72 % en las visitas (23.274 personas) respecto a 2020 (13.558 personas, de febrero a diciembre), mientras en 2022 (41.415 personas/año) se triplicó la afluencia de visitantes respecto a 2020. En la Cueva de las Monedas, el aumento de las visitas en 2021 fue del 67% (16.811 personas) respecto a 2020 (10.090 personas), mientras que en 2022 la afluencia total de visitantes (26.361 personas/año) fue 2,6 veces superior a la registrada en 2020. En la Cueva de Covalanas las visitas se duplicaron en 2021 (5.196 personas) respecto a 2020 (2.528 personas, de febrero a diciembre), mientras en 2022 (7.798 personas/año) se triplicó la afluencia de visitantes respecto a 2020.

A escala diaria, también se registró un aumento en la media y máxima afluencia diaria a las tres cavidades en todos los meses del año respecto al mismo periodo (mes) del año anterior, con excepción del primer trimestre de 2021 (temporada baja) en el que aún continuaban las restricciones en la actividad turística por la situación sanitaria. En El Castillo, el promedio anual de las visitas medias diarias pasó de 55 personas/día en 2020, a 72 personas/día en 2021 y a 127 personas/día en 2022. En Las Monedas, el promedio anual de las visitas medias diarias pasó de 40 personas/día en 2020, a 53 personas/día en 2021 y a 83 personas/día en 2022. Las tasas diarias de afluencia de visitantes a Covalanas pasó de valores medios mensuales de 12 personas/día en 2020, a 19 personas/día en 2021 y a 27 personas/día en 2022.

Metodología

Sistema de control ambiental

Cada estación de control microclimático (una en cada cavidad) estaba equipada con el siguiente instrumental:

- Datalogger Tinytag TGP 4505 (rangos de medición -25+85 °C y 0- 100%HR) con sonda externa combinada de temperatura y humedad (HR): Termistor 10K NTC (precisión: 0.35 °C, con resolución de 0.01 °C) y sensor Capacitivo (Precisión ±3.0% HR a 25 °C y resolución <0.3% HR). Cadencia de registro de 10 minutos.
- Sonda registradora de Temperatura SeaBird (SEB56) de altas prestaciones; Precisión: ± 0.002 °C (de -5 a +35 °C); rango de temperatura: -5 a +45 °C, resolución: 0.0001 °C. Cadencia de registro de 5 minutos.
- Monitor de CO₂, CO2log de Goodsell Systems, equipado con sensor NDIR con un rango de medición 400ppm - 10000ppm y precisión +/- 30ppm. Registro cada 30 minutos.
- Monitor registrador de gas radón (²²²Rn) AlphaE (Bertin Instruments), equipado con detector de cámara de difusión con diodo de silicio. Rango de medición: 20 Bq/m³ a 10 MBq/m³. Sensibilidad del detector: 3 cph a 100 Bq/m³. Registro cada 1 hora.

La ubicación de las estaciones de control microambiental en el interior de cada cavidad se seleccionó atendiendo a la presencia de los principales paneles de pinturas rupestres, bajo la supervisión técnica de los conservadores y gestores de las cuevas, así como en función del recorrido y temporización de las visitas turísticas guiadas en cada cavidad.

Los datos meteorológicos utilizados en el estudio de la Cueva de El Castillo y de Las Monedas (Monte Castillo, Puente Viesgo, a 187 m s.n.m. aproximadamente) corresponden a la Estación AEMET (ref. 1152), situada en San Felices Buelna, a 105 m.s.n.m y a unos 7 km hacia el Oeste de Monte Castillo. En el caso de la Cueva de Covalanas (Ramales de la Victoria, 307 m s.n.m), se ha utilizado los registros de datos meteorológicos de la Estación AEMET con ref. 1089U, situada en la misma localidad a 80 m.s.n.m y a 1,8 km al noroeste de la Cueva de Covalanas.

Evaluación de los impactos térmicos y en la concentración en CO₂ del aire generados por la afluencia de visitantes

La utilización de una gran cantidad de datos ambientales de diferentes cavidades requiere del uso de técnicas estadísticas con el objetivo de simplificar y revalorizar esta información ambiental. En este estudio, la evaluación de los impactos térmicos y en la concentración en CO₂ del aire generados por la afluencia de visitantes a cada cavidad se ha realizado a escala diaria, utilizando para ello un método gráfico estandarizado basado en la distribución de frecuencias de las variaciones de cada parámetro (temperatura y CO₂), agrupadas para diferentes rangos crecientes de visitas diarias. Para cada rango de visitas diarias se han calculado los siguientes estadísticos de las variaciones generadas en cada parámetro de control (temperatura y concentración de CO₂); mediana y primer y tercer cuartil, así como los valores máximos y mínimos no atípicos (varianza) de cada parámetro. De esta forma, los impactos diarios en el microclima se pueden caracterizar para diferentes rangos crecientes de visitas, quedando sintetizada esta información de forma gráfica mediante diagramas "Box-plot" (o diagrama de cajas). Cada caja del diagrama recoge los estadísticos utilizados; mediana, tercer cuartil y primer cuartil, es decir el 50%, 75% y el 25% de la distribución de valores de cada parámetro, para un determinado rango de visitas diarias a la cavidad (nº de visitantes cada día).

Con este método es posible evaluar, de forma probabilística y en términos porcentuales, la deses-

tabilización microclimática de la cavidad generada por cada grupo de visitantes, tomando como referencia los rangos de variación diaria de cada parámetro de control en condiciones naturales, es decir, durante los días o periodos de tiempo en los que cada cavidad permaneció cerrada a las visitas turísticas. Para ello hay que tener en cuenta que las tres cavidades han permanecido cerradas todos los lunes durante el periodo de tres años de monitorización, a lo que hay que añadir el cierre obligado entre el 14 de marzo y el 26 de mayo de 2020, como consecuencia del paro de la actividad turística debido a la crisis sanitaria de la COVID-19.

Resultados y Discusión

Evolución temporal de la temperatura del aire subterráneo

La temperatura del aire en una cavidad es un parámetro fiable de fácil medición y calibración, que responde claramente ante cualquier alteración del medio subterráneo. Los termómetros de precisión, como los utilizados en este estudio, permiten detectar cambios térmicos de pequeña magnitud ($\pm 0,001$ °C), lo cual es muy importante en un ambiente subterráneo donde la estabilidad espaciotemporal de este parámetro es muy elevada. Además, desde una perspectiva temporal, las curvas de recuperación de la temperatura presentan una histéresis mínima y, por lo tanto, suelen ser más representativas y precisas de la recuperación ambiental que las que aportan cualquier otra variable microclimática.

La Figura 1 muestra la evolución de la temperatura del aire media y mínima diaria de cada cavidad durante todo el período de registro junto a la evolución de la temperatura en el exterior. Las tres cavidades muestran una pauta de variación de la temperatura interna muy similar regida por las condiciones climáticas externas y factores antrópicos como la entrada de visitas y los equipos fijos de iluminación presentes en el recorrido turístico. La influencia del clima local queda patente en la forma sinusoidal de la curva de evolución anual de la temperatura del aire (Figura 1), aunque con un cierto desfase temporal de la respuesta interna a las variaciones térmicas externas. Un análisis más detallado de los datos indica que dicho desfase es de 13-14 meses debido a la fuerte inercia térmica de los macizos rocosos en los que se desarrollan los sistemas kársticos. En las tres cavidades las temperaturas máximas se registran en el tercer trimestre (agosto-septiembre), mientras que las mínimas ocurren entre el primer y segundo trimestre, fuertemente influenciadas por la cantidad de visitantes durante dichos períodos en cada uno de los años analizados. Esta marcada influencia del flujo de visitas se superpone al patrón natural, como se demuestra al estudiar los datos recopilados durante el cierre al público de las cavidades debido a la pandemia del COVID-19, desde el 14 de marzo al 26 de mayo de 2020. Durante esos dos meses sin entradas de visitantes, las temperaturas mínimas y medias prácticamente se igualaron en las tres cuevas, descendiendo de forma progresiva. Esa bajada se truncó con la reapertura, siendo muy notable en la Cueva del Castillo donde la tendencia parece indicar que el régimen de visitas ejerce un impacto que mantiene el aire subterráneo sobrecalentado.

Composición gaseosa del aire subterráneo

El seguimiento de la composición del aire subterráneo en gases como el dióxido de carbono

(CO₂) o el radón (²²²Rn) es clave para caracterizar el proceso de renovación o mezcla de aire con la atmósfera externa y, por lo tanto, la monitorización de estos gases trazadores nos permite

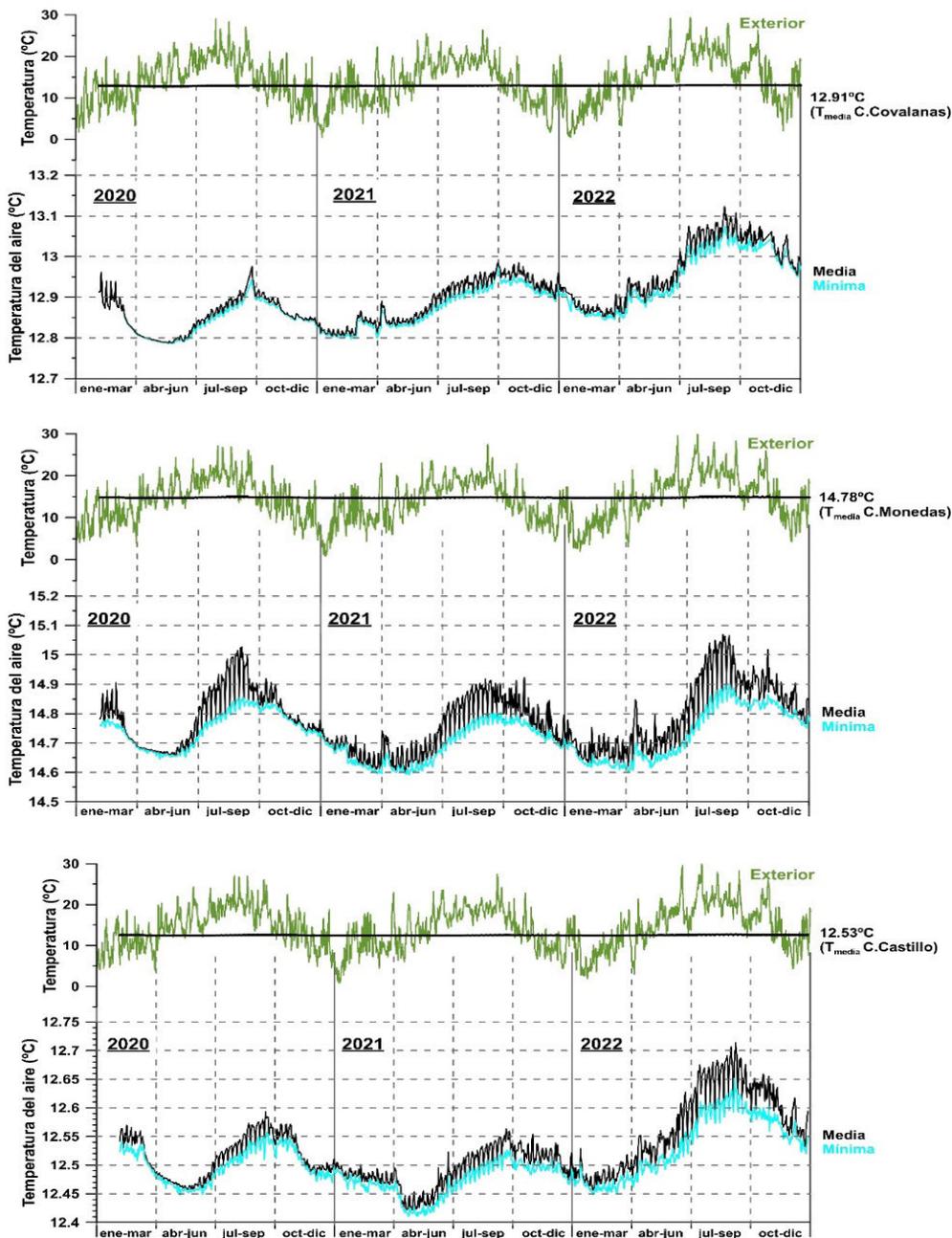


Figura 1. Evolución temporal de la temperatura del aire en el exterior e interior (valores medios y mínimos) de las tres cuevas monitorizadas durante el trienio 2020-2022

evaluar en el tiempo el grado de aislamiento y estabilidad ambiental de una cavidad. El control de la concentración en CO_2 es además esencial en el estudio de los procesos espeleogenéticos y su seguimiento en detalle permite evaluar el grado de desestabilización ambiental generada por las visitas que, junto con las perturbaciones térmicas, pueden activar los procesos de deterioro de la roca soporte de las pinturas rupestres. En concreto, el CO_2 emitido en la respiración de los visitantes puede disolverse en el agua de infiltración o de condensación que está en contacto con la roca soporte, desencadenando procesos de corrosión.

A modo de ejemplo, se muestra la evolución temporal de la composición del aire de la Cueva de El Castillo en referencia a estos dos gases trazadores (Figura 2). El análisis conjunto de la evolución temporal de los gases trazadores, permite caracterizar los procesos de ventilación en las cavidades encuadradas dentro del mismo relieve kárstico de Monte Castillo (El Castillo y Las Monedas). La tendencia evolutiva opuesta entre ambos gases en el periodo en el que la temperatura exterior es superior a la de la cavidad (abril-septiembre) resulta reveladora del claro efecto antrópico estacional sobre los niveles de CO_2 , que llega a enmascarar el proceso de ventilación estival en este gas. En cambio, los niveles de radón sí siguen una tendencia decreciente durante el periodo estival, que indican una activa renovación del aire subterráneo. Así, desde mediados de junio y durante todos los meses estivales, la temperatura del aire en el exterior se sitúa netamente por encima de la temperatura interna. Bajo esta situación térmica, se activa un proceso de ventilación convectiva, evacuándose el aire a menor temperatura de su interior y renovándose con aire más cálido externo. Este intercambio aerodinámico debe producirse preferentemente a través de discontinuidades en la roca y zonas karstificadas situadas a cotas inferiores respecto a la cavidad y dentro del macizo kárstico de Monte Castillo. Los pulsos de ventilación de ambas cavidades, detectados por la rápida dilución del aire subterráneo en CO_2 y radón, coinciden con aumentos significativos de la temperatura exterior durante la sucesión recurrente de periodos de temperatura anómalamente elevadas en verano (por ejemplo, en 2022).

Los mínimos relativos de CO_2 en el periodo invernal en el Cueva de El Castillo, podrían ser indicativos, a priori, de un proceso de ventilación de la cavidad a favor de un gradiente de densidad del aire, que implicaría la entrada de aire externo, más frío y denso, y el desalojo del aire subterráneo, a mayor temperatura y menos denso que la atmósfera exterior. Sin embargo, esta disminución en los niveles de CO_2 corresponde, en realidad, con un periodo de recuperación en los niveles del gas coincidiendo con la menor tasa de afluencia de visitantes en invierno.

Evaluación de la desestabilización microclimática generada por las visitas diarias

El criterio prioritario a la hora de establecer umbrales máximos recomendables de desestabilización microclimática es que no se generen efectos acumulativos en los incrementos diarios de los parámetros clave (temperatura y CO_2) como consecuencia de la entrada continuada de visitantes, o bien que, a pesar de producirse estos efectos acumulativos de corto o medio periodo, persista un patrón de variación estacional, es decir, que los mínimos y máximos relativos anuales de cada parámetro de control no muestren una tendencia creciente interanual.

Para evitar una desestabilización microclimática de larga duración, es importante que los impactos térmicos y los incrementos en la concentración de CO_2 del aire de la cavidad no

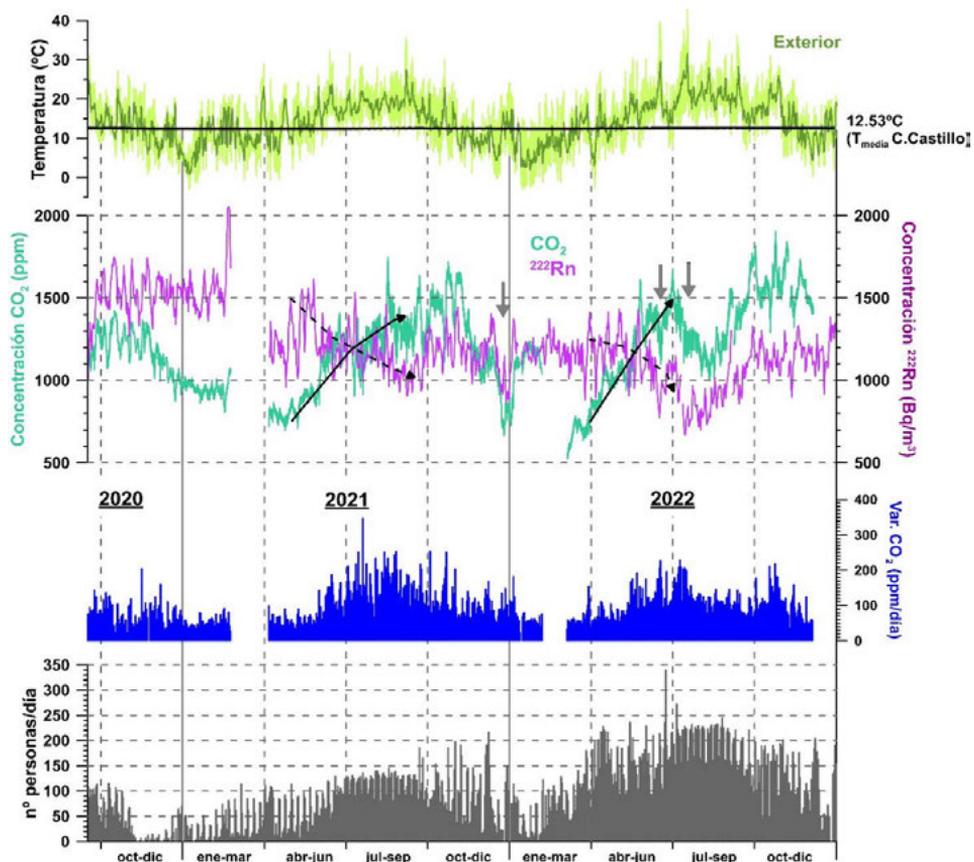


Figura 2. Evolución temporal de la concentración de gases trazadores (CO_2 y ^{222}Rn) en la Cueva de El Castillo durante el trienio 2020-2022. Las flechas negras, continuas y discontinuas, remarcan la tendencia opuesta en la concentración de ambos gases, indicativa de un proceso de ventilación (bajada de niveles de ^{222}Rn), enmascarado, en el caso del CO_2 , por el efecto acumulativo de los impactos generado por la ratio creciente de visitas diarias. Las flechas grises verticales indican los pulsos de ventilación por entrada de aire externo más cálido por cotas inferiores

superen, a escala diaria, un determinado porcentaje respecto a los registrados en condiciones naturales sin visitas. A través de un análisis pormenorizado de las series temporales de ambos parámetros de control, se han determinado qué desviaciones diarias provocadas por las visitas pueden generar efectos acumulativos que perduran a medio plazo, así como el porcentaje que representan estas variaciones respecto al rango de variación en régimen natural de cada cavidad, utilizando como referencia los mencionados estadísticos de la distribución de las variaciones de cada parámetro de control (temperatura y CO_2). Con este enfoque metodológico, los criterios adoptados para establecer los umbrales de desestabilización microclimática para incrementos graduales en el rango de visitas diarias, son los siguientes:

- Umbral de referencia: que el valor del tercer cuartil ($Q3=75\%$) del conjunto de datos de variación del parámetro de control, no supere el mismo estadístico calculado para las va-

riaciones en régimen natural (sin visitas) o, al menos, que no supere la variación máxima diaria de dicho parámetro (máximo no atípico) en los periodos en los que la cavidad está cerrada a las visitas turísticas.

- Umbral máximo: que el Rango Intercuartil de las variaciones del parámetro de control, no se sitúe en su totalidad por encima del tercer cuartil (Q3) o de la variación máxima diaria (máximo no atípico) del conjunto de datos de variación del parámetro de control correspondiente a los periodos en los que la cavidad está cerrada a las visitas turísticas. El Rango Intercuartil representa el 50% intermedio de los datos, es decir muestra la distancia entre el primer cuartil y el tercer cuartil (Q3-Q1), representando, por tanto, las variaciones más frecuentes del parámetro de control considerado.

A continuación, se analizan las variaciones de la temperatura del aire en la Cueva de Covalanas (Figuras 3 y 4) a modo de ejemplo de aplicación tanto del método gráfico estandarizado basado en la distribución de frecuencias de las variaciones de cada parámetro microclimático como de los umbrales de desestabilización ambiental mencionados con anterioridad. Esta cavidad presenta una elevada estabilidad térmica a escala diaria mientras permanece cerrada a las visitas turísticas, con una variación máxima de tan solo 0,05 °C/día (máximo no atípico), de modo que la afluencia de pequeños grupos de más de 10 personas/día ya genera impactos térmicos por encima de este umbral en condiciones naturales (Figura 3). Los impactos térmicos aumentan progresivamente para rangos crecientes de visitas diarias, con variaciones diarias de la temperatura que llegan a alcanzar 0,20 °C con una afluencia de 40 personas/día, considerando el tercer cuartil como estadístico de referencia.

Durante el periodo de 72 días de cierre continuado a las visitas (14 de marzo a 25 de mayo de 2020), la temperatura varió tan solo 0,03 °C en torno a 12,80 °C y no presentó ciclos diarios reseñables (Figura 4). Este patrón de referencia de estabilidad térmica en condiciones naturales, continuó en los primeros compases de la reapertura de la cavidad al turismo (junio 2020) y volvió estacionalmente a registrarse durante el bimestre enero-febrero de 2021, con amplitudes diarias que no sobrepasaron 0,10 °C/día como consecuencia de la afluencia de visitantes. La afluencia de público durante estos periodos fue limitada, con una media mensual de 11 persona días y máximos mensuales siempre inferiores a 25 personas/día. En cambio, en el mismo periodo invernal del siguiente año (enero-marzo de 2022) la temperatura del aire, pese a seguir una tendencia decreciente, no alcanza estos niveles de referencia de estabilidad (Figura 4). El efecto acumulado en la temperatura del aire durante la anualidad de 2022 es bastante intenso y demuestra la fragilidad de esta cueva frente a un régimen de visitas de ese calibre.

Los periodos de estabilidad térmica en un régimen limitado de visitas, se vieron interrumpidos en los meses sucesivos con un cambio de tendencia en la temperatura media del aire como consecuencia de la acumulación de impactos térmicos diarios. Este efecto acumulativo en los impactos se desencadena una vez que las ratios medias mensuales en la afluencia de visitantes superan las 15 personas/día. Según el modelo de impactos térmicos generados por diferentes rangos de visitas diarias a la Cueva de Covalanas (Figura 3), la visita media de 15 personas/día implicaría una desestabilización diaria de la temperatura con un rango intercuartil entre 0.05 y 0,11 °C/día (rango que engloba al 50% de los impactos más frecuentes) y máximos impactos en torno a 0,17 °C/día (máximos no atípicos). Estos cambios térmicos suelen ser inferiores a las amplitudes máximas diarias registradas en los periodos de afluencia limitada de visitantes y, por tanto, permitirían alcanzar un patrón térmico similar al registrado en condiciones naturales con variaciones inferiores a 0,10 °C/día y sin cambios de tendencia en la temperatura media.

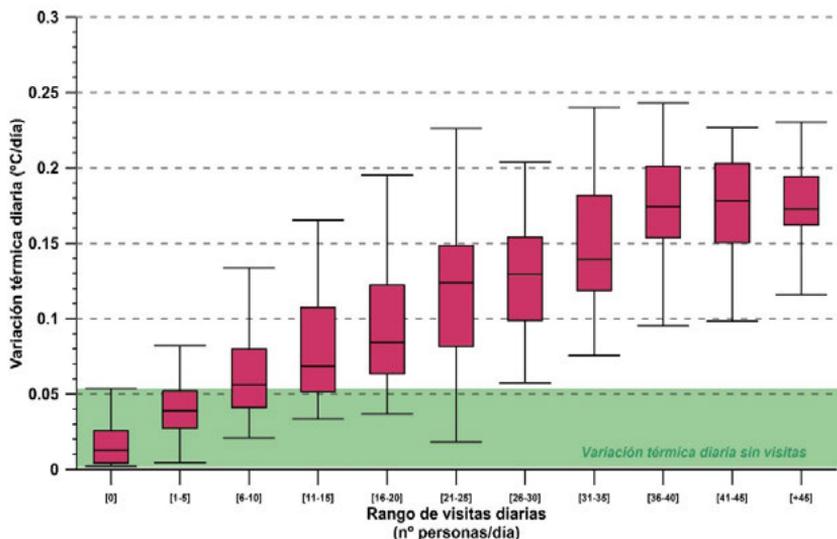


Figura 3. Variaciones de la temperatura del aire de la Cueva de Covalanas generadas por diferentes rangos de visitas diarias

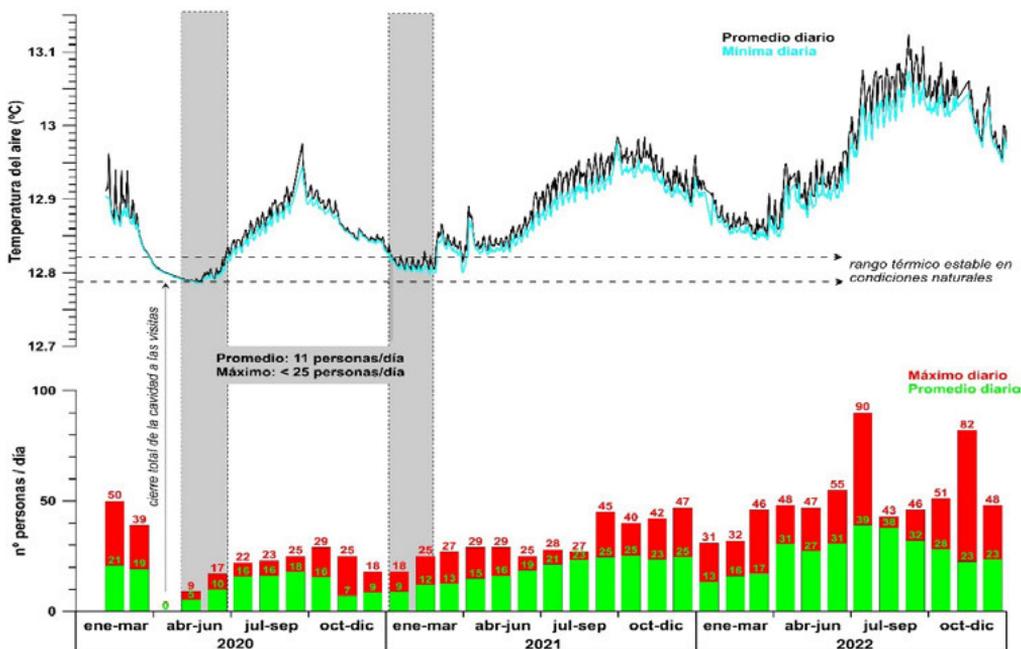


Figura 4. Evolución de la temperatura media y mínima diaria del aire en la Cueva de Covalanas en relación con los datos mensuales de afluencia de visitantes (promedio y máximo diario)

Conclusiones: rangos óptimos de visitas diarias en cada cavidad

La evaluación de la desestabilización microclimática generada por las visitas y la propuesta del régimen diario de visitas para cada cavidad, se han basado en las siguientes herramientas: 1) Modelo de impactos en los parámetros microclimáticos de control (temperatura y concentración en CO₂ del aire) generados por diferentes rangos de visitas diarias; 2) Patrón de referencia de estabilidad térmica en condiciones naturales y evaluación de su repetición estacional bajo un régimen de visitas limitado. Este patrón de referencia se ha definido de forma aproximada, aprovechando el periodo de recuperación ambiental de las cavidades de 72 días por cierre al público (crisis sanitaria COVID-19). En la Tabla 1 se resumen los valores recomendados de capacidad de carga de visitas para cada cavidad considerando el calendario semanal de apertura al público de martes a domingo. Estos valores se corresponden con un régimen sostenible de visitas diarias a cada cavidad, de forma que no se generen cambios en los parámetros microclimáticos de control de una magnitud superior a sus variaciones naturales a escala diaria y/o estacional, ni tampoco se generen efectos acumulativos.

Cavidad	Promedio mensual
El Castillo	≤ 60 personas/día
Las Monedas	≤ 40 personas/día
Covalanas	≤ 15 personas/día

Tabla 1. Valores recomendados de visitas

Estos promedios mensuales de capacidad de carga de visitas recomendados para cada cavidad, pueden redefinirse en función de la distribución semanal de los días de cierre y apertura al público de cada cavidad. En concreto, se ha evaluado el efecto sobre la temperatura del aire (como parámetro crítico) que supondría la reinstauración del lunes y martes como días de cierre al público de las cavidades (régimen de visitas vigente hasta 2007) sobre la temperatura del aire. Para ello se ha analizado en detalle la desestabilización térmica diaria en cada cavidad mediante el ajuste (método de mínimos cuadrados) de la curva de recuperación térmica de cada cavidad tras el último grupo de visitas del domingo, utilizando los registros de temperatura con una cadencia de 5 minutos. Este ajuste ha permitido simular la evolución de la temperatura en fase de recuperación hasta la siguiente reapertura de la cavidad al público fijada el miércoles por la mañana, es decir considerando un régimen de cierre al público en lunes y martes de cada semana. Como resultado, los valores umbral de visitas diarias que se recomienda no sobrepasar en cada cavidad para evitar el citado efecto térmico acumulativo, considerando la fase de recuperación de la temperatura durante el cierre al público de dos días a la semana (lunes y martes), han sido los siguientes: ≤ 92 personas/día (El Castillo), ≤ 72 personas/día (Las Monedas) y ≤ 24 personas/día (Covalanas). Estos umbrales de capacidad de carga son clave a la hora de regular el régimen de visitas a cada cavidad, ya que las perturbaciones térmicas en ambientes con humedad próxima a la saturación a lo largo de todo el ciclo anual, junto con la dilatación del periodo de recuperación, conllevan más tiempo disponible para el desarrollo de los procesos

de alteración biogeoquímicos como la microcorrosión de la roca soporte de las pinturas y los procesos de biodeterioro ligados a la activación metabólica de los microorganismos presentes en las superficies de la roca, o que potencialmente pueden colonizarlas (Jurado *et al.*, 2022). La posibilidad de incorporar estos resultados del control ambiental en cavidades dentro de un modelo integral de gestión, en el que se contemple además aspectos socioeconómicos, es el principal interés de este tipo de investigación para los gestores de cavidades turísticas. En el caso de las tres cavidades estudiadas, los gestores de las mismas están llevando a cabo, desde mayo de 2024, una adaptación progresiva en la gestión turística de estas cavidades hasta adecuarlas plenamente a los parámetros de sostenibilidad ambiental definidos en este estudio. En cualquier caso, esta propuesta de límites recomendados de visitas diarias a cada cueva tiene un carácter preliminar y requiere de una monitorización ambiental en continuo una vez que se implementen, con el objetivo de evaluar su idoneidad y eficacia a medio y largo plazo.

Referencias

- Hoyos, M., Soler, V., Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S., SanzRubio, E. (1998) Microclimatic characterization of a karstic cave: human impact on microenvironmental parameters of a prehistoric rock art cave (Candamo Cave, northern Spain). *Environmental Geology* 33: 231–242.
- Calaforra, J.M.; Fernandez-Cortes, A.; Sanchez-Martos, F.; Gisbert, J.; Pulido-Bosch, A. (2003). Environmental control for determining human impact and permanent visitors capacity in a potential show cave before tourist use. *Environmental Conservation* 30(2):163-167
- De Freitas, CR. (2010). The role and importance of cave microclimate in the sustainable use and management of show caves. *Acta Carsologica* 39 (3): 477-489.
- Lobo, H.A.S. (2015). Tourist carrying capacity of Santana cave (PETAR-SP, Brazil): A new method based on a critical atmospheric parameter. *Tourism Management Perspectives* 16: 67-75.
- Palacio-Pérez, E. (2024). The UNESCO World Heritage List in a Globalized World: The Case of the Paleolithic Caves of Northern Spain (1985–2008). En: *Deep-Time Images in the Age of Globalization. Rock Art in the 21st Century*. Editors: Oscar Moro Abadía, Margaret W. Conkey, Josephine McDonald (pp.207-217). Springer Cham
- Jurado, V., González-Pimentel, J.L.; Fernández-Cortés, A.; Martín-Pozas, T.; Ontañón-Peredo, R.; Palacio-Pérez, E.; Hermosín, B.; Sánchez-Moral, S.; Sáiz-Jimenez, C. (2022). Early detection of phototrophic biofilms in the polychrome panel, El Castillo cave, Spain. *Applied Biosciences* 1 (1): 40–63.
- Ontañón-Peredo, R.; Bayarri, V.; Herrera, J.; Rodríguez, R. (2014). The conservation of prehistoric caves in Cantabria, Spain. In *The conservation of subterranean cultural heritage*, ed. Cesareo Saiz-Jiménez, 185–192. London: CRC Press/ Taylor & Francis

Conservación de espacios naturales subterráneos patrimoniales: la Cueva de Nerja y la Gruta de las Maravillas

Jiménez de Cisneros Vencelá, C.¹, González-Ramón, A.², López-Chicano, M.³, Jiménez-Espejo F.J.¹, Martín-Rosales, W.³, Liñán Baena, C.^{4,5}, Del Rosal Padial, Y.⁴ y Fernández Rodríguez, L.E.⁴

¹ Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (IACT-CSIC), Avda. de las Palmeras 4, 18100 Armilla (Granada)
concepcion.cisneros@csic.es; francisco.jimenez@csic.es

² Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) Urb. Alcázar del Genil, 4. Edf. Zulema bajo, 18006 Granada
antonio.gonzalez@igme.es

³ Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva, s/n 18071 Granada
mlopezc@ugr.es; wmartin@ugr.es

⁴ Fundación Cueva de Nerja, Instituto de Investigación, Carretera de Maro, s/n, 29787 Nerja (Málaga)
cbaena@cuevadenerja.es; yolanda@cuevadenerja.es; conservador@cuevadenerja.es

⁵ Departamento de Ecología y Geología, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos s/n, 29071 Málaga
crlinbae@uma.es

Resumen

En la Cueva de Nerja (Málaga) y en la Gruta de las Maravillas (Huelva), ambas abiertas al público, se desarrolla un proyecto de investigación cuyo objetivo se centra en la conservación de estos entornos kársticos patrimoniales. El estudio va dirigido a conocer los problemas ocasionados por el cambio climático en el medio subterráneo, proporcionando herramientas e información que puedan ser utilizadas para establecer pautas y controles específicos que eviten o minimicen los cambios de sus parámetros ambientales, a fin de conseguir mantener el equilibrio necesario para que sean entornos sostenibles. Los datos obtenidos durante la monitorización ambiental de las cuevas y el control hidrológico de las aguas de lluvia y goteo permitirán conocer los procesos de alteración que afectan al soporte rocoso y al material espeleotémico que se forma actualmente, así como conocer los procesos más activos en determinadas áreas y que pueden acelerar los procesos de deterioro. A partir de los resultados obtenidos se pretende aportar pautas no solo para la conservación del patrimonio geológico, sino también para la seguridad de los visitantes y trabajadores (como número de visitantes diarios, concentración de visitantes en determinadas salas entre otras).

Palabras clave: aguas de goteo, conservación, cuevas, espeleotemas, monitorización.

Abstract

A research project is being conducted at the Cueva de Nerja (Málaga) and the Gruta de las Maravillas (Huelva), both open to the public, with the primary goal of conserving these significant karstic heritage environments. This study focuses on understanding the challenges posed by climate change in these subterranean environments, aiming to provide tools and information to establish guidelines and specific controls that prevent or minimize alterations in their environmental parameters. Maintaining this balance is essential to ensuring the sustainability of these ecosystems. The data obtained from environmental monitoring of the caves and hydrological analysis of rain and drip water will help identify the processes of alteration affecting the rocky substrate and the currently forming speleothem materials. Additionally, this research aims to identify the most active processes in certain areas that could accelerate deterioration. The results will offer guidelines not only for the conservation of geological heritage but also for ensuring the safety of visitors and staff.

Key words: caves, conservation, drip water, monitoring, speleothems.

Introducción

Las consecuencias del cambio climático vienen siendo visibles en el deshielo de los grandes glaciares y en el aumento de los eventos climáticos extremos. Los registros más comúnmen-

te utilizados para las reconstrucciones de cambios climáticos se obtienen principalmente de sondeos de origen marino y glacial, bien de sedimentos de los fondos oceánicos o bien de los testigos de hielo procedentes de Groenlandia o la Antártida. En zonas continentales, los depósitos formados en cuevas ofrecen una valiosa información climática. Estos entornos son únicos, ya que mantienen una temperatura constante, lo que los convierte en una excelente fuente de información sobre los cambios climáticos (Baker *et al.*, 2007; McDermott, 2004; Fairchild *et al.*, 2006). Los últimos estudios científicos en estas áreas apuntan a que el cambio climático pueda ser el responsable de los cambios en los niveles de oxígeno que se están constatando como consecuencia de los cambios de temperatura. Estas variaciones quedan reflejadas tanto en las aguas que se infiltran y gotean, como en los precipitados que actualmente se están formando a partir de estas aguas (Fairchild *et al.*, 2000; Cruz *et al.*, 2005; Baldini *et al.*, 2008; Baker *et al.*, 2014; Matthey *et al.*, 2008). Por otra parte, en las cuevas y en su entorno existen otros factores que pueden considerarse desencadenantes activos de diferentes alteraciones como son: las visitas turísticas (que aparte de la introducción de esporas y otros elementos contaminantes, producen, entre otras, incrementos de la humedad, la temperatura y concentración de CO₂ en el aire), los cambios físicos y químicos del suelo externo de las cuevas, la presencia de fertilizantes en aguas subterráneas y superficiales y la actividad de microorganismos en el interior (producen colonizaciones sobre distintas estructuras kársticas). Por todo ello, resulta de gran interés establecer pautas y controles específicos que ayuden a evitar o minimizar las modificaciones ambientales de estos entornos con el objetivo de mantener el equilibrio necesario para que sean sostenibles.

La península ibérica posee un extraordinario desarrollo de cavidades kársticas que están distribuidas ampliamente por toda ella (Durán *et al.*, 2004). Entre ellas, las del karst de Mallorca, las del norte peninsular, como la cueva de Kaite o de Ojo Guareña, la cueva Mayor de Atapuerca, ambas en Burgos, la cueva del Cobre en Palencia, la cueva del Soplao en Cantabria, las cuevas del Pindal, la Vallina, Cueva Rosa y Cueva Fría en Asturias, la cueva de Ortigosa, en La Rioja, la cueva de Molinos (Grutas de Cristal de Teruel) en la Cordillera Ibérica y la cueva de Sesó en Pirineos. En el sur peninsular destacan la cueva de San Miguel en Gibraltar, la Gruta de las Maravillas, en Huelva, y las cuevas de La Pileta, Ardales y Nerja, en Málaga. Casi todas constituyen un importante recurso cultural y turístico-económico, y muchas de ellas son, además, elementos de nuestro Patrimonio Geológico e incluso se han creado diversas figuras de protección (Jiménez-Sánchez *et al.*, 2006).

El proyecto que se aborda se encuadra dentro de la línea de investigación de protección de recursos naturales y calidad de vida de las personas y de la sociedad en su conjunto. Las investigaciones están muy centradas en los estudios sobre la dinámica de precipitación actual en estas áreas aportando información sobre la composición geoquímica de las aguas de lluvia y de infiltración, y de los precipitados minerales, con un claro objetivo dirigido a la conservación de estos entornos.

Localización geográfica y geológica

La Gruta de las Maravillas y la Cueva de Nerja son dos cavidades kársticas singulares de Andalucía, catalogadas como Lugares de Interés Geológico. En ambas cuevas se realiza una monitorización

de los principales parámetros ambientales (temperatura, humedad relativa y concentración de CO_2 en el aire, conductividad eléctrica, pH y composición química del agua de infiltración, tasa de precipitación, etc.), para conocer los factores que controlan los mecanismos de precipitación en el medio subterráneo.

La Cueva de Nerja, además de ser Lugar de Interés Geológico de relevancia internacional, está catalogada como de Bien de Interés Cultural con categoría de Zona Arqueológica. Se sitúa en la provincia de Málaga, en el extremo oriental del litoral, junto a la localidad de Maro y en la vertiente meridional de la Sierra Almijara (Cordilleras Béticas), a menos de un kilómetro de la línea de costa actual. Se caracteriza por el gran desarrollo y variedad de formas endokársticas así como por su yacimiento arqueológico. Su formación ha estado controlada por las características litológicas, estratigráficas, tectónicas y eustáticas (Benavente y Almécija, 1993; Guerra et al., 2004; Jordá Pardo, 2004). La cueva se enclava en los mármoles dolomíticos triásicos del Complejo Alpujárride. Son mármoles de color blanco o gris, de grano medio a grueso, muy diaclasados, a veces con textura sacaroidea.

La Gruta de las Maravillas, situada en la localidad de Aracena (Huelva) se ubica en pleno casco urbano. Comprende un conjunto excepcional de galerías y salas que el tiempo y el agua han labrado sobre mármoles de edad Precámbrica, además de bellos y numerosos lagos que sufren variaciones estacionales, cursos subterráneos y espeleotemas freáticos. En el cerro del Castillo, donde se desarrolla la cueva, no aparece ninguna morfología exokárstica relevante. En relación a su génesis, recientemente se ha propuesto un origen hipogénico por ácido sulfúrico procedente de la oxidación de piritita diseminada en los mármoles (Martínez Moreno et al., 2015).

Las cuevas han sido seleccionadas con un objetivo claro de correlación de resultados entre espeleotemas cuya formación se realiza a partir de aguas de goteo con una componente de influencia atlántica "Gruta de las Maravillas", y espeleotemas formados a partir de aguas de goteo con una componente de influencia mediterránea "Cueva de Nerja".

Metodología

La metodología a seguir para alcanzar los objetivos planteados incluye las siguientes actividades: *Seguimiento instrumental de las variables ambientales en las cuevas*. Mediante diferentes equipos se realiza la monitorización hidroquímica y ambiental de las cuevas controlando, entre otros parámetros, la temperatura, humedad relativa y concentración de CO_2 en el aire, la precipitación mineral actual (crecimiento, fábricas y texturas cristalinas, composición mineralógica, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ y δD) y el caudal de goteo (Figuras 1A y 1B). La monitorización se realiza también sobre las aguas de lluvia y aguas de goteo. Los precipitados carbonatados recogidos trimestralmente son analizados mediante microscopía electrónica HRSEM (Jiménez de Cisneros et al., 2021; 2022).

Caracterización fisicoquímica de suelos externos en cuevas. Para una reconstrucción completa del sistema kárstico, se analiza el suelo situado sobre las cuevas ya que puede actuar como un regulador de los cambios que ocurren sobre y dentro de la cavidad, modificando la infiltración y retención de agua y proporcionando materia orgánica, minerales arcillosos y elementos nutritivos, todos ellos esenciales para el crecimiento de microorganismos y precipitados dentro

de la cueva (Jiménez de Cisneros et al., 2020). Se han tomado muestras entre 1-3 kg de suelo (Figura 2), que posteriormente se han secado y tamizado por malla de 2 mm. Sobre ellas se han realizado las diferentes medidas y análisis (pH, conductividad, carbono orgánico, relación C/N, textura, mineralogía y contenido de elementos mayores).

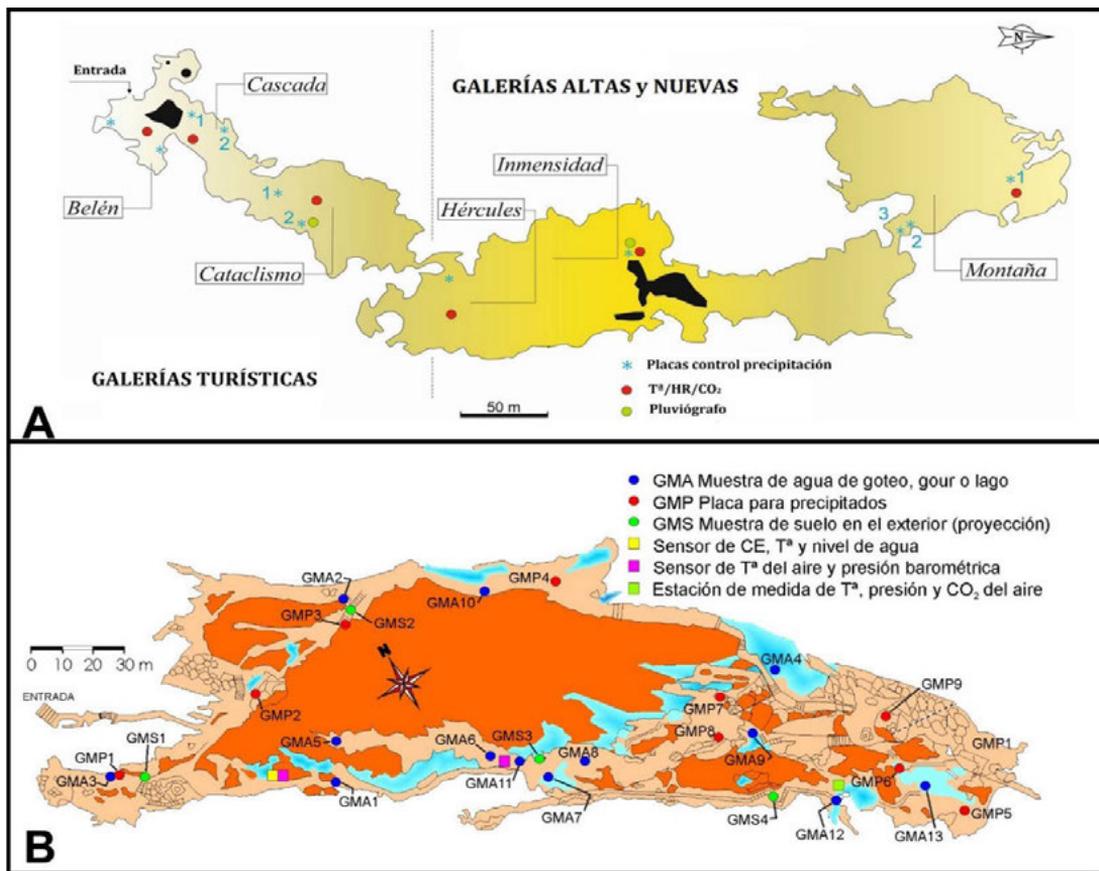


Figura 1. A. Localización de los puntos de muestreo en la Cueva de Nerja (Nerja, Málaga). B. Localización de los puntos de muestreo en la Gruta de las Maravillas (Arcena, Huelva)

Respuesta hidrológica de la cavidad. Se realizan muestreos trimestrales y semestrales del agua de goteo para su posterior análisis químico: alcalinidad, aniones (SO_4^{2-} , Cl⁻), cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+) y elementos traza.

Análisis de indicadores mineralógicos, geoquímicos y estudio de la presencia de biofilms. Sobre el material carbonatado precipitado en los soportes artificiales (placas Petri) situados en las cuevas se realizan los diferentes análisis (Figura 3). Desde la caracterización mineralógica, el análisis de elementos mayores, menores y trazas, hasta el estudio de los microorganismos presentes en los precipitados.



Figura 2. Suelos muestreados en la Cueva de Nerja y en la Gruta de las Maravillas



Figura 3. Imágenes de algunos de los puntos de muestreo para control de precipitación mineral actual

Análisis de indicadores isotópicos en aguas y carbonatos. Los análisis isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ y δD) se realizan sobre los precipitados carbonatados y sobre las aguas de lluvia y goteo.

Análisis estadístico y espectral. La interpretación de los datos geoquímicos se lleva a cabo mediante análisis estadístico multivariante, utilizando el Análisis de Componentes Principales (PCA) que nos permite reducir el número de variables y agruparlas según sus tendencias y sus posibles condicionantes.

Resultados y discusión

Los resultados preliminares que se presentan responden al primer año de estudio en ambas cuevas.

Propiedades fisicoquímicas y bioquímicas de los suelos de la Cueva de Nerja y de la Gruta de las Maravillas

El contenido en carbonatos de los suelos muestreados sobre la Cueva de Nerja varía entre 10-40%, en el caso de los suelos situados sobre las Galerías Turísticas, y > 40% para los situados sobre las Galerías Altas y Nuevas. El pH de los suelos con menor contenido en carbonatos está cercano a la neutralidad (7,0-7,3) y resulta moderadamente alcalino para los suelos con mayor contenido en carbonatos (7,2-7,8). En cuanto a la conductividad, se constata que ninguno de los suelos se puede considerar salino ($CE < 2 \text{ dS m}^{-1}$). Los suelos con menor conductividad ($< 0,6 \text{ dS m}^{-1}$) corresponden a suelos con bajo contenido en CO_2 y más carbonatados, mientras que la mayor conductividad ($> 0,8 \text{ dS m}^{-1}$) se registra en los suelos menos carbonatados y con mayor contenido en CO_2 . La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es mayor para los suelos situados en la zona más cercana a las entradas de la cueva. El contenido en CO_2 de los suelos es alto, especialmente en los situados cerca de la entrada de la cavidad (7-9%), y es menor en el resto de suelos (2,2-3,5%), que tienen poca cobertura vegetal. La capacidad de retención de agua es mayor para los suelos más próximos a la entrada de la cueva y disminuye en los situados en zonas más distales. La respiración de los suelos a 2h tiene una relación significativa con el contenido en CO_2 ya que este constituye una fuente de energía para los microorganismos y varía entre 5,3 y 9,51 $\text{mg CO}_2 \text{ h}^{-1} 100 \text{ g}^{-1}$ (Jiménez de Cisneros *et al.*, 2021).

Los suelos muestreados sobre la Gruta de las Maravillas son todos silíceos, salvo una muestra que presenta un contenido en carbonatos del 16%. Todos muestran pH ligeramente básicos, con un valor medio de 7,6. Los valores más básicos corresponden al suelo con un contenido más alto en carbonatos. La conductividad en estos suelos es baja, siendo el valor medio de 189 $\mu\text{S cm}^{-1}$. En cuanto a los contenidos en CO_2 , varían entre 1,5 y 3,5%. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de estos suelos tiene un valor medio de 9,2 meq/100 g. La capacidad de retención de agua de los suelos es de 55%. Los resultados de la respiración de los suelos a 2h varía entre 6,2 y 8,1 $\text{mg CO}_2 \text{ h}^{-1} 100 \text{ g}^{-1}$ (Jiménez de Cisneros *et al.*, 2024).

Análisis mineralógico

El análisis mineralógico de los suelos de la Cueva de Nerja indica que la dolomita es el mineral mayoritario (50-60%) acompañado de cuarzo (7-12%) y filosilicatos (15-24%). Los suelos muestreados en el entorno de la entrada de la cueva corresponden a las zonas ajardinadas y se caracterizan por presentar una mayor fracción de minerales de las arcillas (38-51%), mayor contenido en sílice (22-23%), y un porcentaje en dolomita que varía entre 26 y 39%. En todas las muestras aparecen feldespatos como minerales accesorios.

En la Gruta de las Maravillas los suelos principalmente son silíceos siendo el cuarzo el mineral mayoritario acompañado de filosilicatos (15-20%, montmorillonita, illita, clorita, vermiculita) y feldespatos (5-10%). Sólo en uno de los suelos el contenido en dolomita alcanza el 15-20%.

Temperatura, humedad y concentración de CO_2 del aire

En ambas cuevas la temperatura del aire tiene un valor medio de 19°C. La temperatura del aire

interior se mantiene permanentemente por encima de la temperatura media del aire exterior durante los meses de mayo a octubre. El resto del año, la temperatura exterior es, en general, inferior a la de las cavidades. Esta diferencia de temperaturas exterior-interior (que se traduce en una diferencia de densidades entre el aire exterior e interior) condiciona la dirección de los flujos de aire y el grado de ventilación de las cavidades. La humedad del aire interior a lo largo del periodo monitorizado es del 97% en ambas cuevas. La concentración de CO₂ en el aire también varía espacial y temporalmente, en relación a los diferentes modos de ventilación vigentes en las cavidades y al número de visitantes (Liñán et al., 2008; 2018, 2020). En la Cueva de Nerja los valores varían entre 550-1800 ppm y en la Gruta de las Maravillas entre 600-1500 ppm.

Análisis geoquímico de las aguas y precipitados actuales

Todos los puntos de goteo que tienen asociado un dispositivo de precipitación de carbonato han permanecido activos durante el período de control. En general, los precipitados obtenidos en cada punto de estudio responden, mayoritariamente, a cristales de hábito romboédrico con un crecimiento homogéneo en todas direcciones. En algunas de las placas se ha distinguido la presencia de comunidades microbianas (Jurado et al., et al., 2022).

El factor principal que condiciona la tasa de precipitado es la concentración de CO₂ en el aire que finalmente determina la P_{CO₂} del agua, y por tanto, la menor/mayor cantidad de precipitado. En todos los dispositivos de la Cueva de Nerja se ha obtenido precipitación de material carbonatado, si bien la cantidad de precipitado ha sido diferente según el punto de control y la etapa estacional considerada. En la Gruta de las Maravillas sólo se ha obtenido precipitado en dos de las placas de control (Sala de los Banquetes GMP1 y Sala de los Brillantes GMP3).

Los valores de δ¹⁸O obtenidos en los espeleotemas actuales de la Cueva de Nerja varían entre -4,1 ‰ y -7,2 ‰ con un valor medio de -5,4 ‰. Los valores de δ¹³C varían entre -3,4 ‰ y -12,1 ‰ con un valor medio de -9,5 ‰. Los valores isotópicos de los precipitados (δ¹⁸O, δ¹³C) son más pesados en primavera que en invierno. En algunas de las salas se constata que los valores de δ¹³C de los precipitados reflejan una actividad biológica en la cubierta vegetal. Los datos isotópicos de las aguas de goteo mayoritariamente se adaptan a la línea meteórica local definida a partir de las muestras de agua de lluvia, la cual se localiza entre la línea del Mediterráneo Occidental y la línea meteórica global. Los valores que se sitúan fuera corresponderían a muestras que pudieran haber sufrido procesos de evaporación (Figura 4). Las aguas de infiltración muestran valores comprendidos entre -2,64 ‰ y -7,08 ‰ para el δ¹⁸O con un valor medio de -5,1 ‰, y entre -9,87 ‰ y -43,70 ‰ para el δD, con un valor medio de -34,00 ‰ (Jiménez de Cisneros et al., 2022).

El bajo rango de variación de la composición isotópica del agua de goteo comparado con el de lluvia (Figura 4) se asocia a los efectos del suelo y del epikarst, que amortiguan y homogeneizan la señal isotópica, y también a los periodos en los que se produce la infiltración eficaz, ya que no todas las lluvias del año la producen (Caballero et al., 1996; Matthey, 2008). Los valores isotópicos del agua de goteo son más ligeros en los meses de invierno, y más pesados durante la primavera-verano, en consonancia con los datos isotópicos de los precipitados carbonatados y reflejando así su estacionalidad.

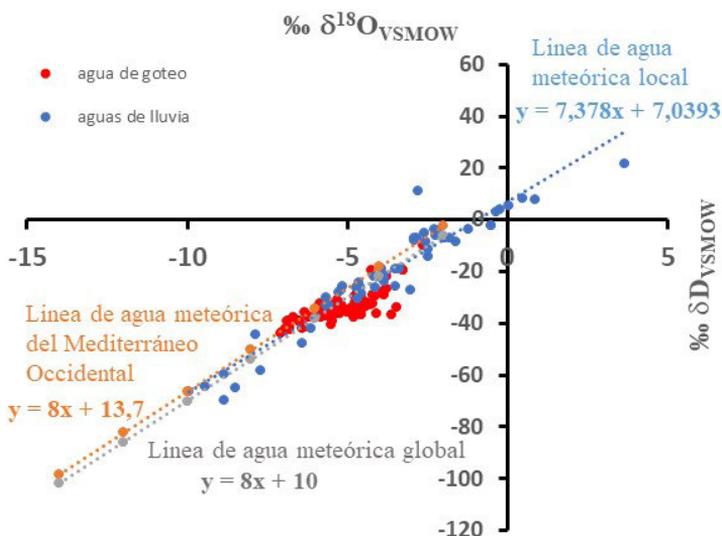


Figura 4. Valores isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y δD) obtenidos para las aguas de lluvia y de goteo de la Cueva de Nerja

En la Gruta de las Maravillas, las aguas muestreadas en las placas de precipitado durante el periodo invernal presentan valores de $\delta^{18}\text{O}$ comprendidos entre $-5,27\text{‰}$ y $-4,35\text{‰}$ y entre $-30,24\text{‰}$ y $-22,98\text{‰}$ para el δD (puntos rojos y azules en Figura 5). Estos intervalos son similares a los de las aguas de goteo muestreadas durante el mismo periodo, entre $-5,39\text{‰}$ y $-4,49\text{‰}$ para el $\delta^{18}\text{O}$ y entre $-30,28\text{‰}$ y $-23,17\text{‰}$ para el δD , como es de esperar. Los valores isotópicos de los muestreos realizados al final de la primavera (puntos verdes en Figura 5) presentan una dispersión mucho mayor, con valores entre $-5,58\text{‰}$ y $0,31\text{‰}$ para el $\delta^{18}\text{O}$ y $-33,73\text{‰}$ y $-4,41\text{‰}$ para el δD . Se observan dos grupos de aguas, las más pesadas, con claros indicios de evaporación y otro grupo con valores similares a los invernales. Algo parecido ocurre con las aguas de las placas de precipitados, aunque en este caso tan solo tres de ellas contenían agua en cantidad suficiente para su muestreo y análisis. Por otra parte, se dispone de muestras de agua de precipitación correspondientes a cuatro eventos de lluvia, tomadas los días 18, 19 y 23 de mayo de 2023 y el 19 de octubre de 2023 (Tabla 1). Las aguas más pesadas corresponden al primero de los eventos del mes de mayo y las más ligeras a los eventos de los días posteriores en ese mismo mes. En la muestra de octubre se obtienen valores similares a los de la mayoría de las aguas de goteo invernal.

	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	Desv	$\delta\text{D}(\text{‰})$	Desv	Exceso D
18/05/2023	-2,99	0,10	-17,88	0,31	6
19/05/2023	-6,56	0,04	-36,66	0,22	16
23/05/2023	-6,14	0,06	-33,58	0,25	16
19/10/2023	-4,73	0,02	-26,35	0,20	12

Tabla 1. Valores isotópicos de las aguas de precipitación recopiladas en el entorno de la Gruta de las Maravillas

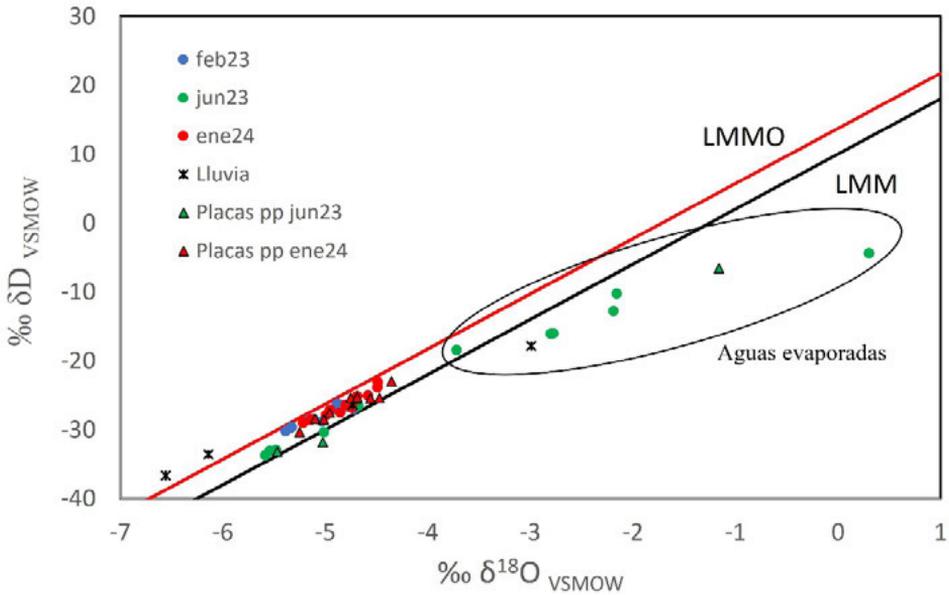


Figura 5. Valores isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y δD) obtenidos en las aguas de lluvia (asteriscos), goteo (círculos) y de las placas de precipitación (triángulos) de la Gruta de las Maravillas. LMM: línea meteórica mundial, LMMO: línea meteórica del Mediterráneo Occidental

La mayoría de las aguas analizadas se alinean entre la LMM y la LMMO. Las aguas más ligeras corresponden a las lluvias precipitadas entre el 19 y el 23 de mayo, con valores de exceso de deuterio (d) de 16 ‰, valores característicos de aguas procedentes de frentes atlánticos (Gat y Carmi, 1970; González-Ramón et al., 2016), frente a valores de (d) del 6 ‰ para el evento del 18 de mayo, que se caracteriza por aguas evaporadas, y del 12 ‰ para el evento del 19 de octubre que se corresponden con aguas procedentes de frentes mediterráneos. Estos datos, aunque preliminares, ponen de manifiesto que el periodo de mayor infiltración corresponde a los periodos invernales, si bien también existe infiltración de las precipitaciones registradas al final de la primavera algunas de las cuales han sufrido procesos de evaporación previos a su infiltración.

Conclusiones

Se presentan en este trabajo las principales líneas de investigación y los resultados preliminares de un proyecto de investigación centrado en el estudio de dos importantes cuevas andaluzas, ambas abiertas al público y con un rico patrimonio natural y cultural, cuyo objetivo final es la conservación de estos ambientes subterráneos y garantizar la seguridad de los visitantes y trabajadores.

Las propiedades fisicoquímicas y bioquímicas de los suelos, en ambas cuevas, son bastante similares caracterizándose por ser suelos ligeramente básicos, con una conductividad indicativa del contenido en materia orgánica, y una capacidad de intercambio catiónico ligada al conte-

nido en arcillas y de carbono orgánico. Los resultados isotópicos de los precipitados actuales muestran la relación directa con el suelo externo antropizado en ambas cuevas.

La monitorización ambiental en las dos cuevas, junto con el control hidrológico de las aguas de lluvia y goteo, permite conocer los procesos que están afectando a la alteración de las paredes y a la formación del nuevo material mineral. Los primeros datos indican la importancia de la concentración de visitantes en algunas de las salas ya que supone una alteración de los niveles de concentración de CO₂ en el aire. Los resultados isotópicos de los precipitados actuales muestran la relación directa con el agua de lluvia, concentración de CO₂ en el aire y en algunos casos, la presencia de materia orgánica en el suelo externo.

El desarrollo de los diferentes precipitados minerales está relacionado con el proceso de crecimiento cristalino, con la disponibilidad y la composición de las aguas kársticas y, por tanto, íntimamente ligado a la dinámica ambiental imperante en la cavidad.

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., Bryant, 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.
- Baker, A. J., Matthey, D. P., Baldini, J. U. L., 2014. Reconstructing modern stalagmite growth from cave monitoring, local meteorology, and experimental measurements of dripwater films. *Earth and Planetary Science Letters* 392, 239-249.
- Baldini, J.U.L., McDermott, F., Hoffman, D.L., Richards, D.A., Clipson, N., 2008. Very-high-frequency and seasonal cave atmosphere Pco2 variability: Implications for stalagmite growth and oxygen isotope-based paleoclimate records. *Earth and Planetary Science Letters*, 272: 118-129.
- Benavente, J. y Almécija, C. 1993. Estudio geomorfológico del entorno de la Cueva de Nerja. En Carrasco, F. (Ed.). *Geología de la Cueva de Nerja. Trabajos sobre la Cueva de Nerja*, 3, 119-158. Patronato de la Cueva de Nerja. Málaga.
- Caballero, E., Jiménez de Cisneros, C., Reyes, E. 1996. A stable isotope study of cave seepage waters. *Applied Geochemistry* 11, 583-587.
- 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.
- Durán, J. J., Barea, J., López-Martínez, J., Rivas, A., Robledo, P. (2004): Panorámica del Karst en España. En: Andreo, B. y Durán, J. J. (Eds): *Investigaciones en sistemas kársticos españoles*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas subterráneas. IGME 12, 15-25

- 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.
- Fairchild, I.J., Durán, J.J., Andrea, B., Carrasco, F. 2006. *Speleothems as indicators of wet and dry periods*. 21-28. Paper presented at Karst, Climate Change and Groundwater.
- Gat, J.R. and Carmi, I. 1970. Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area. *Journal of Geophysical Research*, 75, 3039-3048.
- González-Ramón, A.; Luque-Espinar, J.A.; Delgado-Huertas, A. 2016. Climate footprint in karst aquifers derived from time series and spatial data: the case of Orce-María (SE Spain). *Environmental Earth Sciences*, 75(10), 1-16.
- Guerra Merchán, A., Serrano, F., Ramallo, D. 2004. Geomorphic and sedimentary Plio–Pleistocene evolution of the Nerja area (northern Alborán basin, Spain). *Geomorphology*, 60,89-105.
- Jiménez-Sánchez, M., Stoll, H. y Aranburu, A. 2006. A geochronological approach for cave evolution in the Cantabrian Coast (Pindal Cave, NW Spain). *Z. Geomorpho. N.F. Suppl.*, 147, 129-141.
- Jiménez de Cisneros, C., A. Peña, A., Caballero, E. and Liñán Baena, C. 2021. A multiparametric approach for evaluating the current carbonate precipitation and external soil of Nerja Cave (Málaga, Spain). *International Journal of Environmental Research* doi.org/10.1007/s41742-020-00278-x
- Jiménez de Cisneros, C., Liñán Baena, C., Torres, C., Peña Heras, A., González Ramón, A. 2022. Control y análisis geoquímico de la precipitación carbonatada actual en la Cueva de Nerja (Málaga, S de España). VIII Congreso Español sobre Cuevas y Minas Turísticas. “Minas y Cuevas: Patrimonio Geológico y Turístico”, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. Octubre-Pulpí (Almería).
- Jiménez de Cisneros, C., González-Ramón, A., López-Chicano, M., Peña, A., Jiménez -Espejo, F.J., y Martín-Rosales, W. 2024. Caracterización mineralógica y geoquímica de los suelos externos de la Gruta de las Maravillas. Datos preliminares de la dinámica de crecimiento carbonatado actual y respuesta hidrológica de la cueva. XI Congreso de Geología de España, Ávila.
- Jordá Pardo, J.F. 2004. Análisis geomorfológico y paleogeográfico de la Costa del Sol Oriental en los alrededores de Nerja (Málaga, S de España). *Miscelánea en homenaje a Emiliano Aguirre*. Geología. 52-71.
- Jurado, V., Del Rosal, Y., Jiménez de Cisneros, C., Liñán, C., Martóin-Pozas, T., González-Pimentel, J.L., Hermosín, B., Saiz-Jiménez, C. 2022. Microbial communities in carbonate precipitates from drip waters in Nerja Cave, Spain. *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.
- Liñán, C., Ojeda, L., Benavente, J., del Rosal, Y., Vadillo, I., 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, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139147>.
- 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.
- Martínez-Moreno, F.J., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A., Teixido, T., Ruano, P., Peña,, J.A., González-Castillo, L., Ruiz-Constán, A., López-Chicano, M., Martín-Rosales, W. 2014. Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain). *Journal of Applied of Geophysics*, 107, 149-162 <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.021>
- Martínez-Moreno, F.J., Pedrera, A., Galindo-Zaldívar, J., López-Chicano, M., Azor, A., Martín-Rosales, W.,

- Ruano, P., Calaforra, J.M., 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.
- McDermott F. 2004. Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: A review. *Quaternary Sci. Rev.* 23: 901–918.

Monitorización de la concentración de radón en la Cueva de Los Verdes (Lanzarote)

Lario Gómez, J.¹, Cuezva Robleño, S.², Fernandez Cortés, A.³, Martin-Pozas, T.³, Sánchez-Moral, S.²

¹ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Las Rozas, Madrid.
javier.lario@ccia.uned.es

² Museo Nacional de Ciencias Naturales-CSIC, Madrid.
scuezva@csic.es; ssmilk@mncn.csic.es

³ Departamento de Biología y Geología, Universidad de Almería, Almería.
acortes@ual.es; tmp785@ual.es

RESUMEN

La Cueva de Los Verdes (Lanzarote, Islas Canarias) constituye uno de los máximos atractivos turísticos de Lanzarote, habiendo recibido en 2023 más de 585.975 visitas. La normativa actual indica que en las cuevas y espacios subterráneos debe medirse la concentración de ²²²Rn en aire y, en caso de superar ciertos valores, aplicar medidas de vigilancia y control de estos niveles, principalmente enfocados a conocer las dosis efectivas que reciben los trabajadores. En este trabajo se presentan los datos de temperatura y humedad del aire y de la concentración de ²²²Rn en la cavidad durante un ciclo anual de registro continuo. Los resultados muestran como las condiciones termohigrométricas son decisivas en la evolución de la renovación del aire subterráneo y se evalúa la posible dosis efectiva que puede afectar a los trabajadores y visitantes del tubo volcánico.

Palabras clave: dosis efectiva, monitorización microclimática, radón, tubo volcánico.

ABSTRACT

Los Verdes cave (Lanzarote, Canary Islands) is one of Lanzarote's main tourist attractions, having received more than 585,975 visits in 2023. Current regulations indicate that the amount of ²²²Rn must be measured in caves and underground spaces and, if certain values are exceeded, measures must be applied for monitoring and control of these levels, focussing mainly focused on knowing the effective doses received by workers. In this paper, we present data on air temperature, humidity, and ²²²Rn concentration in the cavity over an annual cycle of continuous recording. The results demonstrate how thermohygrometric conditions are crucial in the evolution of subterranean air renewal. In addition, the potential effective dose that may affect workers and visitors to the volcanic tube is assessed.

Keywords: effective dose, microclimate monitoring, radon, volcanic tube.

Introducción

Para evaluar los riesgos radiológicos potenciales para trabajadores y visitantes en lugares altamente radiactivos, como minas subterráneas o cuevas, es crucial la monitorización de la concentración de radón en el aire. Estudios previos han estudiado los niveles de radón en entornos subterráneos y examinado sus efectos sobre la salud de los usuarios, con investigaciones realizadas en cavidades españolas por Dueñas *et al.* (1999), Lario *et al.* (2005, 2006), Sainz *et al.* (2007), Álvarez-Gallego *et al.* (2015) o Calaforra *et al.* (2022). La concentración de radón en las cavidades depende de numerosos factores internos y externos, como la velocidad del viento, las diferencias de temperatura entre el exterior y el interior, las variaciones de la presión

atmosférica, la humedad, la geomorfología, la porosidad y el contenido de radio de las rocas y los sedimentos, como investigaron Kies et al. (1997). Dada la intrincada dinámica del radón en las atmósferas subterráneas naturales, la monitorización continua es vital en las cuevas turísticas con fines de radioprotección.

La normativa indica que en las actividades subterráneas debe haber un control del nivel de radón en el aire y, si se superan determinados niveles, deben aplicarse medidas de control a visitantes y trabajadores. En este artículo se presentan los niveles de radón en la Cueva de Los Verdes (Lanzarote), se estiman las dosis efectivas de radiación que pueden recibir los usuarios y se realizan recomendaciones sobre la duración de la estancia en el interior de las cavidades para no superar los niveles de radiación establecidos por la legislación y las recomendaciones de los organismos internacionales.

Mediciones de radón en la Cueva de Los Verdes

La Cueva de los Verdes se localiza en el noreste de la isla de Lanzarote y forma parte del tubo volcánico de La Corona, un sistema de unos 10 km de desarrollo formado durante la erupción del volcán de La Corona, hace cerca de 21 Ka (Lario et al., 2022). El tramo del tubo volcánico asociado a la cavidad se desarrolla desde el Jameo de la Puerta Falsa hasta la actual boca de entrada de la Cueva de Los Verdes (Figura 1), con un desarrollo de 1.370 m (Montoriol Pous and De Mier, 1969). Un sector del tubo está habilitado para el turismo, habiendo recibido en 2023 más de 585.975 visitas. Existen pocos datos sobre concentración de ^{222}Rn en tubos volcánicos, habiéndose realizado medidas mensuales en la propia Cueva de los Verdes (Quindós et al., 2004) y en continuo en la Cueva del Viento, en Tenerife (Salazar-Carballo et al., 2023).



Figura 1. Entrada a la Cueva de Los Verdes

El Gobierno español ha transpuesto parcialmente la Directiva 2013/59/EURATOM que establece las normas básicas de seguridad para la protección contra los peligros derivados de la

exposición a radiaciones ionizantes, a través del Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre de 2022. La norma establece que el límite de dosis efectiva para los trabajadores expuestos será de 20 mSv por año oficial. Además, indica que los gestores, tras realizar una evaluación preliminar, clasificarán los lugares de trabajo en función del riesgo de exposición, considerando la probabilidad y magnitud de las exposiciones potenciales, en las siguientes zonas:

- Zona vigilada: Se trata de un área en la que, aunque no es una zona controlada, existe la posibilidad de recibir dosis efectivas superiores a 1 mSv por año oficial.
- Zona controlada: Se trata de una zona en la que se cumple alguna de las siguientes condiciones: posibilidad de recibir dosis efectivas superiores a 6 mSv por año oficial.
- Zonas de estancia limitada: Son áreas en las que existe el riesgo de recibir una dosis superior a 20 mSv por año oficial.

El Ministerio de Sanidad español ha publicado recientemente el “Plan Nacional contra el Radón” en el que establece como prioridad facilitar la aplicación de las indicaciones y nuevas tasas de conversión propuestas en la Publicación 137, Parte 3 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) en los lugares de trabajo con condiciones extremas (Ministerio de Sanidad, 2024). Por ello, en determinados tipos de lugares de trabajo es necesario realizar investigaciones sobre los parámetros que más influyen en la concentración de radón en el aire y, a partir de los resultados experimentales, realizar cálculos de dosis siguiendo la metodología propuesta por la ICRP.

Para ello, se han realizado medidas de ^{222}Rn durante el periodo 1/04/2023 a 31/03/2024, con un intervalo de 1 hora, con un medidor por ionización RadonEye+² de FTlab calibrado y certificado. Se ha complementado con un datalogger TinyTag para medida de temperatura y humedad relativa del aire dentro de la cavidad. Los datos meteorológicos del exterior provienen de la estación del Aeropuerto de Lanzarote.

La Figura 2 muestra el registro continuo de ^{222}Rn en la Cueva de Los Verdes, donde los datos de un ciclo anual dan un valor anual medio de 169 Bq/m³, con un mínimo de 17 Bq/m³ y un máximo de 882 Bq/m³. Se puede observar una tendencia al aumento de la concentración de ^{222}Rn al inicio del verano, tendencia que se mantiene hasta el inicio del invierno en esta zona.

La temperatura media anual medida en el interior de la cavidad es de 20,05°C con un mínimo de 18,58°C y un máximo de 21,60°C. La humedad relativa en el interior de la cavidad oscila entre 41,25 y 90,08%, con un valor medio del 76,52%. La temperatura exterior media anual es de 22,36°C, con un valor mínimo de 12,10°C y máximo de 40,00°C. Si se observan las gráficas de temperatura del interior del tubo volcánico y del exterior (Figura 2), los valores menores de concentración de ^{222}Rn se producen en los meses más fríos y los valores mayores en los meses más cálidos, siendo la tendencia a la subida de la concentración cuando la temperatura exterior es superior a la interior, momentos de menor ventilación de la cavidad. La ventilación de la cavidad, y por consiguiente, el descenso en la concentración de ^{222}Rn , se produce cuando la temperatura interior es mayor que la temperatura exterior. Los valores mínimos de concentración de ^{222}Rn se producen de diciembre a abril, asociado a un descenso de la temperatura de la cavidad y a valores de humedad relativa interior menores del 60%.

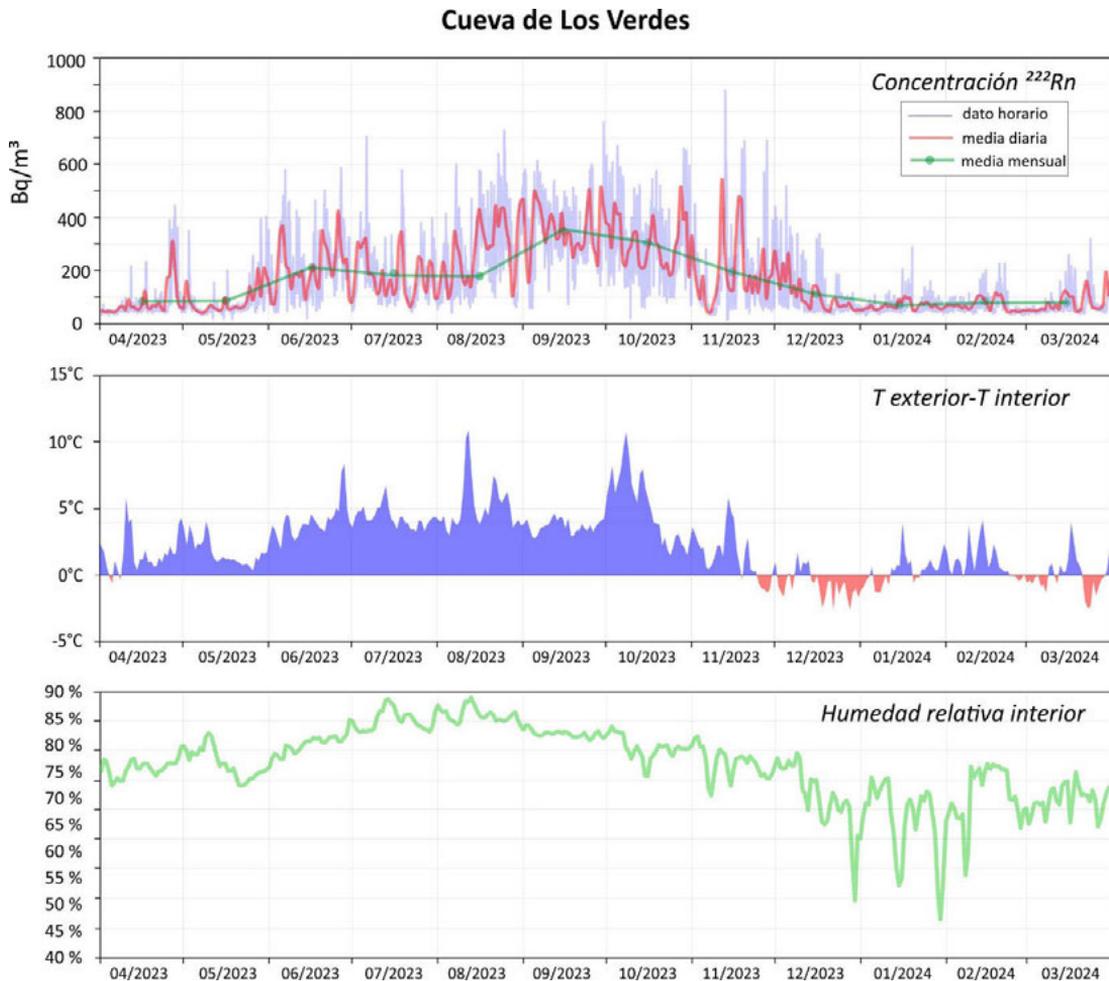


Figura 2. Valores de concentración de ²²²Rn en la Cueva de Los Verdes durante un ciclo anual (del 01/04/2023 al 31/03/2024). Se muestran los valores registrados cada hora, así como las medias diarias y mensuales calculadas a partir de los datos de registro. En las gráficas inferiores se muestra la diferencia entre la temperatura exterior e interior y la humedad relativa interior de la Cueva de Los Verdes durante un ciclo anual (valores de las medias diarias)

Monitorización de las dosis efectivas recibidas por los trabajadores

Para el cálculo de las dosis efectivas se han utilizado las recientes recomendaciones publicadas por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, 137), donde la dosis recibida por un individuo debido a la exposición al gas radón (E_{WLM}) se calcula en función de la concentración de este gas (C_{Rn} , expresada en Bq/m³) y del tiempo (t) de exposición según la siguiente expresión (ICRP, 2017):

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

Donde E_{WLM} es la dosis de exposición calculada en unidades WLM (*Working Level Month*). El Factor de Equilibrio (F) corresponde a la relación entre la concentración de radón equivalente en equilibrio radiactivo con su progenie (es decir, con la misma energía alfa potencial que la progenie en el aire) y la concentración de gas radón medida, y se ha fijado en 0,4 para las cuevas turísticas, según el Informe 137 de la ICRP (2017). En entornos subterráneos de cuevas turísticas, la ICRP propone dosis de conversión por inhalación de radón en lugares de trabajo por un trabajador de referencia de 24 mSv/WLM, pero debido a la actividad física que se desarrolla en su interior, recomienda utilizar un valor menos restrictivo de 20 mSv/WLM, que actuaría como multiplicador del resultado de la ecuación para el cálculo de la dosis efectiva (E, en mSv) recibida por los trabajadores debido a la exposición al ^{222}Rn y su progenie. Debido a que la Directiva 2013/59/EURATOM del Consejo Europeo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección contra los riesgos que resultan de la exposición a radiaciones ionizantes, se publicó antes que estas recomendaciones, la mayor parte de la Normativa Europea sigue utilizando las anteriores recomendaciones de la ICRP de dosis de conversión de 5,06 mSv/WLM en cuevas turísticas (Informe 65 de la ICRP, 1993). Debido a la coexistencia de las dos propuestas de la ICRP, los cálculos se han realizado de las dos formas.

Dado que no está disponible el registro de las horas de estancia en la cavidad de los distintos trabajadores (mantenimiento, guías, etc...), se han calculado las horas de trabajo máximas anuales y mensuales para los escenarios descritos: DFC 20 mSv/WLM y 5,06 mSv/WLM, para no superar los 6 mSv/año, en cuyo caso deberían aplicarse medidas de control y vigilancia, y 20 mSv/año, que es el máximo permitido por la legislación para los trabajadores de estas cavidades.

La Tabla 1 muestra los tiempos de estancia mensuales y anuales máximos para no superar las dosis efectivas recomendadas por la normativa. Se observa que la aplicación de la DFC de 20 mSv/WLM es mucho más restrictiva y reduce considerablemente los tiempos de estancia en la cavidad. Dada la variabilidad estacional de la concentración de ^{222}Rn , al utilizar los datos mensuales se realiza un ajuste de las horas de estancia a cada mes y, por tanto, las horas de trabajo anuales están también más ajustadas. De hecho, si se realiza el cálculo de las horas de estancia máximas teniendo en cuenta la media anual de concentración de ^{222}Rn , estas son de 2.833 horas anuales para no superar 6mSv/año y 9.444 horas anuales para no superar los 20mSv/año, usando DFC de 20mSv/WLM (y sus correspondientes para DFC=5,06mSv/WLM), mientras que sumando los tiempos mensuales con la concentración mensual, estas son de 3.963 horas anuales para no superar 6mSv/año y 13.209 horas anuales para no superar los 20mSv/año, lo que corresponde aumentar un 40% el tiempo de trabajo en el interior del tubo volcánico antes de superar los límites recomendados. Por tanto, teniendo en cuenta los datos mensuales, se obtienen valores más ajustados y se puede aplicar unos límites de jornada para no exponer a los trabajadores a dosis perjudiciales asociados a los valores reales de concentración mensual de radón. Considerando que la jornada anual oficial es de 1.826 horas, no se supera en ningún momento los máximos recomendados. Además, se tiene que considerar que ningún trabajador cumple la jornada íntegra en la cavidad.

Mes	²²² Rn media (Bq/m ³)	²²² Rn mínimo (Bq/m ³)	²²² Rn máx. (Bq/m ³)	T 1 (horas)	T 2 (horas)	T 3 (horas)	T 4 (horas)
abr-23	84	30	450	474	1.582	1.875	6.251
may-23	86	31	409	462	1.541	1.827	6.089
jun-23	211	41	591	188	628	745	2.483
jul-23	181	43	708	220	733	869	2.897
ago-23	178	30	882	224	747	885	2.951
sep-23	355	56	762	112	374	444	1.479
oct-23	305	59	673	130	435	516	1.718
nov-23	195	33	882	205	682	808	2.695
dic-23	111	34	524	358	1.193	1.414	4.714
ene-24	69	32	291	579	1.928	2.287	7.622
feb-24	78	30	342	509	1.698	2.013	6.711
mar-24	79	34	342	501	1.670	1.980	6.599
media mensual	161	38	571	330	1.101	1.305	4.351
mensual con media anual	169			236	787	933	3.111
anual con media anual	169			2.833	9.444	11.198	37.328
anual acumulado				3.963 (956-13.356)	13.209 (3.188-44.520)	15.663 (3.781-52.791)	52.210 (12.603-175.970)

Tabla 1. Tiempos de estancia mensuales y anuales máximos para no superar las dosis efectivas recomendadas por la normativa. T1: con DCF=20 mSv/WLM para no superar 6mSv/año; T2: con DCF=20 mSv/WLM para no superar 20mSv/año; T3: con DCF=20 mSv/WLM para no superar 6mSv/año; T4: con DCF=20 mSv/WLM para no superar 20mSv/año. En los datos anuales acumulados se presentan también, entre paréntesis, los datos usando la concentración máxima y mínima

Hay que tener en cuenta que en este caso se han usado las medias mensuales de concentración de ²²²Rn, aunque como se observa en la Tabla1, el rango entre los niveles máximos y mínimos medidos es considerable. En la Tabla 1 se indican los valores de tiempos anuales acumulados recomendados usando las dosis máximas y mínimas de concentración de radón mensuales, observándose el amplio rango de éstos. Dado que se dispone del registro horario de la concentración de radón en la cavidad, estos valores se podrían ajustar más usando los datos del registro horario de estancia en la misma.

Conclusiones

El estudio de la concentración de ²²²Rn en cavidades está obligado por diferentes normativas nacionales y comunitarias a fin de evaluar su posible incidencia en los trabajadores y adoptar, en su caso, medidas de mitigación y control. En el caso de la Cueva de Los Verdes (Lanzarote) la media de concentración de este gas medida horariamente durante un ciclo anual es de 169

Bq/m³, por debajo de los 300 Bq/m³, el nivel de referencia que marca la normativa para tomar medidas de control. El valor medio anual muestra que este estadístico no es representativo de los valores de concentración a los que pueden estar expuestos los trabajadores, dado que se observan en algunos periodos valores que quintuplican ese valor. Los cálculos de dosis efectiva a los que se ven expuestos los trabajadores deben ser realizados, por tanto, con los valores reales medidos en los periodos de trabajo mediante monitorización en continuo. Si no se conocen a priori los horarios de estancia de los trabajadores, se pueden realizar cálculos de las horas máxima de trabajo mensuales de cada trabajador para no superar los límites establecidos por la legislación. El uso del registro continuo de concentración de ²²²Rn en lugar de las medias anuales, permite ajustar mejor los tiempos de estancia de cada trabajador obteniendo valores más ajustados pero que siguen garantizando su seguridad. Estos datos ofrecen herramientas al gestor para optimizar los tiempos de estancia de los trabajadores en la cavidad en función de los valores de concentración de radón en la misma.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto del Ministerio de Innovación y Ciencia PID2023-146299OB-C21. Agradecemos la colaboración de los Centros de Arte Cultura y Turismo del Cabildo de Lanzarote y en especial de todo el personal de la Cueva de Los Verdes.

Referencias

- Álvarez-Gallego, M., García-Antón E., Fernández-Cortés, A., Cuezva, S., and 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>.
- Calaforra, J.M., Carretero, M., Martegani, L., Gázquez, F., and Fernández-Cortés, A. (2022). Evaluación dosimétrica por exposición a gas radón en la Mina Rica – Geoda de Pulpi (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*:13-26.
- Dueñas, C., Fernandez, M.C., Cañeete, S., Carretero, J., and Liger, E. (1999). ²²²Rn concentrations, natural flow rate and the radiation exposure levels in the Nerja cave. *Atmos. Env.* 33,501–510. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2011.06.039>
- ICRP (2017). ICRP Publication 137: Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3: Annals of the ICRP, v. 46 (3-4):1-486. <https://doi.org/10.1177/0146645317734963>
- Kies, A., Massen, F., and Feider, M. (1997). Measuring Radon in underground locations. In: Virk, H.S. (Ed.), *Rare Gas Geochemistry*. Guru Nanak Dev University, Amritsar: 1-8
- Lario, J., Martin Pozas, T., Sánchez Moral, S., Cañaveras, J.C., Fernandez Cortes, A., Cano, R., Lopez Tercero, C., Roldan, A., Martin Gonzalez, E., Pérez Mejías, C., and Cheng, H. (2022). El Túnel de la Atlántida (Lanzarote). Un patrimonio geológico sumergido de interés mundial. En: Calaforra y Durán Valsero (Eds.): *Minas y Cuevas: Patrimonio Geológico y Turístico*, 287-298. ACTE.
- Lario, J., Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Cuezva S., and 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., and 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>.
- Ministerio de Sanidad (2024). Plan Nacional contra el radón. Colección Estudios, Informes e Investigación, Ministerio de Sanidad, Secretaria General Técnica, Centro de Publicaciones, 109 pp.
- Montoriol-Pous, J., and De Mier, J. (1969). Estudio morfogénico de las cavidades volcánicas desarrolladas en el malpaís de La Corona. *Geo y Bio Karst*, 22,542-563.
- Quindós Poncela, L., Fernández Navarro, P., Sainz Fernández, C., Gómez Arozamena, J., and Bordonoba Perez, M. (2004). Radon exposure in uranium mining industry vs. exposure in tourist caves. *Radiat Prot Dosimetry*, 111,41-44. <https://doi.org/10.1093/rpd/nch357>
- Sainz, C., Quindós, L.S., Fuente, I., Nicolás, J., and 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>
- Salazar-Carballo, P.A., López-Pérez, M., Martín-González, M.E., Hernández-Suarez, F., and Martín-Luis, M.C. (2023). Radon Dynamics and Effective Dose Estimation in a Touristic Volcanic Cave: La Cueva del Viento, Tenerife (Canary Islands, Spain). *GeoHealth*, 7, e2022GH000704. <https://doi.org/10.1029/2022GH000704>

Control del estado de conservación de las cuevas con arte paleolítico: una propuesta para su monitorización

Garate Maidagan, D.¹, Arriolabengoa Zubizarreta, M.², Intxaurbe Alberdi, I.¹, Salazar Cañarte, S.¹, Torres Riesgo, A.¹, González González, J.

¹ Universidad de Cantabria, Instituto Internacional Investigaciones Prehistóricas de Cantabria, Avda. de los Castros, 52, 39005 Santander, España.
diego.garate@unican.es inaki.intxaurbe@gmail.com sergio.salazar@unican.es torresaj@unican.es
² Universidad del País Vasco, Departamento de Geología. Bº Sarriena, s/n, 48940 Leioa, España.
martin.arriolabengoa@ehu.eus

Resumen

Las cuevas decoradas albergan las primeras obras de arte de la Humanidad y son un patrimonio de gran relevancia. La UNESCO reconoce su valor y las ha declarado Patrimonio de la Humanidad. Sin embargo, estos lugares son extremadamente frágiles y están expuestos a diversos factores de alteración que ponen en riesgo su conservación futura. Para implementar medidas de protección adecuadas, es crucial entender la dinámica de los sistemas de cuevas, analizando tanto los eventos que han dado forma al paisaje subterráneo actual como los procesos activos que los afectan en la actualidad. Esta tarea no es sencilla, ya que cada cueva está influenciada por una serie de parámetros ambientales y procesos intrínsecos que se superponen a otras condiciones y cambios globales, afectando de manera similar a las diferentes cuevas de la misma región. En esta investigación, seleccionamos varias cuevas donde monitoreamos las condiciones ambientales, describimos los procesos activos y caracterizamos eventos pasados. A partir de esto, desarrollamos cartografías a nivel macro (de toda la cueva) y a nivel micro (en algunos paneles decorados), señalando las áreas que requieren un control más cuidadoso. Nuestro diagnóstico se ha complementado con un seguimiento colorimétrico digital a partir de macrofotografías. Los resultados se compararon con los procesos activos previamente identificados, con el objetivo de comprender la dinámica de estas cuevas, identificar las áreas más vulnerables y proponer soluciones a los problemas de conservación existentes. Finalmente, cruzamos estos datos con la información previa de los parámetros ambientales de las cuevas para establecer posibles relaciones. En resumen, llevamos a cabo un análisis de las dinámicas actuales y pasadas en seis cuevas con arte paleolítico en la Comunidad Autónoma del País Vasco (Ekain, Altxerri, Aitzbitarte III, IV, V y IX), con el objetivo de anticipar posibles escenarios futuros y diseñar protocolos específicos que garanticen una conservación óptima.

Palabras clave: arte rupestre, cueva, geomorfología, monitorización, procesos tafonómicos.

Abstract

The decorated caves are home to the earliest works of art of mankind and are a heritage of great importance. UNESCO recognises their value and has declared them a World Heritage Site. However, these sites are extremely fragile and exposed to various disturbance factors that put their future conservation at risk. In order to implement adequate protection measures, it is crucial to understand the dynamics of cave systems, analysing both the events that have shaped the current subterranean landscape and the active processes that affect them today. This task is not straightforward, as each cave is influenced by a series of environmental parameters and intrinsic processes that are superimposed on other conditions and global changes, affecting different caves in the same region in a similar way. In this research, we selected several caves where we monitored environmental conditions, described active processes and characterised past events. From this, we developed macro-level (of the whole cave) and micro-level (in some decorated panels) mappings, pinpointing areas that require more careful monitoring. Our diagnosis has been complemented by digital colourimetric monitoring based on micro-photographs. The results were compared with previously identified active processes, with the aim of understanding the dynamics of these caves, identifying the most vulnerable areas and proposing solutions to existing conservation problems. Finally, we cross-checked these data with previous information on the environmental parameters of the caves to establish possible relationships. In summary, we carried out an analysis of the current and

past dynamics in six caves with Palaeolithic art in the Autonomous Community of the Basque Country ((Ekain, Altxerri, Aitzbitarte III, IV, V & IX) with the aim of anticipating possible future scenarios and designing specific protocols to ensure optimal conservation.

Keywords: cave, geomorphology, monitoring, rock art, taphonomic processes.

1. Introducción

Las cuevas son un elemento único del paisaje subterráneo donde, en ocasiones, convergen patrimonio cultural y natural. En Europa, algunas cuevas decoradas durante la Edad de Hielo han sido reconocidas por la UNESCO como el primer testimonio artístico de la humanidad. Este reconocimiento ha llevado a la implementación de medidas de protección especiales. En 1985, la cueva de Altamira fue declarada Patrimonio de la Humanidad como una “obra excepcional de la creatividad humana”. En 2008, esta distinción se extendió a otras 17 cuevas en el norte de España. En Francia, 25 cuevas del valle de Vézère, incluyendo la famosa cueva de Lascaux, están en la lista de la UNESCO desde 1979. La cueva Chauvet se agregó en 2014 y la cueva de Gorham en Gibraltar en 2016. La última incorporación en 2016 fue el conjunto alemán de “Arte y Cuevas de la Edad de Hielo del Jura de Suabia”.

Sin embargo, las cuevas son ambientes dinámicos y frágiles, influenciados por la geomorfología y las condiciones ambientales internas y externas. La alteración de las paredes de las cuevas depende de las características de la roca y de los procesos fisicoquímicos y biológicos que ocurren en la superficie de contacto entre la roca y los fluidos. Estos procesos incluyen calcificación, corrosión, erosión, biofilms, impactos antropogénicos y animales, y remoción de sedimentos (Lacanette *et al.*, 2013).

Dada la dependencia de la protección del arte rupestre de las condiciones ambientales, se han iniciado numerosos estudios enfocados en el monitoreo ambiental de las mismas, de los cuales, algunos, han derivado en el control y reducción del número de visitantes a las cuevas o a las zonas con arte (Dragovich, 1981; Quindos *et al.*, 1987; Hoyos *et al.*, 1998; Coye, 2011; Sánchez-Moral *et al.*, 2014; Liñán *et al.*, 2018; Leplat *et al.*, 2020). Pese a ello, aunque son efectivos para evaluar el estado actual, no prevén la evolución de las condiciones ambientales a corto y medio plazo. En el contexto actual del cambio climático, es urgente prevenir problemas de conservación irreversibles, como sucede en la cueva de Cosquer en Marsella (Francia), donde se han tomado medidas de emergencia para registrar el arte rupestre antes de que sea destruido por el aumento del nivel del mar.

El objetivo de este estudio es establecer parámetros mínimos para el control y monitoreo del estado de conservación de las cuevas. Para ello, hemos seleccionado una serie de cavidades donde implementamos un protocolo de monitoreo de los procesos que pueden afectar su conservación. Hemos medido parámetros ambientales como la humedad, el CO₂ y la temperatura, identificado procesos de génesis y evolución geomorfológica, documentado tridimensionalmente los soportes con arte rupestre y realizado mediciones colorimétricas de las imágenes. De esta manera, buscamos diseñar protocolos de protección específicos para cada cueva, garantizando una conservación más efectiva del arte rupestre y su evolución futura.

2. Materiales

Para conseguir medidas que garanticen la protección efectiva del arte rupestre paleolítico, hemos elegido un caso de estudio concreto, situado en la cordillera Cantábrica oriental (norte de España). Se trata de una zona con una treintena de cuevas decoradas (Gárate, 2018), y situada en una de las regiones clásicas para el estudio del arte rupestre paleolítico. En esta región se conocen algunos trabajos previos, en el ámbito del estudio centrado en la identificación de riesgos que amenazan la conservación de cuevas con arte rupestre (Hoyos, 1993; Sánchez et al., 2007; Iriarte et al., 2010; Álvarez et al., 2018; Cañaveras et al., 2022).

Para este estudio se han seleccionado seis cuevas con arte paleolítico en Gipuzkoa: Ekain, Altxerri y, dentro del complejo de las cuevas de Aitzbitarte, las cavidades de Aitzbitarte III, IV, V y IX (Figura 1). Cada una de ellas responde a unas particularidades muy concretas en cuanto a su geomorfología y dinámicas ambientales, por lo que son una muestra significativa para corroborar la validez de la metodología empleada.

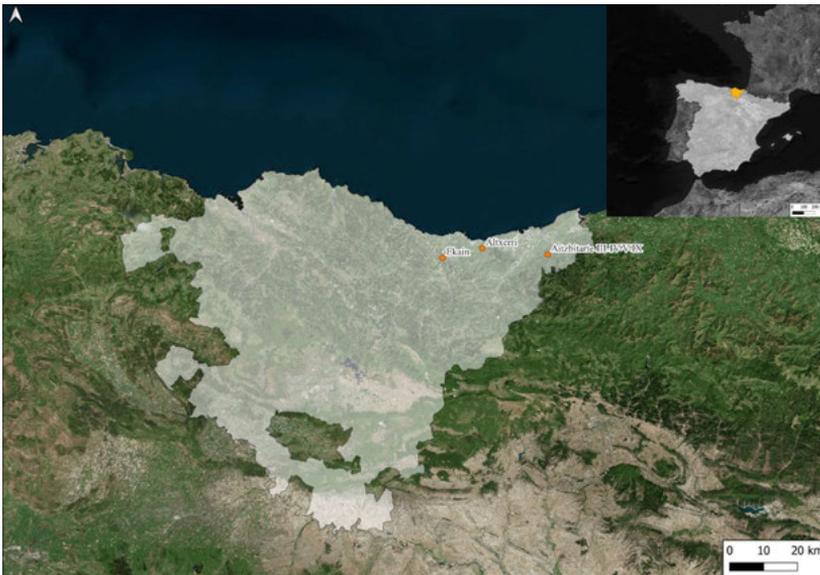


Figura 1. Mapa de situación de las cuevas estudiadas en este trabajo, sobre su situación en la Comunidad Autónoma del País Vasco y España (arriba a la derecha) (Mapa realizado con QGIS. Fuente: BingAerial, https://gadm.org/download_country.html and <http://www.euskalgeo.eus/es/node/157>)

3. Metodología

El diseño de un protocolo para el monitoreo básico del estado de conservación de cuevas decoradas requiere un enfoque multidisciplinar que permita integrar información de diversos campos para detectar procesos activos de alteración. Este monitoreo es selectivo y se centra en puntos específicos determinados por su fragilidad. El diagnóstico previo de cada caso estudiado nos permite establecer un punto de partida para su selección.

Por lo tanto, hemos diseñado un flujo de trabajo específico adaptado a cada una de las seis cavidades, como se describe a continuación:

3.1. Estudio geomorfológico

Los procesos que ocurren en la evolución de una cavidad se registran en unidades geomorfológicas y sedimentarias. Para estudiarlos, se deben identificar y ubicar morfologías características como hendiduras horizontales, estalactitas colgantes, canales en el techo, terrazas de cantos rodados alóctonos, horizontes estalagmíticos colgantes, entre otros. A través de ellos, es posible identificar los factores que influyeron en la formación de la cueva. Organizándolos estratigráficamente, podemos descifrar la evolución de las cuevas, incluyendo episodios de sedimentación y erosión (por ejemplo, Aranburu *et al.*, 2015; Ballesteros *et al.*, 2019). En este trabajo, se han determinado diferentes sectores a lo largo de las cuevas, identificando los diferentes elementos geomorfológicos y sedimentológicos en los planos topográficos y elevaciones. Los estudios se han realizado tanto a nivel macro (la totalidad de la cueva) como micro (los diferentes paneles con arte rupestre). Finalmente, se elaboró un mapa de los procesos activos (Figura 2). Para este fin, se utilizaron topografías 3D detalladas de las cuevas, donde se identificaron todos los procesos que están ocurriendo actualmente en cada parte de la cueva (goteos, formación de diferentes espeleotemas, erosión física y química, procesos inducidos por bacterias, etc.). Para tener un control total de los procesos que están ocurriendo actualmente en cada cueva, se realizó al menos un mapa en dos momentos diferentes, uno durante la temporada de aguas bajas y otro durante la temporada de lluvias. Para este propósito, se utilizó software gráfico (Illustrator® y Photoshop® de Adobe®). Posteriormente, mediante Sistemas de Información Geográfica (usando el software QGIS®), se transformaron en archivos vectoriales del tipo shapefile (.shp) y archivos ráster del tipo TIF (.tif).

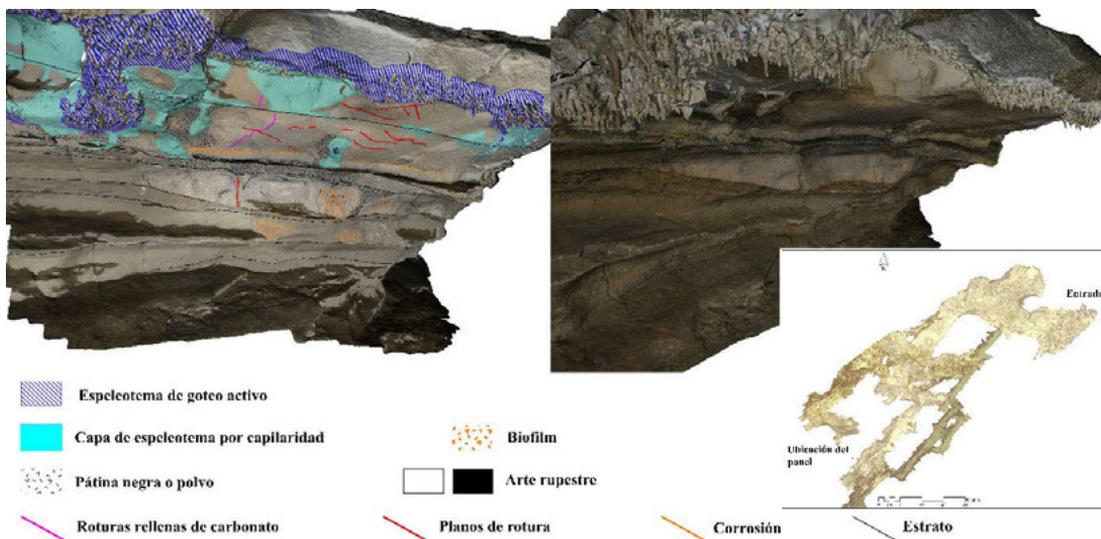


Figura 2. Mapa de procesos activos sobre un panel de arte rupestre de la cueva de Altxerri

Al mismo tiempo, se estudiaron detalladamente los soportes del arte rupestre con el fin de deducir los procesos y patologías que ocurren en los diferentes sitios y su influencia en el patrimonio artístico.

Con este fin, se realizaron varias fotogrametrías de los paneles decorados utilizando el programa Agisoft Photoscan®, donde se identificaron y localizaron los procesos tafonómicos identificados, tanto con el software Blender® como con Illustrator® y Photoshop® de Adobe® (trabajando en las texturas). Este proceso está inspirado en la elaboración de los trazados habituales para la documentación del arte rupestre y en el procesamiento de cartografías geológicas conocidas (Ferrier *et al.*, 2012; Lacanette *et al.*, 2013).

La replicabilidad en el tiempo de la misma documentación utilizando los mismos parámetros en cada ocasión permite la comparación de la evolución de los procesos tafonómicos previamente identificados o la emergencia de nuevas alteraciones. En este sentido, se pueden detectar el transporte de partículas y gases relacionados con la presencia de microorganismos y animales en cuevas cuya detección es menos perceptible (Audra *et al.*, 2016; Domínguez-Moñino *et al.*, 2021).

3.2. Estudio de parámetros ambientales

En las cuevas, la temperatura (T°), la humedad relativa (HR), el dióxido de carbono (CO_2) y otros gases, junto con las gotas de agua y la ventilación, tienen un impacto directo en la conservación del arte rupestre, debido a la corrosión o emanaciones de espeleotemas (Bourges *et al.*, 2014). Para evaluar estos parámetros, se instalaron dispositivos de medición HOBO U23 Pro v2 que registran la temperatura y la humedad relativa cada hora en el área donde se encuentra el arte rupestre, con el fin de monitorizar la evolución de estos parámetros ambientales durante la duración del proyecto (Figura 3). Además, se realizaron mediciones de CO_2 de manera ocasional en cada visita a la cueva (trimestralmente). La información obtenida se procesó utilizando el software estadístico R®.

3.3. Estudio colorimétrico de los pigmentos paleolíticos

El control colorimétrico es un aspecto importante en la conservación de las pinturas rupestres (Rogerio-Candelera, 2016; Carrión-Ruiz *et al.*, 2021). En este proyecto, la metodología utilizada para tomar fotografías dentro de las diferentes cavidades en estudio se basa en obtener imágenes colorimétricamente correctas que permitan identificar, sobre la base de variables cuantificables, posibles cambios en el estado de las pinturas. Para establecer una evolución temporal, es necesario replicar las imágenes en diferentes fases del año, cubriendo así un ciclo anual. Se realizaron un total de 4 visitas a cada una de las 6 cuevas a lo largo del año, con una periodicidad de 4 meses. La documentación fotográfica se realizó utilizando una cámara réflex Nikon® D850 de formato completo con una resolución de 45.4 megapíxeles y un objetivo Nikkor® AF-S Macro de 60 mm. Las fotografías fueron iluminadas con flash, dado el alto CRI (Índice de Reproducción Cromática) de este tipo de luz, utilizando el sistema de flash Kakas® Macro Twin Lite K-808 que consta de dos cabezales flexibles que proporcionan iluminación homogénea. Finalmente, se utilizó una escala de colores Colorchecker Nano® en cada fotografía para corregir el color de las imágenes digitales.



Figura 3. Medidor ambiental HOBO instalado en la galería decorada de Aitzbitarte III para la obtención de datos de humedad y temperatura

Se seleccionaron una serie de zonas de muestreo de varios paneles, prestando especial atención a áreas donde se identificaron procesos activos, problemas de conservación del soporte, afectaciones resultantes de procesos tafonómicos o partes afectadas por agentes biológicos como bacterias. Cada una de ellas tiene un registro fotográfico cuatrimestral (un total de 4) tomado desde el mismo punto y con los mismos parámetros de cámara e iluminación. El objetivo es obtener 4 imágenes con parámetros de disparo e iluminación idénticos en diferentes períodos estacionales, que permitan el muestreo colorimétrico siempre en el mismo punto, para establecer una evolución temporal de los valores colorimétricos e identificar posibles variaciones u oscilaciones (Figura 4).



Figura 4. Ejemplo de captura fotográfica para el control colorimétrico en la Cueva de Altzerri

3.4. Prevención del riesgo de arte rupestre

Monitoreando todos los procesos y elementos del pasado vistos en los pasos anteriores, se ha podido geolocalizar las patologías actualmente sufridas por el arte rupestre en cartografías 2D o 3D para comprender mejor su relación con las condiciones ambientales de cada área y proponer medidas de protección adecuadas para el futuro. Para interpretar esto, nos hemos basado en las condiciones ambientales futuras predichas por investigaciones recientes (Seneviratne *et al.*, 2006; Smith *et al.*, 2007), comparándolas con las del pasado y prediciendo dónde estaremos en el futuro.

4. Resultados

El arte rupestre de las cuevas de Altxerri, Ekain y Aitzbitarte III, IV, V y IX ha sido evaluado en términos de conservación, revelando la influencia derivada de los procesos antropogénicos y biológicos.

Las intervenciones humanas han tenido un impacto significativo, reflejado en los procesos de "urbanización" del acceso, en la aparición de grafitis, en las manchas de hollín y en rasguños que han dañado las pinturas y grabados.

Los procesos geológicos, especialmente la formación de espeleotemas -tanto fósiles como activos-, han tenido su efecto directo en la conservación de las pinturas y grabados, en algunos casos.

Asimismo, los procesos biológicos han afectado las superficies decoradas. La biocorrosión causada por el guano de murciélagos y la presencia de biofilms que disuelven el carbonato cálcico, formando arcillas finas, han deteriorado las paredes decoradas. La formación de espeleotemas y áreas de goteo también ha contribuido al deterioro de las pinturas.

En cuanto a la monitorización ambiental, se pretende continuar con el registro de los datos para obtener una dinámica ambiental más amplia que permita entender con mayores garantías el comportamiento del karst. Tanto en el caso de las cuevas de Aitzbitarte, como de Ekain y Altxerri, estamos ante unos sistemas que presentan unas condiciones extremas de humedad y fenómenos de activación hídrica bastante intensos en momentos del año con alta pluviosidad. En el caso de Ekain, se debería tratar de comprobar si las instalaciones antrópicas recientes (especialmente los cierres herméticos) tienen su efecto en la acentuación de estos procesos.

A pesar de estos factores adversos, las pinturas rupestres han mostrado una relativa estabilidad durante el año. Observaciones colorimétricas indican que, aunque hay variaciones a lo largo del año, como consecuencia de los procesos litoquímicos, las pinturas recuperan los valores de color iniciales, lo que supondría que estos procesos no están suponiendo a priori un mayor deterioro a las mismas, aunque es necesario mantener el seguimiento en el tiempo para corroborar esta afirmación.

5. Conclusiones

El seguimiento de los parámetros ambientales y procesos a los que están sujetos las cavidades

decoradas se muestra imprescindible tanto para aquellas que están abiertas al público como para las que no.

Además, es fundamental emplear una documentación gráfica de alta calidad para monitorear el estado de las obras de arte. Técnicas como la fotografía, la fotogrametría y el escaneo 3D no solo permiten una documentación detallada del estado actual del arte rupestre, sino que también facilitan la identificación temprana de posibles deterioros mediante el seguimiento continuado y la comparación de estas. La detección de procesos perjudiciales en momentos iniciales es esencial para implementar medidas preventivas de manera oportuna, evitando daños irreversibles y asegurando la preservación de estas manifestaciones culturales a lo largo del tiempo.

Finalmente, como queda reflejado en este trabajo, la conservación del arte rupestre debe abordarse de manera pluridisciplinar. Es imprescindible el intercambio constante de información entre diversos campos de estudio, como la geología, la química, la biología y la arqueología, para desarrollar estrategias de conservación más efectivas y sostenibles a largo plazo. Esta colaboración no solo enriquecerá nuestro conocimiento sobre los factores que influyen en la preservación del arte rupestre, sino que también permitirá diseñar y aplicar intervenciones más integrales y adaptadas a las necesidades específicas de cada caso.

Referencias

- Álvarez, I., Bodego, A., Aranburu, A., Arriolabengoa, M., del Val, M., Iriarte, E., Abendaño, V., Calvo, J. I., Garate, D., Hermoso de Mendoza, A., Ibarra, F., Legarrea, J., Tapia, J., & Agirre Mauleon, J. (2018). Geological risk assessment for rock art protection in karstic caves (Alkerdi Caves, Navarre, Spain). *Journal of Cultural Heritage*, 33, 170-180.
- Aranburu, A., Arriolabengoa, M., Iriarte, E., Giralt, S., Yusta, I., Martínez-Pillado, V., del Val, M., Moreno, J., Jiménez-Sánchez, M. (2015). Karst landscape evolution in the littoral area of the Bay of Biscay (north Iberian Peninsula). *Quaternary International* 364, 217–230. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.09.025>
- Arriolabengoa, M., Intxaurbe, I., Medina-Alcaide, M. A., Rivero, O., Rios-Garaizar, J., Líbano, I., Bilbao, P., Aranburu, A., Cheng, H., Edwards, R. L., & Garate, D. (2020). From cave geomorphology to Palaeolithic human behaviour: Speleogenesis, palaeoenvironmental changes and archaeological insight in the Atxurra-Armiña cave (northern Iberian Peninsula). *Journal of Quaternary Science*, 35(6), 841-853.
- Audra, P., Barriquand, L., Bigot, J. Y., Cailhol, D., Caillaud, H., Vanara, N., Nobecourt, J.C., Madonia, G., Vattano, M. & Renda, M. (2016). L'impact méconnu des chauves-souris et du guano dans l'évolution morphologique tardive des cavernes. *Karstologia*, 68, 1-20.
- Ballesteros, D., Giralt, S., García-sansegundo, J., Jiménez-Sánchez, M. (2019). Geomorphology Quaternary regional evolution based on karst cave geomorphology in Picos de Europa (Atlantic Margin of the Iberian Peninsula). *Geomorphology*, 336, 133–151. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.002>
- Bourges, F., Genthon, P., Genty, D., Lorblanchet, M., Mauduit, E., & d'Hulst, D. (2014). Conservation of prehistoric caves and stability of their inner climate: Lessons from Chauvet and other French caves. *Science of the Total Environment*, 493, 79-91. Brunet, J., & Vouvé, J. (1996). *La conservation des grottes ornées*. Éditions CNRS, Ministère de la Culture, Paris.
- Cañaveras, J. C., Muñoz-Cervera, M. C., & Sánchez-Moral, S. (2022). Deterioration Processes on Prehistoric Rock Art Induced by Mining Activity (Arenaza Cave, N Spain). *Geosciences*, 12(309), <https://doi.org/10.3390/geosciences12080309>
- Carrión-Ruiz, B., Riutort-Mayol, G., Molada-Tebar, A., Lerma, J. L., & Villaverde, V. (2021). Color degradation mapping of rock art paintings using microfading spectrometry. *Journal of Cultural Heritage*, 47, 100-108.

- Coye, N. (Ed.) (2011). Lascaux and preservation issues in subterranean environments. Proceedings of the International Symposium. Paris, February 26 and 27, 2009. Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme, documents d'archéologie française, 105, Paris.
- Dominguez-Moñino, I., Jurado, V., Rogerio-Candelera, M. A., Hermosin, B., & Saiz-Jimenez, C. (2021). Airborne fungi in show caves from Southern Spain. *Applied Sciences*, 11(11), 5027.
- Dragovich, D. (1981). Cavern microclimates in relation to preservation of rock art. *Studies in Conservation* 26, 143-149.
- Ferrier, C., Debard, E., Kervazo, B., Aujoulat, N., Baffier, D., Denis, A., Feruglio, V., Fritz, C., Gély, B., Geneste, J. -M., Konik, S., Lacanette, D., Lastennet, R., Maksudi, F., Malaurent, Ph., Plassard, F., & Tosello, G. (2012). Approche taphonomique des parois des grottes ornées. In Clottes J. (dir.), *L'art pléistocène dans le monde / Pleistocene art of the world / Arte pleistoceno en el mundo*, Actes du Congrès IFRAO, Tarascon-sur-Ariège, septembre 2010, Symposium « Art pléistocène en Europe ». N° spécial de Préhistoire, Art et Sociétés, Bulletin de la Société Préhistorique Ariège-Pyrénées, LXV-LXVI, 2010-2011, Société Préhistorique Ariège-Pyrénées, Tarascon-Sur-Ariège, pp. 1071-1093.
- Genuite, K., Delannoy, J.J., Bahain, J.J., Gresse, M., Jailliet, S., Philippe, A., Pons-Branchu, E., Revil, A., Voinchet, P. (2021). Dating the landscape evolution around the Chauvet-Pont d'Arc cave. *Scientific Reports*, 11, 8944.
- Hoyos, M. (1993). Procesos oord.ióñion de soporte y pintura en diferentes cuevas con arte rupestre del norte de España: Santimamiñe, Arenaza, Altamira, y Llonín. In Fortea, Joord.ord.), *La Protección y conservación del arte rupestre paleolítico: Mesa Redonda Hispano-Francesa: Colombres, Asturias 2 al 6 de junio de 1991*, Gobierno del Principado de Asturias, Oviedo, pp. 51-74.
- Hoyos, M., Soler, V., Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S., & Sanz-Rubio, E. (1998). Microclimatic characterization of a karstic cave: human impact on microenvironmental parameters of a prehistoric rock art cave (Candamo Cave, northern Spain). *Environmental Geology* 33, 231-242.
- Iriarte, E., Sánchez, M. Á., Foyo, A., & Tomillo, C. (2010). Geological risk assessment for cultural heritage conservation in karstic caves. *Journal of Cultural Heritage*, 11(3), 250-258. Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., et al., 2013. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14, 563-578.
- Lacanette, D., Large, D., Ferrier, C., Aujoulat, N., Bastian, F., Denis, A., Jurado, V., Kervazo, B., Konik, S., Lastennet, R., Malaurent, P., & Saiz-Jimenez, C. (2013). A laboratory cave for the study of wall degradation in rock art caves: an implementation in the Vézère area. *Journal of Archaeological Science*, 40(2), 894-903.
- Leplat, J., Francois, A., Touron, S., Frouin, M., Portais, J.C., & Bousta, F. (2020). Aerobiological behavior of Paleolithic rock art sites in Dordogne (France): a comparative study in protected sites ranging from rock shelters to caves, with and without public access. *Aerobiologia* 36, 355-374.
- 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.
- Quindos, L. S., Bonet, A., Diaz-Caneja, N., Fernandez, P. L., Gutierrez, I., Solana, J. R., ... & Villar, E. (1987). Study of the environmental variables affecting the natural preservation of the Altamira Cave paintings located at Santillana del Mar, Spain. *Atmospheric Environment* (1967), 21(3), 551-560.
- Rogerio-Candelera, M. Á. (2016). Digital image analysis-based strategies for quantitative monitoring of rock art sites. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10, 864-870.
- Sánchez, M. A., Foyo, A., Tomillo, C., & Iriarte, E. (2007). Geological risk assessment of the area surrounding Altamira Cave: A proposed Natural Risk Index and Safety Factor for protection of prehistoric caves. *Engineering Geology*, 94(3-4), 180-200.
- Sánchez-Moral, S., Cuezva, S., García Antón, e., Fernández Cortés, A., Benavente, D., Cañaveras, J.C, Jurado, V., Rogerio, M.A., & Sáiz-Jiménez, C. (2014). Microclimatic monitoring in Altamira Cave: Two decades of scientific projects for its conservation. *The Conservation of subterranean Cultural Heritage* 18, 139-144.
- Seneviratne, s.I., Lüthi, d., Litschi, M., Schär, C., 2006. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature* 443, 205-209.
- Smith, D.M., Cusack, S., Colman, A.W., Folland, C.K., Harris, G.R., Murhpy J.M., 2007. Improved Surface

Garate Maidagan, Diego *et al.*, 2024. Control del estado de conservación de las cuevas con arte paleolítico: una propuesta para su monitorización

Temperature Prediction for the coming decade from a Global Climate Model. *Science*, 317, 796-799.
White, W.B. (2007). Cave sediments and paleoclimate. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69. 76-93.

Construyendo un futuro sostenible: evaluación de amenazas y propuestas de conservación

Reshef Schwarz, G.

Reserva Natural Cueva de Estalactitas, Am Ve Olamo 3 (Jerusalem, Israel)
gabrielar@npa.org.il

Resumen

La Reserva Natural Cueva de Estalactitas (Soreq), un tesoro geológico de Israel, es un ecosistema subterráneo protegido, ubicado en el corazón de la reserva natural. Esta cueva, la única de su tipo abierta al turismo, ofrece a los visitantes una visión impresionante de formaciones geológicas que se han desarrollado a lo largo de millones de años. Este estudio evalúa las amenazas que afectan la conservación de la cueva y propone estrategias sostenibles para garantizar una armonía entre la protección del ecosistema subterráneo y la experiencia turística. Se utilizó una metodología integral que combinó diferentes enfoques para obtener una clasificación exhaustiva de los riesgos que enfrenta la cavidad. Se realizó una extensa revisión de la literatura científica sobre conservación de cuevas, con énfasis en estudios previos realizados en la Cueva Soreq. Además, se llevó a cabo una evaluación detallada del impacto ambiental causado por la gran afluencia de visitantes en diferentes periodos. Se analizaron los efectos de la infraestructura instalada en la cavidad, tales como la iluminación artificial, los caminos pavimentados, y la variación de parámetros como temperatura, humedad y CO₂. Asimismo, se realizaron observaciones de campo para examinar el impacto de las vibraciones ocasionadas por las canteras vecinas en la estabilidad de las formaciones geológicas. El impacto del exceso de turistas en el microclima de la cueva, la falta de conciencia ambiental de los visitantes y las vibraciones provocadas por voladuras fueron identificados como los principales problemas a resolver. Entre las soluciones propuestas se incluyen la regulación del número de visitas, la implementación de un sistema de reservas, la creación de un programa educativo para los visitantes y la renovación del sistema de monitoreo climático continuo dentro de la cueva. También se sugiere la continuidad de la investigación científica.

Palabras clave: amenazas, conservación, estrategias, impacto, vibraciones, visitantes.

Abstract

The Stalactite Cave Nature Reserve (Soreq), Israel's geological treasure, is a protected underground ecosystem located in the heart of the nature reserve. This cave, the only one of its kind open to tourism, offers visitors an impressive view of geological formations developed over millions of years. This study evaluates the existing threats to the conservation of the cave and proposes sustainable strategies to ensure harmony between the protection of the underground ecosystem and the visitor experience. A comprehensive methodology was used that combined different approaches to obtain a complete classification of the risks facing the cavity. An extensive review of the scientific literature on cave conservation was carried out, with emphasis on previous studies carried out in Soreq Cave. A comprehensive assessment of the environmental impact caused by the large influx of visitors during different periods was also carried out. The effects caused by the infrastructure installed in the cavity were analyzed, such as artificial lighting, paved roads and the variation of parameters such as temperature, humidity, and CO₂. Field observations were carried out to analyze the impact of vibrations caused by the work of neighboring quarries on the stability of geological formations. The impact of the excess number of visitors on the microclimate of the cave, their lack of environmental awareness, and vibrations from blasting were identified as the main problems to be solved. As possible solutions, it was proposed to regulate the number of visits, implement a reservation system, create an education program for visitors, and renew the continuous climate monitoring system inside the cave. It was also proposed to continue with scientific research.

Keywords: conservation, impact, strategies, threats, vibrations, visitors.

Introducción

En el año 1977, nueve años después de su descubrimiento en el año 1968, la Cueva Soreq fue abierta al turismo bajo la gestión de la Autoridad de Reservas Naturales y Parques Nacionales de Israel, organización gubernamental responsable de la administración de la cavidad. Su gestión abarca múltiples aspectos, desde la preservación activa del hábitat natural hasta el riguroso monitoreo de las condiciones ambientales de la cueva. Un componente esencial de su labor es la evaluación meticulosa de cada propuesta de desarrollo turístico, asegurando que cualquier iniciativa sea compatible con los objetivos de conservación a largo plazo.

En el año 1975, la cueva fue declarada reserva natural (Figura 1a), y las canteras abandonadas circundantes fueron incluidas en una segunda etapa en el año 1995 (Figura 1b), brindando así protección legal a todo el terreno. Estas leyes y regulaciones prohíben y penalizan acciones perjudiciales, permitiendo a la administración de la cueva imponer sanciones a quienes dañen, intencionalmente o no, la cavidad y sus formaciones..



Figura 1. a. Área de la Cueva Soreq declarada reserva natural en el año 1975; b. área de las canteras abandonadas, después del descubrimiento de la cueva, declarada reserva natural en el año 1995 (ANP)

Amenazas detectadas

Las causas de riesgo identificadas en este estudio abarcan una amplia gama de factores, desde el impacto directo del turismo hasta los efectos a largo plazo de factores ambientales. Es importante destacar que estas amenazas no operan de forma aislada, sino que pueden interactuar y amplificarse entre sí, creando un panorama complejo de peligros para la cueva. Es necesario que las cavidades ya descubiertas sean respetadas, sometidas a un proceso

de limpieza y restauración, y, sobre todo, se lleven a cabo acciones de mantenimiento y conservación no aumentar el deterioro (Herráez, 1996)

El ingreso no controlado de visitantes a una cavidad subterránea es uno de los principales factores que amenazan su conservación, generando una serie de impactos ambientales negativos. Cada visita introduce energía externa que desencadena alteraciones tanto biológicas como climáticas en el ecosistema subterráneo, por lo que es esencial limitar el número de visitantes (Mayoral, 2008).

Entre los efectos más destacados se encuentra la alteración del microclima, provocada por la constante circulación de personas, lo que desestabiliza las condiciones naturales y afecta a la temperatura, la humedad y los niveles de CO₂. La visita de los turistas implica el ingreso a un medio estable, frágil y vulnerable, de un número relativamente importante de personas durante un cierto intervalo de tiempo. Esta intervención implica el riesgo de contaminación térmica, química y biológica (Molerio, y Condis Fernández 2020)

Además, el daño físico a los espeleotemas, ya sea por rotura, robo, erosión o simple contacto, es una consecuencia directa del tráfico constante de visitantes, quienes, intencionalmente o no, provocan el deterioro de estas estructuras de gran valor geológico, cuya recuperación podría tomar, en el mejor de los casos, cientos o incluso miles de años. (White, 1988)

La falta de conciencia ambiental entre los visitantes agrava la situación. La irresponsabilidad al desechar incorrectamente los residuos, como restos orgánicos, colillas de cigarrillos, latas de refresco, plásticos y otros envases, contamina y degrada los frágiles ecosistemas subterráneos (Berrocal Pérez, 2014). Esto pone en peligro especies únicas y altera procesos geológicos que han tardado millones de años en formarse, convirtiéndose en un patrimonio irrecuperable.

El turismo también contribuye a la introducción de especies invasoras en los ecosistemas de las cuevas. La importación de especies es común, lo que provoca alteraciones del equilibrio y del ciclo biogeoquímico subterráneo (Molerio y Condis Fernández, 2020). Los visitantes, sin darse cuenta, pueden transportar organismos como plantas o insectos que no son nativos de estos entornos, los cuales pueden competir con las especies autóctonas por recursos y hábitats.

A su vez, infraestructuras creadas para la comodidad y seguridad de los visitantes, como caminos de cemento, escaleras, plataformas de observación, sistemas de ventilación y otros trabajos de mantenimiento, introducen alteraciones adicionales que interfieren y dañan el equilibrio natural de la cavidad. La iluminación artificial, favorece el crecimiento de flora no deseada, conocida como "*lampen flora*", este fenómeno no se presenta en cuevas no turísticas cerradas, ya que carecen de la luz adecuada para permitir la fotosíntesis (Slagmolen, 1993). La batalla continua contra este "mal verde" es una de las principales ocupaciones y preocupaciones de la gestión sostenible de las cuevas, ya que su presencia puede causar daños irreversibles en el entorno natural.

Amenazas externas

La minería representa una amenaza significativa para la conservación de los sistemas kársticos. La extracción de recursos minerales genera una amplia gama de impactos negativos, como la pérdida de geoformas superficiales, la destrucción del epikarst y la alteración de los flujos subterráneos. Estas modificaciones subrayan la importancia de evaluar exhaustivamente los impactos potenciales de los proyectos mineros en estos sensibles ecosistemas. Las exploraciones mineras, las canteras a cielo abierto y las vibraciones producidas por las voladuras incrementan significativamente el riesgo de colapso de las formaciones kársticas, comprometiendo su integridad estructural.

El desarrollo urbano en las áreas circundantes también influye negativamente, particularmente a través de la alteración en la infiltración de agua, un factor clave en el mantenimiento del balance hídrico de la cavidad. La presión sobre los recursos naturales debido a la expansión urbana contribuye a una pérdida significativa de biodiversidad en el mundo subterráneo.

A largo plazo, los factores ambientales como el cambio climático y el aumento de la temperatura exterior plantean riesgos adicionales. Estos cambios afectan los patrones de precipitación y pueden reducir el flujo de agua hacia la cavidad, comprometiendo su capacidad para mantener el equilibrio natural de humedad y temperatura. Además, los sismos y el ingreso de aire seco debido a la apertura de puertas de acceso generan un desequilibrio climático interno.

La creciente popularidad de las cuevas como destinos turísticos ha generado una tensión significativa en los frágiles ecosistemas kársticos. Este fenómeno ha suscitado inquietudes a nivel mundial sobre la necesidad de implementar estrategias efectivas para la administración y protección de estos valiosos geo ecosistemas (Watson, 1997; Gillieson, 2022)

Del diagnóstico a la acción: un plan de conservación

Desde que se habilitó para el turismo, la cueva Soreq ha sido objeto de un intenso flujo turístico que ha influido significativamente en su hábitat. Los primeros registros de visitantes muestran una afluencia inicial considerable, con picos que superaron los 365,000 visitantes anuales en sus primeros años de operación, estabilizándose al cabo de los años en torno a los 200,000 visitantes por año (Figura 2). En el momento del descubrimiento de la cueva en 1968, la concentración de CO₂ en el interior de la cavidad era de 700 ppm, el doble del valor en el exterior en esa época (350 ppm) y la temperatura promedio anual de 20.5 grados centígrados (Bar-Matthews-Ayalon, 1989).

Se han observado incrementos en la temperatura (Figura 3) interna, reducciones en la humedad relativa y elevaciones en los niveles de CO₂ en el aire, al cabo de los años, especialmente durante los períodos de mayor actividad turística (Figura 4).

Hasta el año 2019, un sistema avanzado de monitorización registraba temperatura, humedad y niveles de CO₂ cada 60 minutos mediante una red de 8 sensores estratégicamente distribuidos en la cueva. Aunque este sistema ya no está operativo, actualmente se realiza un seguimiento

manual del nivel de CO₂ dos veces al día: antes de la primera visita y después del cierre. Los datos recopilados muestran que, generalmente, los niveles de CO₂ aumentan durante el día con el ingreso de visitantes, disminuyendo durante la noche, la capacidad de renovación de aire de la cueva ha demostrado ser suficiente para contrarrestar completamente las variaciones. (Figura 5).

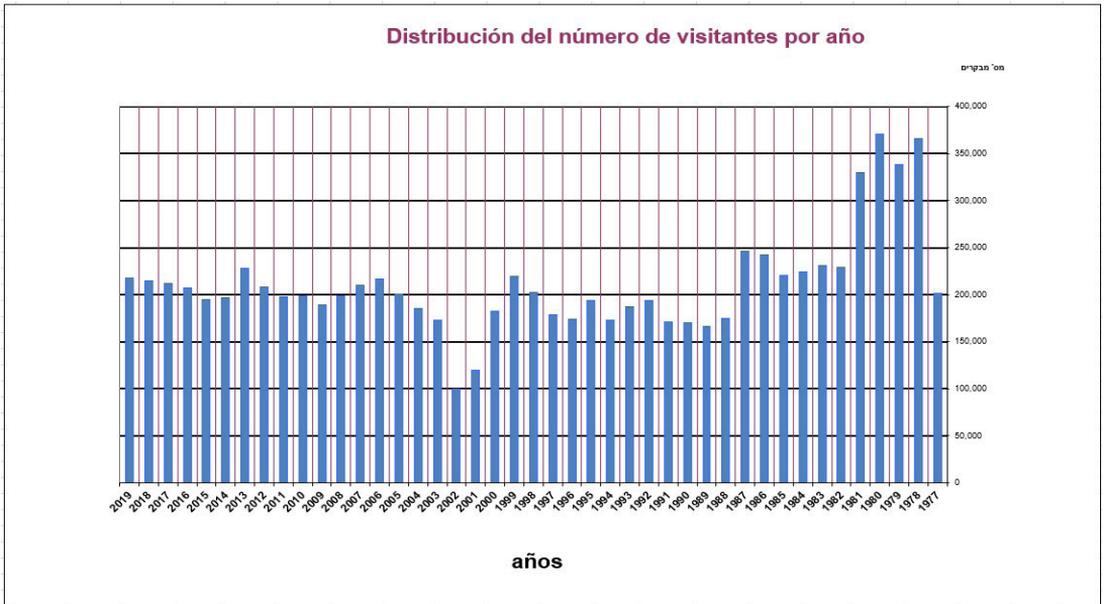


Figura 2. Número de visitantes desde la apertura hasta 2019 (Avi Lichak)

Sin embargo, durante los meses de invierno (noviembre a abril) se observa un aumento significativo en comparación con el verano. Este fenómeno podría atribuirse a varios factores interrelacionados: en invierno, la menor diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la cueva reduce la circulación natural de aire, lo que limita la ventilación y favorece la acumulación de CO₂. La descomposición de materia orgánica (Durán *et al.*, 2020) y la actividad biológica continua en el suelo de la cueva contribuyen a la liberación de CO₂. Además, las variaciones en los patrones de visita durante la temporada invernal, y los cambios en la hidrología, podrían influir son los motivos que podrían influir en la liberación de CO₂ del suelo.

Actividad biológica

Entre el mes de agosto del año 2018 y septiembre del año 2021 se realizaron muestreos para evaluar la composición de especies de arácnidos y el impacto ecológico de la apertura de la cueva Soreq al público en este delicado ecosistema. Se documentaron todas las especies de arácnidos y otros artrópodos observados.

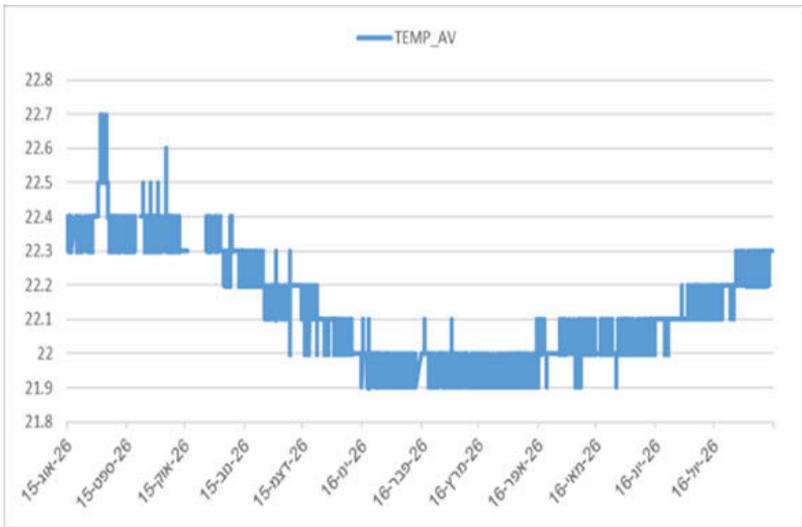


Figura 3. Evolución de la temperatura interior de la cueva (en °C) (Dr.I.Malihi)

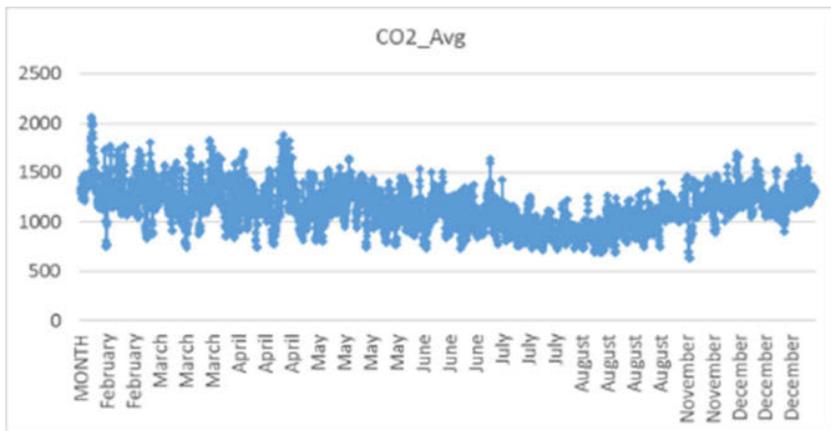


Figura 4. Evolución de CO₂ durante los meses de invierno y verano, donde se ve el aumento de la concentración de CO₂ en invierno (Dr.I.Malihi)

La identificación taxonómica se realizó en el laboratorio de la Colección Nacional de Arácnidos de la Universidad Hebrea de Jerusalén.

Se registraron una diversidad de arácnidos y otros artrópodos, incluyendo especies endémicas como una nueva especie de *Tegenaria* sin ojos (Figura 6). La familia *Nesticidae* fue la más abundante. Sin embargo, se observaron signos de perturbación ecológica, como la presencia de raíces de árboles y pequeños mamíferos, lo que sugiere una invasión de organismos externos.

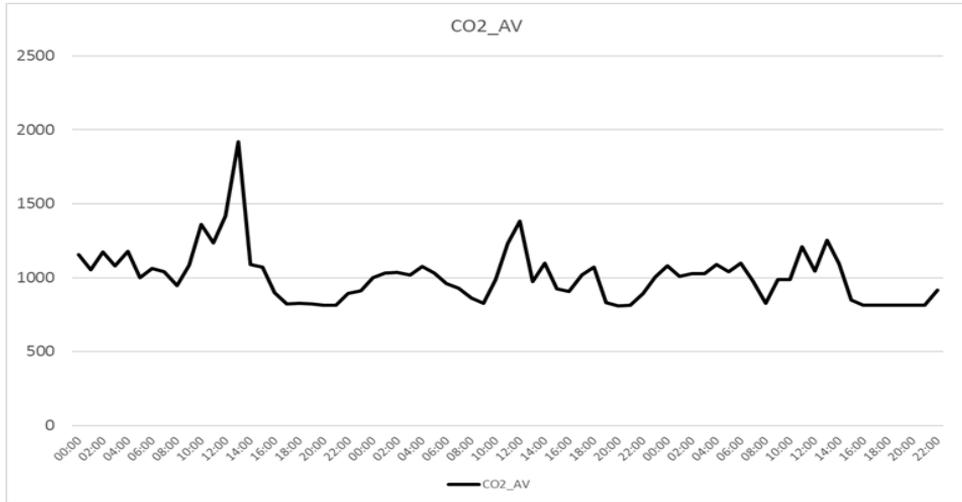


Figura 5. Variación de la concentración de CO₂ en 24 horas (Dr. I. Malihi)



Figura 6. *Tegenaria sin ojos* (Aharon y Gavish-Regev)

La apertura de la cueva al público ha generado cambios en el ecosistema subterráneo de Soreq. La introducción de especies exógenas y la alteración física del hábitat podrían estar afectando a las comunidades de arácnidos endémicas. La nueva especie de *Tegenaria* sin ojos encontrada en la cavidad resalta la importancia de la cueva como un refugio para especies únicas. (Gavish-Reguev, 2021)

Medidas para preservar el ambiente natural de la cueva

Hasta antes de su descubrimiento, la cueva estuvo protegida durante toda su existencia por el sistema rocoso que la envolvía. Con el objetivo de mantener su estado lo más cercano posible al que tenía antes de ser descubierta, se implementaron medidas estructurales específicas para preservar su ambiente natural.

Para mitigar la entrada de aire seco y evitar la pérdida de humedad dentro de la cueva, se

instalaron puertas dobles tanto en la entrada como en la salida, creando una barrera efectiva que protege y estabiliza el microclima interno.



Figura 7. a. Puerta de acceso; b. salida de la cueva (Fotos APN)

La puerta de acceso actúa como una eficaz barrera térmica, estableciendo una diferencia significativa en las condiciones ambientales. Entre la sala de proyección y el interior de la cueva, se registra una disminución de temperatura de 5,7 °C y un aumento de humedad relativa del 20,8%. Además, el edificio que alberga la recepción y las oficinas desempeña un papel crucial en el aislamiento de la cueva frente a las variaciones climáticas externas. Esta estructura reduce la insolación directa sobre el afloramiento rocoso occidental y, en consecuencia, filtra la transmisión de la onda térmica exterior hacia el entorno cavernario (Fernández Cortés, 2023). (Figura 7).

Daño físico a las formaciones intencionales o no intencionales por parte de visitantes

El incremento del turismo en la cueva ha suscitado preocupación por el daño físico que estas visitas ocasionan a estas delicadas estructuras. (Figura 8).

El contacto directo de los visitantes con los espeleotemas, ya sea por roce, golpes, apoyo, o al salirse de los senderos ha ocasionado fracturas, desprendimientos y alteraciones en su desarrollo natural. La contaminación por polvo, suciedad y aceites corporales introducidos por los turistas ha manchado y deteriorado la superficie de algunas formaciones alterando su apariencia natural.

La presencia de un guía experto es fundamental para la preservación del ecosistema y la seguridad de los visitantes. Los guías proporcionan instrucciones detalladas sobre el comportamiento adecuado dentro de la cueva. Esto incluye aspectos como no tocar las formaciones, no usar flash, mantener un nivel de ruido bajo, no introducir alimentos o bebidas, no fumar, no arrojar basura, o lanzar monedas y seguir las rutas designadas. A pesar de la valiosa labor de los encargados, la responsabilidad individual de los visitantes también juega un papel crucial en la preservación de la cavidad.



Figura 8. a. Espeleotemas dañado por el contacto de las manos de los visitantes; b. Trozo de estalactita rota por vandalismo. (Foto I. Abecassis)

Aun después de recibir instrucciones detalladas, algunos visitantes no siempre las respetan, poniendo en riesgo el entorno y la seguridad de los demás (Figura 9). En casos de comportamiento irresponsable grave, la aplicación de sanciones, respaldadas por la ley envía un mensaje claro de que tales acciones no serán toleradas.



Figura 9. a y b. Residuos arrojados por los visitantes durante las visitas (Foto I. Abecassis)

Infraestructura

La instalación de infraestructuras, como la construcción de un sendero turístico, ha perturbado significativamente el ambiente natural de la cavidad, implicando la pérdida irreversible de espeleotemas y otras formaciones geológicas únicas. Durante la preparación de la cueva para su exhibición, se procedió a cortar permanentemente algunas formaciones, además de ensanchar las aberturas naturales, alterando así su aspecto original. Este hecho subraya la necesidad imperiosa de llevar a cabo evaluaciones de impacto ambiental exhaustivas antes de cualquier intervención en ecosistemas subterráneos.

En un esfuerzo por atenuar el impacto lumínico sobre las formaciones y la proliferación de lampen flora, se implementó en el año 2020 un sistema de iluminación LED de alto rendimiento y bajo costo. La luz ámbar, con su espectro reducido, busco limitar el crecimiento futuro de estos organismos fotosintéticos. Esta innovación tecnológica represento un paso adelante en la gestión sostenible de la cueva, ya que ha demostrado ser altamente efectiva en la reducción del mal verde (Kaplan, 2022).

La instalación de una red Wi-Fi a principios del año 2023 mejoró la comunicación y la seguridad de visitantes y guías, garantizando una respuesta rápida y efectiva ante cualquier necesidad estando permanentemente en contacto con el mundo exterior. La red fue instalada cuidadosamente en el sendero de cemento, protegiendo el suelo de la cueva y asegurando que la infraestructura tuviera el menor impacto posible en el entorno. (Figura 10).



Figura 10. Área de cobertura y centralización de ruta de Comunicación (M.D Soluciones en Comunicación)



Figura 11. Router inalámbrico instalado debajo del sendero de cemento dentro de la cueva. (Foto O. Gabai)

Este sistema digital sentó las bases para un proyecto de monitorización climática que se

instalara en la cueva en un futuro cercano, en colaboración con profesionales españoles. La infraestructura está lista para conectar sensores que recopilarán datos sobre temperatura, humedad, CO₂ y otros parámetros ambientales, proporcionando a los investigadores una ventana sin precedentes al microclima de la cueva. (Figura 11).

Efectos causados por voladuras de canteras vecinas activas

En el año 1978, se inició un estudio sobre los efectos de los trabajos de la cantera vecina a la cueva Soreq. El Instituto de Investigaciones del Petróleo y Geofísica realizó mediciones de impacto durante explosiones experimentales controladas en diferentes niveles. Se llevaron a cabo inspecciones visuales de la cueva, incluyendo la evaluación de grietas por expertos en geología y física de rocas. El estudio reveló potenciales efectos perjudiciales de las explosiones de cantera en la cueva. Se observaron grietas que fueron causadas por factores externos y no por procesos naturales, (Rakes, 1978). Como resultado, se propuso un sistema de alerta que incluiría un sismógrafo, un mecanismo para medir el desplazamiento de las grietas (Figura 12) y un monitoreo de caída de estalactitas en zonas sensibles. Se sugirió realizar experimentos de laboratorio con estalactitas y estalagmitas para determinar su resistencia a los impactos. (Mostos, 1978).

También se consideró el efecto acumulativo de las explosiones, estimando alrededor de 1500 explosiones adicionales en los siguientes 15 años. Estos hallazgos llevaron a cuestionar los límites de seguridad previamente establecidos: explosiones a mínimo 300 metros de la cueva y a enfatizar la necesidad de realizar más investigaciones antes de continuar con las actividades de extracción cerca de la cueva.



Figura 12. a. Mecanismo para medir desplazamiento de grietas; b. Grieta visible en varios sectores de la cueva (Foto. O. Gabai APN)

Dado el historial de la cueva, estrechamente ligado a la actividad minera, es altamente probable que los daños más significativos causados por las explosiones ya se hayan producido. El descubrimiento del sistema kárstico, en el seno de una cantera y su coexistencia prolongada con labores mineras, sin regulaciones específicas para protegerla de las vibraciones, sugieren que la cueva ha estado expuesta a un estrés estructural considerable en el pasado.

Anticipándose a posibles daños futuros, la gestión actual de la cueva encargó un análisis especializado para determinar la susceptibilidad de la cavidad a las vibraciones y establecer protocolos de seguridad. Para ello, se instalaron sismógrafos en puntos estratégicos de la cueva, los cuales registraron las vibraciones generadas por diferentes actividades, como el funcionamiento de maquinaria pesada a ser utilizada en la construcción del nuevo aparcamiento de la cueva y explosiones de cantera controladas. Los datos obtenidos permitieron evaluar la respuesta de las formaciones geológicas a las distintas fuentes de vibración y establecer umbrales de seguridad. La prohibición de trabajos con maquinaria pesada a menos de 25 metros de la cueva es una medida prudente basada en los datos disponibles (Ben David, Coddington, Palcham, 2021).

Conclusiones

El análisis de la Cueva Soreq evidencia los retos de preservación en sistemas kársticos expuestos a actividad turística intensa. Los registros indican modificaciones en el microclima subterráneo, con variaciones en niveles de CO₂, temperatura y humedad relativa, que se corresponden con los patrones de visitas. Se documentaron deterioros en las formaciones atribuibles a la interacción directa con visitantes. Las estrategias de conservación aplicadas comprenden el control de número de visitantes, sistemas de iluminación LED de espectro reducido y vigilancia ambiental constante. Estudios sismográficos han permitido definir límites provisionales para las vibraciones procedentes de explotaciones mineras cercanas y posibles obras de ampliación a realizarse en los alrededores de la cueva. La conservación de los ecosistemas kársticos, amenazados principalmente por la actividad humana, requiere un enfoque integral que combine la investigación científica, la educación ambiental y la implementación de medidas de gestión efectivas.

Agradecimientos

Autoridad de Reservas Naturales y Parques Nacionales Distrito Central. Dr. Iariv Malihi Ecólogo APN por su constante apoyo y trabajo en conjunto. Dr. Ram Ben-David Geólogo, Oddie Coddington Geólogo, ACTE Asociación de Cuevas Turísticas españolas, Dr. Ilan Abecassis y a todo el personal de la Cueva Soreq de Estalactitas por su intenso trabajo y dedicación en el cuidado y conservación de la cueva.

Referencias

Andreo, B., & Durán, J. J. (2004). Investigaciones de sistemas kársticos españoles. Instituto Geológico y Minero de España.

- Bar-Matthews, M., Ayalon, A., & Matthews, A. (1989). Estudios mineralógicos y petrográficos de los sedimentos de la cueva Soreq (informe reducido). Instituto Geológico de Israel. (Informe no publicado en hebreo)
- Durán Valsero, J. J., Pages Rodríguez, R., & Jordá Bordehore, L. (2021). Informe construcción nuevo aparcamiento y accesos a la cueva de estalactitas de Israel. ACTE Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. (Informe no publicado)
- Efraim, L. (1978). Informe sobre medición de vibraciones cueva Soreq-Abshalom. Administración de Tierras de Israel. (Informe no publicado; traducción del hebreo)
- Fernández Cortés, A., & Ros, A. (2023, julio 19-20). Project: Microclimate monitoring of Stalactite cave (Soreq, Israel). Primera campaña de trabajo de campo. (Informe no publicado)
- Gillieson, D., Gunn, J., Auler, S., & Bolger, T. (n.d.). Guidelines for cave and karst protection (2ª ed.). International Union of Speleology & Gland, Switzerland: IUCN.
- Kaplan, A. (2022). Proliferación de cianobacteria en cuevas y monumentos históricos.
- Molerio, L. F. (2002). Conflictos ambientales en cuevas turísticas y estrategias de solución. *Medio Ambiente y Desarrollo*, 12(23).
- Molerio, L. F. (2002). Calidad ambiental de cuevas turísticas. *Se Puede*, 8(26), 22-26.
- Molerio, L. F. (n.d.). Hacia una espeleología sostenible: El código del mínimo impacto. (Informe no publicado)
- Molerio León, L., & Condis Fernández, M. M. (2020). Conflictos ambientales en cuevas turísticas y estrategias de solución. 2. Exploración, turismo en cuevas, cuevas turísticas y medio ambiente subterráneo. *Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo*, 12(23). Recuperado de <https://cmad.ama.cu/index.php/cmاد/article/view/183>
- Palchan, D., Ben-David, R., Coddington, J., Aksinenko, T., Reshef Schwarz, G., & Kurzon, I. (n.d.). Safety distances from speleothem cave for construction: Soreq cave Israel. *Mediterranean Geosciences Union Congress* (27-30).
- White, W. B., & Walter, L. M. (1988). Tasa de crecimiento de estalactitas. *Nature*, 333(6173), 354-355.

Registro geológico de inundaciones en la cueva de El Pindal (Asturias, España) y su implicación en la conservación del arte rupestre

Lario Gómez, J.¹, Cuezva Robleño, S.², Fernández-Cortés, A.³, Martín-Pozas, T.³,
Duarte Matías, E.⁴, Rasilla Vives, M. de la⁴, González-Pumariega Solís, M.⁵,
Cañaveras Jiménez, J.C.⁶, Sánchez Moral, S.²

1. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Las Rozas, Madrid.
javier.lario@ccia.uned.es
2. Museo Nacional de Ciencias Naturales-CSIC, Madrid.
scuezva@csic.es; ssmilk@mncn.csic.es
3. Departamento de Biología y Geología, Universidad de Almería, Almería.
acortes@ual.es; tmp785@ual.es
4. Departamento de Historia, Universidad de Oviedo, Oviedo.
elduarma@gmail.com; mrasilla@uniovi.es
5. Consejería de Cultura del Principado de Asturias.
maria.glez-pumariegasolis@asturias.org
6. Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante, Alicante.
jc.canaveras@ua.es

Resumen

En octubre de 2019 una inundación afectó a la cueva de El Pindal, declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, introduciendo en la cavidad una cantidad considerable de sedimentos y residuos externos. El estudio de diversos depósitos detríticos de la cavidad indica que los procesos de inundación asociados a crecidas han sido recurrentes en la cavidad desde su formación y están asociados a dos procesos genéticos: los formados en condiciones freáticas asociados a procesos de paragénesis y los ligados a condiciones vadosas de la cavidad, ambos casos probablemente asociados a episodios de alta energía que han provocado inundaciones en la cueva. Además, las afluencias súbitas de sedimentos condicionan el funcionamiento hidrológico del sistema kárstico al cambiar la forma en que se comportan los conductos de circulación hídrica. En ocasiones pueden provocar variaciones importantes en los sistemas de drenaje de las cavidades y afectar significativamente a la conservación del patrimonio natural y cultural que albergan.

Palabras clave: conservación de arte rupestre, cueva de El Pindal, karst, paleoinundaciones, paragénesis.

Abstract

In October 2019, a flood affected Pindal Cave, a UNESCO World Heritage Site, depositing a significant amount of sediment and external debris in the cave. Studies of various detrital deposits within the cave indicate that flooding events have been recurrent since the cave's formation, linked to two genetic processes: formations created under phreatic conditions associated with paragenesis processes and those formed under vadose conditions. Both cases are likely connected to high-energy episodes that have caused flooding in the cave. Additionally, sudden sediment inflows affect the hydrological functioning of the karst system by altering the behaviour of water circulation conduits. These changes can sometimes cause significant variations in the cave drainage systems and have a substantial impact on the conservation of the natural and cultural heritage contained within the cave.

Keywords: karst, paleoflooding, paragenesis, Pindal cave, rock art conservation.

Introducción

La cueva de El 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 conjunto de arte en El Pindal incluye numerosas figuras pintadas y grabadas, 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 sencillos y signos complejos y un conjunto magdaleniense de pinturas rojas -bisontes, caballo, claviformes de tipo pirenaico 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, cinco días a la semana durante todo el año.

La cavidad se desarrolla en un macizo calcáreo (calizas de la Formación Barcaliente, Carbonífero) modelado en forma de rasa (terracea marina) 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 (cuarcitas de la Formación Barrios, Ordovícico) (Martín-Pozas et al., 2022).

La cueva del Pindal presenta un desarrollo lineal de 590 m, con una orientación general E-O en su sector turístico y ONO-ESE en la zona cerrada al público (sector oculto). La cota más elevada está en el extremo occidental (30 msnm) y la más baja en el sifón localizado en el sector más oriental, en la vertical del punto de entrada (6 msnm). Por su interior discurre un pequeño cauce sujeto a las precipitaciones estacionales que desaparece ocasionalmente en varios sumideros entre bloques situados en el sector turístico (Figura 1).

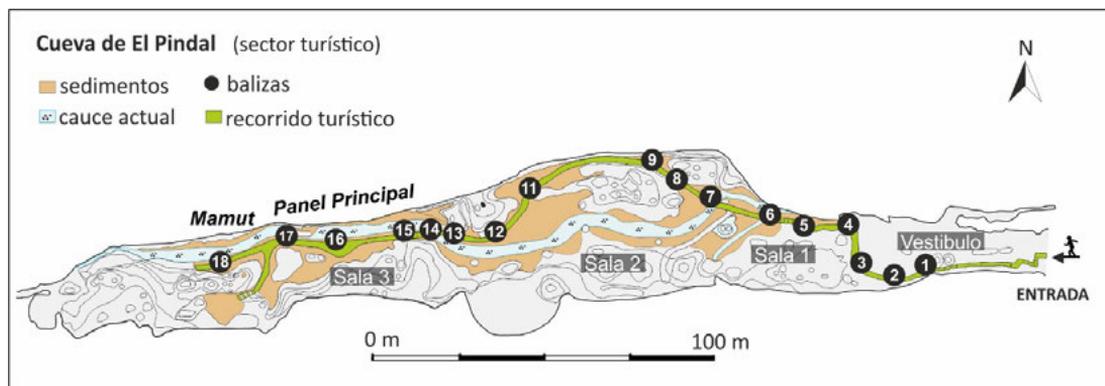


Figura 1. Planta del sector turístico de la cueva de El Pindal con indicación de las zonas citadas en texto

Los depósitos detríticos y formas asociadas de la cueva de El Pindal

Existen claras evidencias de niveles de sedimentos (gravas y arenas) depositados en diferentes

terrazas y socaves observables en las galerías de la cueva de El Pindal (Jiménez-Sánchez *et al.*, 2002, 2006). Si bien en estos trabajos se han observado hasta seis niveles de terrazas, las referencias a los mismos han sido tomadas desde el suelo de la cavidad. Para intentar correlacionar estos depósitos con otros elementos morfosedimentarios de la zona como terrazas marinas, rasas y socaves (Goy *et al.*, 2023), es necesario fijar la altitud absoluta de estos elementos en la cueva. Para ello se ha partido del hito feno situado a unos metros de la entrada de la cueva. A partir del mismo se ha utilizado un telémetro láser Leica Disto X4 para medir las alturas absolutas de las terrazas y socaves. Para registrar gráficamente estos elementos se han realizado fotografías en formato digital y un escaneado LiDAR con ipad pro con posterior procesado con software Polycam.

La paragénesis ha sido definida como la disolución ascendente del techo de una cueva en condiciones freáticas debido a la acumulación de sedimentos en el suelo subyacente (Renault, 1970; Farrant, 2004; Pasini, 2009). A medida que el techo se disuelve hacia arriba, se acumula más sedimento en el suelo para mantener el equilibrio entre la erosión, la deposición y la velocidad del agua. Audra y Palmer (2011) asocian los procesos de paragénesis a episodios de crecidas e inundación, con aguas muy agresivas químicamente, cargadas de sedimentos y abrasivas. Los socaves en las paredes de la cavidad pueden formarse a nivel del depósito sedimentario, bien en la zona vadosa como resultado de la aluviación (Audra y Palmer, 2011; Farrant y Smart, 2011), bien en la zona freática como un proceso de paragénesis (Audra y Palmer, 2011). En ambos casos, cuando el nivel freático desciende, los sedimentos son excavados por el cauce de la cueva (Figura 2). Varias de estas características formas y depósitos pueden ser descritas en la cueva de El Pindal. Dos de los sectores donde mejor se reconocen los diferentes niveles son la sala y pared asociada al panel principal de pinturas y al panel del mamut (Sala 3) y la galería de entrada a la cavidad (Vestíbulo).

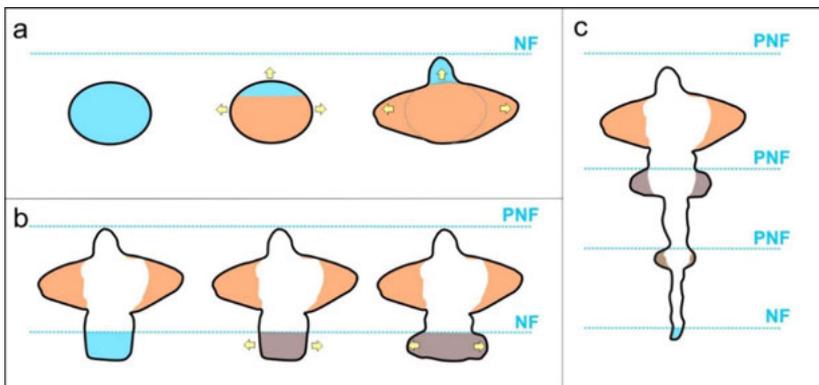


Figura 2. Esquema de la evolución de un conducto mostrando los efectos de la sedimentación en condiciones freáticas (a) y vadosas (b). Las flechas amarillas indican procesos de disolución en techo y paredes de los conductos por paragénesis. c) Sección final de un conducto con varias etapas de paragénesis en medio freático o vadosos con aporte de sedimentos. NF: nivel freático, PNF: paleonivel freático. Basado en Farrant y Smart (2011)

En el vestíbulo de la cavidad se puede observar un socave entre 26,10-26,70 msnm (S.1), previo al techo de la cavidad, aquí fijado en 27 msnm, aunque puede alcanzar algo más de altitud

dado que se han desarrollado cúpulas de disolución asociadas a procesos de paragénesis. Un nuevo socave aparece entre 23,50 y 24,20 msnm (S.2). El siguiente nivel (S.2/3) parece estar solamente representado por un fuerte techo erosivo a 23,20 msnm, parte de un socave de mayor entidad, presentando restos de un depósito de gravas y arenas en algunos sectores. Por debajo se observa un nuevo socave entre 20,85 y 21,50 msnm, con gravas y arenas asociadas al mismo (S.3) y una terraza erosiva a 19,3 msnm (S/T.4/5). Finalmente aparece un último socave entre 18,15 y 18,40 msnm (S.6). Por debajo de este, a unos 17,90 msnm parece reconocerse un posible nuevo socave (S.7?) (Figura 3).

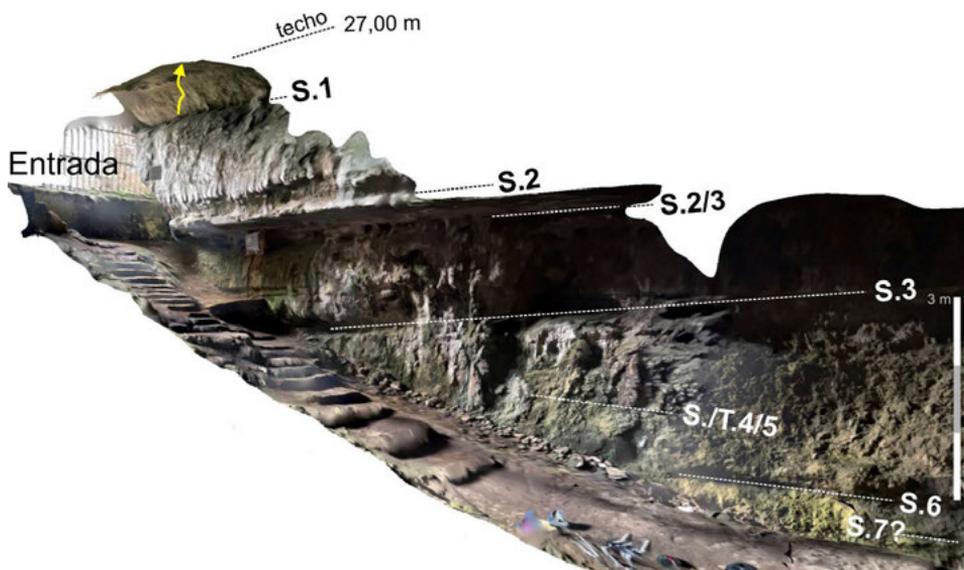


Figura 3. Imagen generada por escáner láser en el que se muestran los niveles de socaves (S) de la pared sur en el vestíbulo de la cueva de El Pindal. La flecha amarilla a techo marca canales de disolución ascendente por paragénesis. S/T hace referencia a un socave-terracea, dónde no se ha podido limitar el techo del socave

Por su parte, a escasos 3 m del panel del mamut (Sala 3) podemos distinguir los siguientes niveles (Figura 4): El nivel más alto corresponde a un socave (*notch*) a 25,80-26,00 msnm (S.1) sin poder reconocer un depósito asociado, aunque en algunas zonas se observan gravas adosadas al techo de la cavidad, en este sector entre 26,00 y 27,00 msnm, que pueden estar relacionadas con este socave. Asociado a este socave se localizan, también en el techo de la cavidad, predominantemente horizontal, cubetas de disolución inversa asociadas a procesos de paragénesis. Por debajo se localiza entre 25,15-25,75 msnm un socave con depósito de gravas con arenas y arcillas (S.2). El siguiente depósito de gravas y arcillas se localiza entre 20,50 y 21,40 msnm (S/T.4) y por debajo, a 21,60-22,30 msnm se reconoce un depósito detrítico arcilloso asociado a un socave (S/T.3). El siguiente nivel inferior corresponde a gravas, arenas y arcillas asociadas a una terraza erosiva a 20,00-20,40 msnm (S/T.5). Este nivel parece estar también relacionado con un nivel de inundación a 20,50 msnm que afecta al panel del mamut y que ha decolorado apreciablemente la mitad inferior del mismo. En algunos puntos de la galería principal se aprecia un microconglomerado asociado a este nivel. La secuencia que

continúa hasta el suelo de la sala corresponde con un socave entre 19,35-19,45 msnm (S/T.6), depósito de gravas cementadas asociadas a un socave a 19,20 msnm (S/T.7) y gravas, arenas, limos y arcillas ligadas al cauce actual a 18,40-19,00 msnm.

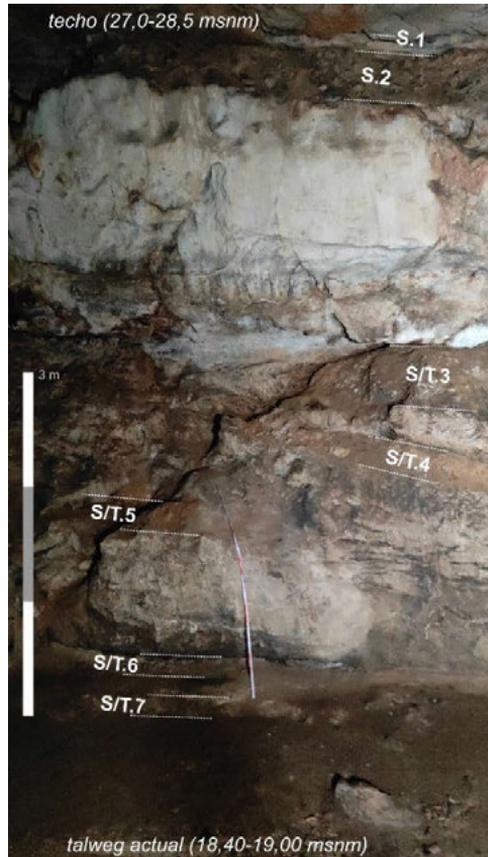


Figura 4. Niveles de socaves (S) de la pared norte, al lado del panel del mamut (Sala 3) de la cueva del Pindal. S/T hace referencia a un socave-terracea, donde no se ha podido limitar el techo del socave

En el sector sur de esta zona (Sala 3) se localiza un potente depósito detrítico en el que Jiménez-Sánchez *et al.* (2003) describen tres fases de entrada de sedimento a la cavidad, de difícil correlación con el resto de los depósitos de ésta. El techo de la fase 3 de este depósito (a 22,00 msnm) está formado por limos que presentan grietas de desecación, característica que hemos localizado también en limos a techo del nivel 21,60-22,30 msnm (S/T.3), con lo que tanto su altitud como por el sellado de limos a techo parece indicar que se trata del mismo nivel y que corresponde a una inundación en ambiente vadoso.

En las galerías inferiores, por debajo de la principal y hacia el meandro terminal, se ha localizado un socave con *scallops* (huellas de corriente) en las paredes y *pendants* en el techo, ambas

morfologías asociadas a paragénesis en condiciones freáticas, a 13,20-15,00 msnm, y una terraza con un potente depósito de gravas, arenas y arcillas de 1,20 m de espesor a 11,5 msnm (Figura 5). Por debajo este sector muestra un perfil en cañón resultado de un rápido encajamiento del nivel de base.

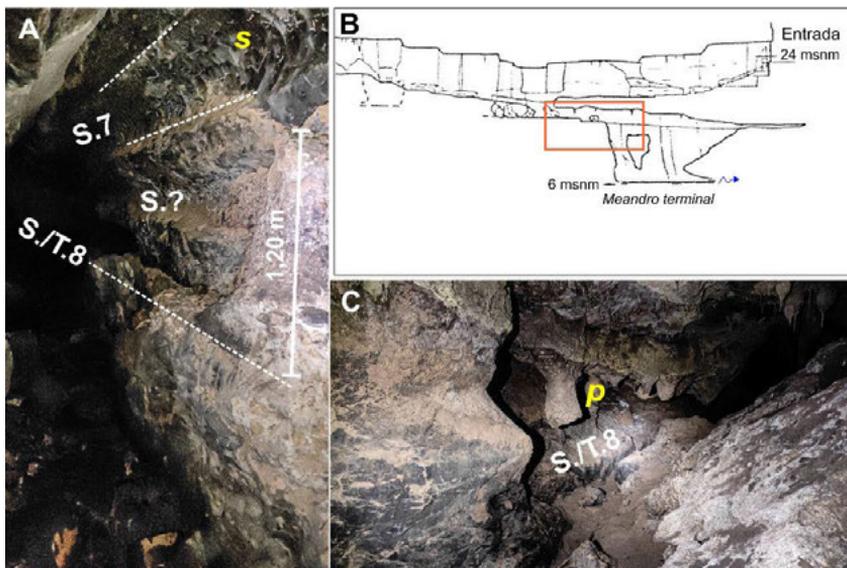


Figura 5. Niveles de socaves y terrazas en la conexión al meandro terminal. Presencia de scallops (s) y pendants (p), asociados a procesos de paragénesis en medio freático

El nivel del suelo en la puerta de entrada de la cavidad, como se ha comentado, está situado a 24 msnm, pero éste no parece ser el nivel de suelo de la galería principal, sino que parece corresponder a un colapso en la boca de la cueva, modificada actualmente por las obras de adecuación de la cavidad a las visitas. Hacia el exterior de la cavidad este colapso es más evidente y existe una rampa de bloques continua hasta el nivel del mar. En un afloramiento rocoso no colapsado se puede reconocer un tramo de galería circular con un depósito detrítico a 10,00 msnm y el techo de la galería a 12,40 msnm, mostrando que en algún momento la cavidad tenía más desarrollo y parte de las galerías principales han colapsado (Figura 6).

Un caso especial lo constituye el nivel S.5, solo observado desde el panel principal (Sala 3) hasta el inicio de la Sala 2, en la baliza 6 (Figura 1), sector donde se sitúan sumideros que llevan el cauce actual hacia el meandro terminal. Este nivel parece corresponder a una inundación con retención de una masa de agua, probablemente por taponamiento de estos sumideros, cuando la galería-sala estaba ya desarrollada. Este embalsamiento alcanzó la cota 20,35 msnm afectando a la pintura del mamut, donde se puede apreciar una decoloración en la parte inferior de la figura, con un límite superior marcadamente lineal (Figura 7). Otras figuras no han sido afectadas, bien por encontrarse por encima de esta cota, bien por poder ser posteriores a la misma. En este caso, la propia figura del mamut delimita la edad del evento, posterior a él y previo a las pinturas magdalenienses, usando éstas como *terminus ante quem*.



Figura 6. Restos de las galerías de la cavidad en el exterior de la cueva de El Pindal

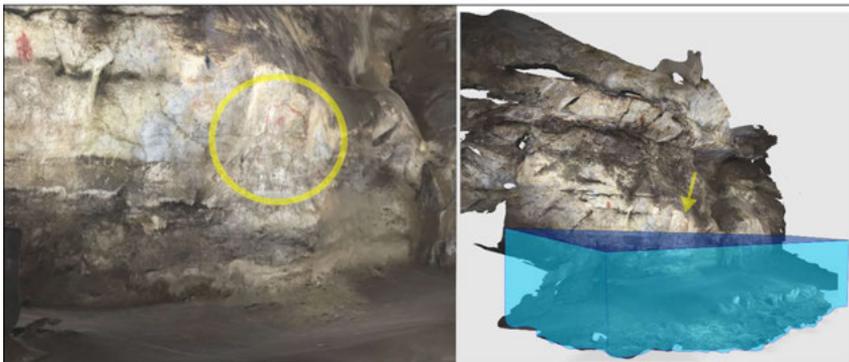


Figura 7. Imagen 3D generada por escáner laser de la pintura del mamut y posible nivel de inundación que ha decolorado la parte inferior del mismo

Una situación parecida se produjo el 23 de octubre de 2019 cuando una inundación excepcional afectó en gran parte al sector turístico de la cueva de El Pindal. Las intensas lluvias de ese día y los anteriores provocaron el colapso de un sumidero exterior situado casi en la vertical de la cavidad. Este evento aportó de forma súbita un importante caudal al interior de la cavidad que se unió al que ya debía circular por el cauce principal, superándose la capacidad de evacuación natural hacia el vestíbulo. La conexión principal entre el nivel de circulación hídrica del cauce actual y reciente y las galerías inferiores se produce por la pared Norte en la zona de las balizas 6-5 (Figura 1). En el embalsamiento influyeron decisivamente las modificaciones de los conductos de desagüe, tanto por la acumulación natural de sedimentos transportados por el cauce interior como por el amontonamiento de grandes fragmentos de roca arrojados al conducto principal durante las obras de adecuación de la cueva a las visitas. El resultado provocó la acumulación de una lámina de agua de casi 1 m de altura (González-Pumariiega, 2022, Martín-Pozas *et al.*, 2022, 2024) que en esta ocasión no afectó directamente al panel

principal pero que con un evento de lluvias más persistente y de mayor magnitud podría afectar de forma irreversible al arte rupestre (Figura 8).



Figura 8. Inundación en los primeros metros de la Sala 2 (baliza 6 semicubierta) de la cueva de El Pindal (23/10/2019) (de González-Pumariega, 2022)

Conclusiones

La cueva de El Pindal muestra evidencias de sucesivos eventos de alta energía en su interior, asociados a la entrada de sedimentos alóctonos a la misma y reflejadas en distintos socaves y terrazas formadas desde el inicio de la formación del sistema kárstico. Existen evidencias de inundaciones con embalsamiento de agua en las salas de la cavidad que han podido afectar a algunas de las pinturas de ésta. Aunque no existe registro documental previo de eventos de este tipo, en 2019 se produjo una nueva inundación, asociada a fuertes precipitaciones, que volvió a inundar las salas de la cavidad y aportar una importante cantidad de sedimentos detríticos finos. La inundación está asociada a la obturación de la zona de drenaje de esta zona de la cavidad, en este caso probablemente favorecida por la acumulación de materiales durante las obras de acondicionamiento de la cavidad para la actividad turística, aunque puede haber ocurrido en el pasado por causas naturales. Afortunadamente, en esta ocasión las manifestaciones artísticas no fueron afectadas directamente por la lámina de agua, pero pone de manifiesto la necesidad de controlar todo el proceso de acondicionamiento de cavidades para no afectar al drenaje natural de las mismas. El estudio en detalle y la datación de los eventos energéticos registrados en la cavidad puede aportar los datos necesarios para evaluar la frecuencia de estos eventos y su posible afección al arte rupestre de la misma.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos del Ministerio de Innovación y Ciencia PID2019-110603RB-I00 y PID2023-146299OB-C21.

Referencias

- Audra, P. and Palmer, A.N. (2011). The pattern of caves: controls of epigenic speleogenesis. *Géomorphologie: relief, processus, environment*, 4, 359-378.
- Farrant, A. R. (2004). Paragenesis. In Gunn, J. (ed.) *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. Fitzroy Dearborn, pp. 569-571, New York.
- Farrant, A.R. and Smart, P.L. (2011). Role of sediment in speleogenesis; sedimentation and Paragenesis. *Geomorphology* 134, 79-93. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.006>
- González-Pumariega Solís, 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.
- González-Pumariega Solís, M. (2022). Informe sobre una inundación excepcional en la cueva de El Pindal (Pimiango, Ribadedeva): Gestión de un evento geológico imprevisto en una cueva con arte rupestre Paleolítico. Excavaciones arqueológicas en Asturias, 2017-2020. Consejería de Cultura, Política Lingüística y Turismo, Oviedo, 97-106.
- Goy, J. L., Zazo, C., Elez, J., Martínez-Graña, A. M., Cañaveras, J. C., Dábrio, C. J., Duarte, E., De Bustamante, I., and Sánchez Moral, S. (2023). Geomorphological evolution and mapping of the littoral of Asturias and Cantabria (Northern Spain) in the area of El Pindal Cave: relations between coastline and karstic morphologies. *Journal of Maps*, 19(1), 2196447. <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2196447>
- Jiménez-Sánchez M., Anadón-Ruiz S., Farias P., García-Sansegundo, J., and Canto-Toimil N., (2002). Estudio preliminar de la Geomorfología de la cueva del Pindal (Ribadedeva, Oriente de Asturias). *Geogaceta* 31, 47-50.
- Jiménez-Sánchez, M., Canto Toimil, N., and Anadón Ruiz, S. (2004). Caracterización estratigráfica del relleno sedimentario de la Cueva del Pindal (Ribadedeva, Asturias): implicaciones geomorfológicas. In: Flor, G. (ed.): *Actas de la XI Reunión de AEQUA*, 151-158.
- Jiménez-Sánchez, M., Bischoff, J.L., Stoll, H., and Aranburu, A. (2006). A geochronological approach for cave evolution in the Cantabrian Coast (Pindal Cave, NW Spain). *Z. Geomorphol.* 147, 129-141.
- Jiménez-Sánchez, M., Moreno, A., Stoll, H., Aranburu, A., Uriarte, J., Iriarte, E., Domínguez-Cuesta, M.J., and Valero-Garcés, B.L. (2008). Dataciones cronológicas con U–Th en la cueva del Pindal (Asturias, N España): implicaciones geomorfológicas. *Trabajos de Geomorfología en España 2006–2008, X Reunión Nacional de Geomorfología*, 49-52.
- Martín-Pozas, T., Cuezva, S., Fernandez-Cortes, A., González-Pumariega, M., Duarte, E., De la Rasilla, M., Cañaveras, J.C., Benavente, Goy Goy, J.L., Elez, J., D., Saiz-Jiménez, C., Zazo, C., and Sánchez Moral, S. (2022). Impacto de un evento de inundación en la comunidad bacteriana de un ecosistema subterráneo somero (cueva del Pindal, Asturias). En: *Minas y cuevas: Patrimonio Geológico y Turístico, Asociación de cuevas Turísticas Españolas. Pulpí (Almería)*, 359-372.
- Martín-Pozas, T.; Cuezva, S.; Fernandez-Cortes, A.; Gonzalez-Pumariega, M.; Elez, J.; Duarte, E.; de la Rasilla, M.; Cañaveras, J.C.; Saiz-Jiménez, C. and Sánchez-Moral, S. (2024). Adaptive response of prokaryotic communities to extreme pollution flooding in a Paleolithic rock art cave (Pindal Cave, northern Spain). *Science of The Total Environment*, 921, 171137. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171137>
- Pasini, G. (2009). A terminological matter: paragenesis, antigravitative erosion or antigravitational erosion. *International Journal of Speleology*, 38, 129-138.
- Renault, P. (1970). *La Formation des Cavernes*. Presses Universitaires de France, pp. 127, Paris.

CaveDrop: sistema autónomo de monitoreo de gotas para el estudio de espeleotemas en cuevas

Ros Vivancos, A.

Tecminsa-Qalat, Cueva del Puerto. Alcántara 5, 30394 Cartagena.
andresros@outlook.com

Resumen

Este trabajo presenta CaveDrop, un dispositivo de código abierto diseñado para el monitoreo de la tasa de goteo en cuevas, proporcionando datos esenciales para estudios paleoclimáticos. El monitoreo preciso y continuo del goteo en formaciones espeleológicas es fundamental para comprender la formación de espeleotemas y las variaciones climáticas registradas en estas estructuras naturales. CaveDrop es una solución accesible, ensamblada con materiales de fácil adquisición en el mercado, lo que facilita su fabricación a pequeña escala y permite su uso en diversas condiciones de campo. Su diseño modular y flexible lo distingue de otros equipos comerciales que, aunque eficaces, presentan limitaciones en cuanto a personalización y costo. El sistema está basado en un microcontrolador ATmega328PB de bajo consumo energético y utiliza un sensor piezoeléctrico para detectar el impacto de gotas al caer sobre una superficie protectora. Los datos se registran en una tarjeta microSD con capacidad para almacenar millones de mediciones, permitiendo análisis prolongados en el tiempo. Las pruebas de campo iniciales realizadas en la cueva del Puerto, en Murcia, demostraron que CaveDrop es capaz de registrar gotas desde una altura mínima de 30 cm e incluso menos, y ofrece un rendimiento estable en diversas condiciones ambientales. Aunque se identificaron algunas limitaciones en la detección de gotas muy pequeñas o con un peso no detectable, CaveDrop ha mostrado ser una herramienta eficaz para la recopilación de datos en entornos extremos. Además, se ha implementado un sistema de retroalimentación visual mediante un LED que indica cuando se ha registrado un impacto, lo que facilita la verificación en tiempo real del funcionamiento del dispositivo. Los resultados sugieren que CaveDrop es una solución confiable y adaptable para investigaciones que requieren un monitoreo continuo en cuevas. Su capacidad para registrar datos de goteo con precisión lo convierte en una herramienta valiosa para estudios paleoclimáticos y espeleológicos, contribuyendo al análisis de variaciones climáticas y al entendimiento de las condiciones ambientales del pasado.

Palabras clave: contador de gotas, espeleotemas, sensor de impactos.

Abstract

This work presents CaveDrop, an open-source device designed for monitoring the drip rate in caves, providing essential data for paleoclimatic studies. Precise and continuous monitoring of drip rates in speleological formations is fundamental for understanding the formation of speleothems and the climatic variations recorded in these natural structures. CaveDrop is an accessible solution, assembled with easily available materials from the market, facilitating its small-scale production and enabling its use in various field conditions. Its modular and flexible design sets it apart from other commercial equipment, which, although effective, presents limitations in terms of customization and cost. The system is based on a low-power ATmega328PB microcontroller and uses a piezoelectric sensor to detect the impact of droplets falling onto a protective surface. The data are recorded on a microSD card with the capacity to store millions of measurements, allowing for long-term analysis. Initial field tests conducted in the cave of Puerto, in Murcia, demonstrated that CaveDrop is capable of registering droplets from a minimum height of 30 cm, and even less, while providing stable performance under various environmental conditions. Although some limitations were identified in detecting very small or undetectable droplets, CaveDrop has proven to be an effective tool for data collection in extreme environments. Additionally, a visual feedback system has been implemented via an LED, which indicates when an impact is registered, facilitating real-time verification of the device's operation. The results suggest that CaveDrop is a reliable and adaptable solution for research that requires continuous monitoring in caves. Its ability to accurately record drip data makes it a valuable tool for paleoclimatic and speleological studies, contributing to the analysis of climatic variations and the understanding of past environmental conditions.

Keywords: drip counter, impact sensor, speleothems.

Introducción

Los contadores de gotas son herramientas que se utilizan en estudios paleoclimáticos, ya que permiten registrar la tasa de goteo en cuevas, facilitando la obtención de datos necesarios para el análisis hidroquímico y la formación de espeleotemas. Al medir de manera precisa y constante la frecuencia del goteo, estos equipos proporcionan información fundamental para apoyar estudios sobre variaciones climáticas y la interpretación de registros paleoclimáticos. Aunque no analizan directamente los parámetros geoquímicos, su papel es esencial en la recolección de datos para dichos análisis.

Diversos trabajos se apoyaron en el uso de contadores de gotas. En el 2007 se llevó a cabo un estudio en seis cuevas de America del Norte (Beddows, 2007) donde se registraron la tasa de goteo en intervalos de 15 minutos, los resultados mostraron variabilidad en las tasas de goteo y los análisis de estas permitieron ver las variaciones hidroquímicas entre los puntos monitoreados. Se observó que los puntos de goteo con tasas constantes a lo largo del año (es decir, sin estacionalidad) mostraban una variación isotópica significativa, lo que sugiere que estos pueden proporcionar registros más continuos y confiables del clima a largo plazo. En contraste, otros puntos de goteo exhibían cambios estacionales en la tasa de goteo, pero no en la composición isotópica.

Los trabajos realizados la cueva Cathedral Cave, Wellington, Australia sobre los *Controls on cave drip water temperature and implications for speleothem-based paleoclimate reconstructions* (Rau et al., 2015) se utilizaron contadores de gotas automáticos, estos dispositivos registraron la frecuencia de goteo en intervalos de alta resolución y fueron fundamentales para vincular las variaciones en la tasa de goteo con los cambios de temperatura, tanto dentro de la cueva como en la superficie.

Un trabajo realizado en Natural Bridge Caverns, Texas, durante cuatro años (Oster et al., 2012), demostró que el monitoreo detallado de la tasa de goteo, combinado con mediciones geoquímicas, es eficaz para interpretar mejor los registros paleoclimáticos, ya que ayuda a identificar los mecanismos detrás de las variaciones en la química del agua de goteo, particularmente en relación con la precipitación de calcita controlada por la ventilación de la cueva.

La eficacia del monitoreo es alta, ya que permite identificar qué estalagmitas pueden ofrecer registros paleoclimáticos sin sesgos estacionales. El monitoreo de las gotas en cuevas también ayuda a comprender cómo varían los parámetros hidroquímicos y cómo estas variaciones se reflejan en la formación de las estalagmitas.

La disponibilidad de diversos sensores electrónicos en el mercado, como sensores de temperatura, humedad, CO₂, impactos y acelerómetro está permitiendo el desarrollo de instrumentos de control y medida que facilitan la investigación, incluyendo la de cuevas y sus entornos. La gran variedad de elementos electrónicos y su relativa facilidad de ensamblaje, junto con lenguajes de programación accesibles, están posibilitando la creación de equipos adaptados a entornos especiales, como las cavidades.

El mercado de equipos de mediciones para cuevas es escaso y no muy amplio, y no siempre

suelen reunir las características de estanqueidad y autonomía necesarias para estos entornos. Equipos comerciales como *Stalagmate* de PiTech Research Ltd, o *Stalactite Drip Count Loggers* de Goodsell Systems, son equipos disponibles en el mercado con unas líneas fijas de funcionamiento que limitan su modificación o ajustes según las posibles necesidades.

Actualmente el mercado permite el desarrollo a pequeña escala de equipos específicos que suelen realizarse por expertos involucrados en el mundo de la espeleología. En este contexto, se presenta CaveDrop, un equipo de código abierto, diseñado específicamente para entornos extremos como las cavidades, que permite detectar el impacto de gotas al caer sobre la tapa, lo que constituye el objeto de la presente comunicación.

CaveDrop es un proyecto de código abierto para contar gotas utilizando materiales fáciles de encontrar en el mercado y permite su ensamblaje con pocas dificultades, al ser de código abierto este puede ser modificado y adaptado según necesidades, periodos de goteo o añadir nuevos sensores como temperatura, humedad entre otros.

A pesar de los avances en el monitoreo de gotas, los dispositivos actuales aún presentan limitaciones en cuanto a personalización y costos. Aquí presentamos CaveDrop, una solución accesible y flexible para superar estas barreras.

Metodología

El desarrollo de CaveDrop se ha basado en varios proyectos similares como; *Stalagmate* de Dave Matthey, desarrollado por PiTech Research Ltd, *Stalactite Drip Count Loggers* de Goodsell Systems, o *Drip Sensor for Cave Research* de Edward K. Mallon. Basándose en estos, se ensayaron diversos microcontroladores y sensores para crear un equipo compacto y accesible.

Inicialmente, se utilizó la base del proyecto de (Mallon, 2017a y b; Mallon y Beddows, 2018), que describe detalladamente los equipos, ensamblaje y código. Pero su desarrollo limita el uso de las tarjetas microSD, debido a problemas de compatibilidad, su modelo utiliza el acelerómetro ADXL345, que también eleva el consumo. En un segundo prototipo utilizamos placas de desarrollo basadas en el chip ESP32 de (ESP32, 2024), que ofrecen amplias prestaciones para entorno con red de energía permanente, pero limitados en proyectos autónomos por su alto consumo.

Finalmente, se seleccionó el microcontrolador ATmega328PB, de bajo consumo, basado en la arquitectura RISC mejorada de AVR de (Microchip 2017), (foto1). En lugar del acelerómetro ADXL345, se empleó un sensor piezoeléctrico que no tiene consumo de energía y detecta los impactos con alta sensibilidad. Para la memoria, se optó por un módulo OpenLog (Sparkfun 2021), que admite tarjetas microSD de hasta 32Gb, y un módulo de reloj DS3231 para registrar la fecha y hora de los registros. Se añadió un mini interruptor DIP de cuatro posiciones para encendido/apagado y selección de tiempos de registro (1 minuto, 10 minutos, 1 hora).

El equipo es alimentado por tres baterías recargables NH de 1.2V y 2400mAh, con opción de utilizar baterías de mayor capacidad para mayor autonomía. Se diseñó una placa PCB específica para CaveDrop por PCBWay, permitiendo una disposición estable y firme de todos los módulos.

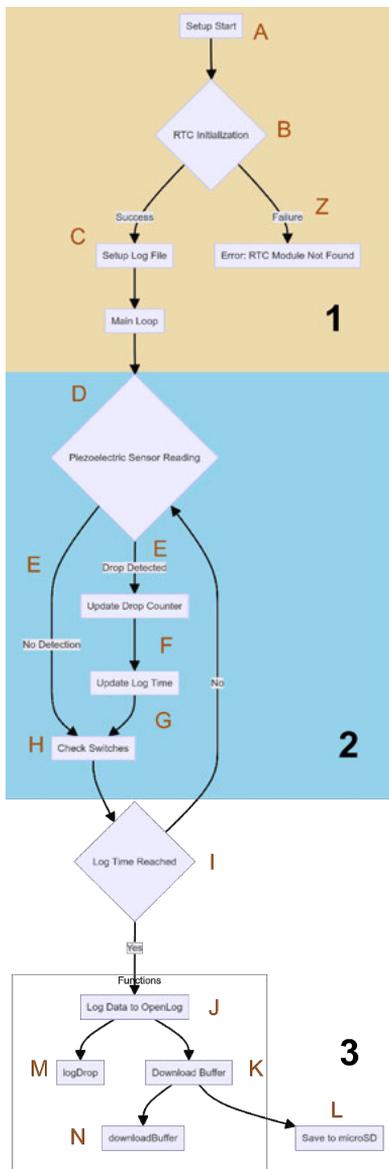


Figura 1. Diagrama de funcionamiento. Bloque 1; puesta en marcha A, se inicia el reloj verifica la hora B, inicia registro de configuración, comienza bucle principal C. Bloque 2; lectura del sensor piezométrico D, Impacto detectado E, actualiza contador y registra la hora F, comprueba selección tiempo de registros H. Bloque 3; cuando alcanza tiempo de registro I, lo graba temporalmente en la memoria del módulo OpenLog J, K, cuando se llega al tiempo previsto de descarga de la memoria temporal se graba en la microSD K, L

Los datos se archivan en la tarjeta microSD en formato TXT, con registros de fecha, hora, minuto y número de gotas. La tarjeta microSD de 1Gb permite almacenar alrededor de 35 millones de registros, suficiente para unos amplios muestreos. El código se realiza en C de Arduino, un

lenguaje accesible y eficaz para el uso requerido; en la figura 1 se muestran los bloques de funcionamiento de este programa, este se encuentra disponible con las actualizaciones en el repositorio técnico <https://github.com/Andres-ros/CAVEDROP>

El equipo permite añadir y configurar sensores adicionales, es viable, aunque la situación extrema a la que van a estar sometidos, agua constante, no se recomienda, colocarlos en su interior pueden falsear los datos debido a la temperatura que se puede generar por los módulos electrónicos internos, en su lugar mejor optar por equipos externos adicionales para medidas con sensores de temperatura, humedad y CO₂.

El dispositivo (figuras 2 y 3) se aloja en un bote de plástico translúcido con tapa de rosca plana de 250 ml, que evita la acumulación de gotas de agua en la superficie. Este modelo inicial no tiene elementos externos de conexión, conectores USB o de alimentación, interruptores, lo que facilita la estanqueidad contra la intensa humedad que van a estar sometidos. Para su colocación en las cavidades, debe ser estable y horizontal para alcanzar la mayor efectividad de los impactos, en caso de suelos no horizontales aconsejamos el uso de bolsas de tela o incluso un calcetín con arena lavada para asegurar una superficie estable.

Resultados

La selección de los registros de datos se controla mediante un bloque de cuatro interruptores DIP: el primero para encender el equipo, y los otros tres para seleccionar los intervalos de registro (1 minuto, 10 minutos o 1 hora). Este diseño permite flexibilidad en la recolección de datos, ajustándose a las necesidades de cada experimento. El circuito está ensamblado en una placa PCB compacta, con el sensor de impactos conectado a través de micro conectores JST-PH 2.0, lo que facilita su montaje y desmontaje en el bote protector.

Los datos se almacenan en formato TXT en una tarjeta microSD, con una capacidad de hasta 35 millones de registros. Esto es suficiente para estudios prolongados, incluso en condiciones de campo. La estructura de los registros incluye fecha, hora, minuto y número de gotas, lo que permite un análisis detallado del comportamiento de goteo en intervalos definidos. El código, programado en C para Arduino, está disponible en un repositorio de código abierto para actualizaciones y modificaciones futuras (<https://github.com/Andres-ros/CAVEDROP>).

En pruebas de campo iniciales, realizadas en la cueva del Puerto (Murcia), el equipo demostró su eficacia para registrar gotas a una altura mínima de 30 cm, con una buena respuesta del sensor piezoeléctrico ante diferentes tamaños de gotas. En la Figura 4, se muestra un ejemplo de los datos obtenidos en intervalos de un minuto.

Los resultados indican que CaveDrop es capaz de adaptarse a diversas situaciones de campo, proporcionando datos precisos y consistentes. Sin embargo, se identificaron ciertas limitaciones en la detección de gotas muy pequeñas o de peso no detectable, lo que sugiere la necesidad de ajustes a la hora de situar el dispositivo, para facilitar la detección de gotas se ha incorporado un Led que se enciende con cada impacto.

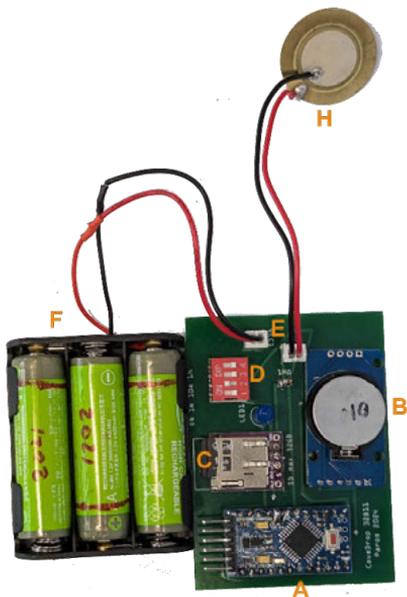


Figura 2. A microcontrolador ATmega328PB, B, Reloj RTC DS3231, C, módulo OpenLog tarjetas microSD, D, micro interruptores de selección, E, Micro conectores sensor y baterías, F, baterías NH 1,2V 2.400mAh, H, Sensor vibraciones

Discusión

El uso de sensores piezoeléctricos para la detección de impactos en el CaveDrop presenta ciertas limitaciones relacionadas con el tamaño y peso de las gotas. Como se observó en las pruebas de campo, gotas pequeñas que caen desde una gran altura pueden generar un impulso similar al de gotas más grandes que caen desde una distancia menor, lo que complica la calibración precisa del dispositivo. Esta es una limitación inherente a los sensores piezoeléctricos y acelerómetros que también ha sido señalada en estudios previos, como el de Mallon et al. (2017 a, b), donde se enfrentaron a dificultades similares.

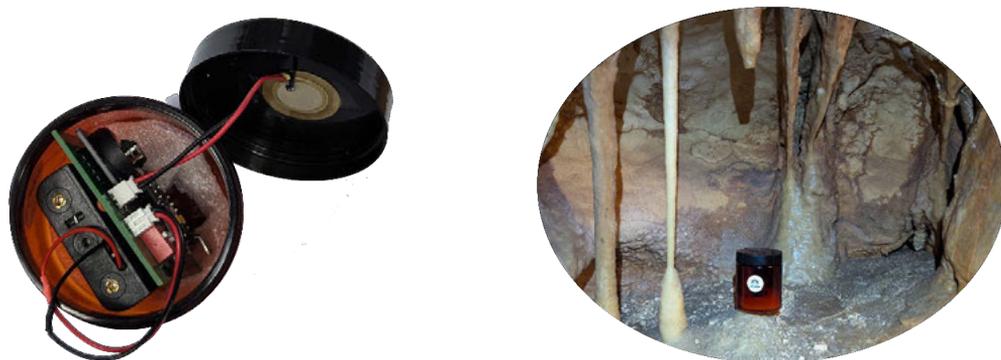


Figura 3. Izquierda, equipo dentro del bote. Derecha, bote en posición de registro de gotas

El uso de sensores piezoeléctricos para la detección de impactos en CaveDrop presenta ciertos retos relacionados con el tamaño y el peso de las gotas, los cuales dependen de factores físicos que se pueden modelar mediante la fórmula de equilibrio entre gravedad y tensión superficial:

$$mg = \pi d \gamma$$

donde:

- m es la masa de la gota,
- g es la aceleración de la gravedad,
- d es el diámetro de la punta de la estalactita,
- γ es la tensión superficial del agua.

Esta fórmula nos ayuda a entender el tamaño máximo que una gota puede alcanzar antes de que la gravedad supere la tensión superficial y la haga caer. Cuanto más pequeño sea el diámetro de la estalactita, más pequeñas serán las gotas, y esto tiene un impacto directo en la capacidad del sensor piezoeléctrico para detectar gotas con diferentes características [https://en.wikipedia.org/wiki/Drop_\(liquid\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Drop_(liquid)).

Las pruebas de campo indicaron que el sensor piezoeléctrico de CaveDrop requiere una gota con un peso mínimo para generar un impulso detectable. Esto significa que en condiciones donde las gotas son demasiado pequeñas o caen desde una altura muy corta, el sensor puede no ser capaz de registrar el impacto de manera consistente. Sin embargo, una gota grande que cae desde una menor distancia puede generar un impulso similar al de una gota pequeña que cae desde una altura mayor, lo que introduce complejidad en la calibración del sensor y a realizar pruebas previas para su óptimo funcionamiento.

```

Fecha y hora actuales: 2024/9/16 11:39:16
new RegistroGotas.txt
append RegistroGotas.txt
CaveDrop 328
v113CC_003
Fecha, hora, gotas
2024-09-16,11:40,36
2024-09-16,11:41,0
2024-09-16,11:42,0
2024-09-16,11:43,0
2024-09-16,11:44,0
2024-09-16,11:45,0
2024-09-16,11:46,0
2024-09-16,11:47,0
2024-09-16,11:48,0
2024-09-16,11:49,14
2024-09-16,11:50,8
2024-09-16,11:51,0
2024-09-16,11:52,0
2024-09-16,11:53,0

```

Figura 4. Ejemplo de datos obtenidos en periodos de un minuto con CaveDrop

Comparado con otros sistemas como Stalagmate, CaveDrop ofrece la ventaja de ser personalizable, lo que permite ajustar los umbrales de sensibilidad del sensor dependiendo de las características del entorno y de las gotas.

El diseño modular de CaveDrop, le permite ser adaptable a distintas situaciones, pero es esencial realizar pruebas previas para optimizar su rendimiento en condiciones extremas de temperatura y humedad. Estas variaciones en las características físicas de las gotas pueden influir en el impacto detectado y, por lo tanto, en la precisión de los registros.

Finalmente, los resultados obtenidos demuestran que CaveDrop es una solución eficaz para el monitoreo de gotas en cuevas y su potencial para estudios paleoclimáticos es considerable.

Conclusiones

CaveDrop se destaca como una solución abierta como herramienta de apoyo para la investigación paleoclimática, ofreciendo un sistema automatizado y eficiente para el monitoreo de gotas en cuevas. La precisión en la detección de gotas permite recoger datos fundamentales sobre la frecuencia de goteo en diversas formaciones espeleológicas, lo que ayuda en el análisis de los registros climáticos presentes en los espeleotemas y, a su vez, en la reconstrucción de climas pasados.

Una de las principales ventajas de CaveDrop radica en su diseño basado en código abierto, que ofrece una flexibilidad extraordinaria para adaptar el dispositivo a situaciones específicas. Los investigadores pueden modificar tanto el hardware como el software según las necesidades concretas de cada entorno o proyecto, permitiendo la integración de sensores adicionales, como aquellos que miden temperatura, humedad o CO₂. Esta capacidad de personalización permite correlacionar las tasas de goteo con las condiciones ambientales dentro de las cuevas, lo que maximiza su versatilidad y valor en una amplia gama de investigaciones.

Además, el uso de materiales de fácil acceso en el mercado reduce significativamente los costos de fabricación y permite la producción de estos dispositivos a pequeña escala. Esto democratiza su uso, eliminando la dependencia de costosos equipos comerciales para realizar investigaciones de alta calidad en cuevas. Los investigadores pueden ensamblar el dispositivo con materiales comunes, manteniendo los gastos bajos y asegurando una amplia disponibilidad para proyectos de investigación que necesiten herramientas confiables, versátiles y de bajo coste.

Como herramienta de investigación, CaveDrop no solo automatiza el proceso de recolección de datos, sino que también brinda una solución escalable para estudios paleoclimáticos y espeleológicos de diversas magnitudes. Su diseño modular permite su integración en diferentes tipos de estudios, tanto en pequeñas investigaciones locales como en proyectos más amplios y geográficamente diversos. Su capacidad para registrar datos precisos y constantes sobre el goteo facilita la interpretación de los registros climáticos almacenados en espeleotemas, información esencial para reconstruir las condiciones ambientales de tiempos pasados y para comprender los cambios climáticos a lo largo del tiempo. En este sentido, CaveDrop no solo contribuye a estudios históricos, sino que también puede tener un papel importante en investigaciones sobre el cambio climático actual y sus impactos futuros.

Referencias

- Repositorio Técnico y actualizaciones en Github <https://github.com/Andres-ros/CAVEDROP>
- Beddows P. (2007). Cave-Drip Monitoring as a Foundation for Better Paleoclimate Reconstruction. National Cave and Karst Management Symposium 2007.
- ESP32 (2024) Technical Reference Manual, Espressif Systems.
- Mallon K.E. (2017a). Cave Pearl Data Logger: DRIP Sensor Configuration. <https://www.researchgate.net>.
- Mallon, K.E..(2017b) How to Build an Arduino Data Logger; The Cave Pearl Project.. Available online: <https://thecavepearlproject.org/how-to-build-an-arduino-data-logger>.
- Mallon K.E., Beddows P. (2018). Cave Pearl Data Logger: A Flexible Arduino-Based Logging Platform for Long-Term Monitoring in Harsh Environment. *Sensors* 2018, 18, 530; doi:10.3390/s18020530.
- Microchip (2017) ATmega328PB Datasheet. Microchip Technology Inc.
- Rau G., Cuthbert M., Andersen M., Baker A., Rutledge H., Markowska M., Roshan H., Marjo C., Graham P, Acworth I, (2015). Controls on cave drip water temperature and implications for speleothem-based paleoclimate reconstructions, *Quaternary Science Reviews*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.026>
- Oster J.L, Montañez I. P, Kelley N.P. (2012) Response of a modern cave system to large seasonal precipitation variability. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 91 (2012) 92–108
- Sparkfun (2021) OpenLog Hookup Guide. Sparkfun.com.
- Spt-2024*

La fotografía 360°: una herramienta para el análisis morfológico de la Cueva del Puerto (Calasparra, Murcia)

Ros, A., Olmo Torrente, J., Fernández Amo, F.J.

Cueva del Puerto, Calasparra, Murcia
andresros@outlook.com, juanolto@gmail.com, francis@tecmineras.com

Resumen

El uso de nuevas técnicas para el análisis de cavidades, como la fotografía 360°, está revolucionando la espeleología tanto para fines didácticos como científicos. La fotografía 360° ofrece una visión inmersiva del interior de las cavidades a través del uso de gafas de realidad virtual (RV). También es posible visualizar estas imágenes en un formato equirectangular, que extiende la fotografía 360° en un plano, ofreciendo un amplio campo visual y permitiendo apreciar detalles morfológicos con gran precisión. Esta técnica facilita la interpretación e identificación de diversas formaciones subterráneas, revelando detalles que podrían pasar desapercibidos en los trabajos de campo tradicionales. La fotografía equirectangular es especialmente útil para el estudio de morfologías hipogénicas, formaciones creadas por procesos químicos y físicos bajo la superficie terrestre que incluyen tubos de presión, cúpulas, conductos y otros depósitos minerales, proporcionando información valiosa sobre los procesos geológicos y químicos del subsuelo. Además, permite una observación más detallada y completa de los espeleotemas, como estalactitas, estalagmitas y columnas, que son indicadores importantes del entorno hidrológico y climático de la cueva. La cuidada iluminación durante la toma de imágenes asegura que todos los detalles morfológicos sean visibles y puedan ser estudiados con precisión. El uso de esta técnica en la Cueva del Puerto (Murcia) ha permitido obtener nuevas perspectivas de análisis en los procesos morfológicos, ofreciendo un detalle ampliado difícil de captar in situ en su totalidad. Este enfoque no solo enriquece el registro visual de las cavidades, sino que también proporciona un documento gráfico de gran valor para el conocimiento de la espeleogénesis y la morfología de las cavidades.

Palabras clave: cuevas hipogénicas, Cueva del Puerto, fotografía 360°, realidad virtual, visión inmersiva.

Abstract

The use of innovative techniques for cavity analysis, such as 360° photography, is revolutionizing speleology for both educational and scientific purposes. 360° photography offers an immersive view of the interior of cavities using virtual reality (VR) glasses. It is also possible to view these images in an equirectangular format, which extends the 360° photograph onto a plane, offering a wide field of view and allowing detailed morphological features to be appreciated with great precision. This technique facilitates the interpretation and identification of various underground formations, revealing details that might go unnoticed in traditional fieldwork. Equirectangular photography is particularly useful for studying hypogenic morphologies—formations created by chemical and physical processes beneath the Earth's surface, including pressure tubes, domes, conduits, and other mineral deposits—providing valuable information about subsurface geological and chemical processes. Moreover, it allows for a more detailed and comprehensive observation of speleothems, such as stalactites, stalagmites, and columns, which are important indicators of the cave's hydrological and climatic environment. Careful lighting during image capture ensures that all morphological details are visible and can be studied with precision. The use of this technique in Cueva del Puerto (Murcia) has provided new perspectives on morphological processes, offering enhanced detail that is difficult to capture in situ in its entirety. This approach not only enriches the visual record of cavities but also provides a highly valuable graphic document for the understanding of speleogenesis and cavity morphology.

Keywords: 360° photography, Cueva del Puerto, hypogenic caves, immersive vision, Virtual Reality.

Introducción

Las cavidades a lo largo del tiempo continúan su evolución, a menudo mostrando una realidad actual que difiere mucho de su origen, enmascarado por cambios climáticos, efectos de gases profundos, alteraciones por elementos alóctonos, murciélagos, acciones humanas, etc. (Figura 1).



Figura 1. Imagen procesada para 360° RV: a la derecha los espeleotemas enmascaran las morfologías hipogénicas; a la izquierda, estas se muestran claramente (Foto: Espeleofoto)

La búsqueda de la espeleogénesis inicial en muchas cavidades puede ser complicada, por ejemplo, en 2007, se estimó que el porcentaje mundial de cavidades hipogénicas era del 7-10% (Klimchouk, 2007), cifra que está siendo revisada actualmente debido al aumento de investigaciones sobre estas cavidades que confirman un origen hipogénico en muchas cavidades que hasta ahora se creían epigénicas. En 2017, un proyecto mundial liderado por A. Klimchouk, "Hypogene Karst Regions and Caves of the World" (Klimchouk et al., 2017), evidenció que estas cavidades son más numerosas de lo que se estimaba inicialmente. Esto indica que aún se debe profundizar más en los aspectos espeleogenéticos de las cavidades (Ros et al., 2016; Ros et al., 2021). A estos trabajos se añaden nuevas herramientas, como la fotografía inmersiva o 360°, que proporcionan una visión nítida, tranquila y con un gran nivel de detalle, iluminación y resolución que, en condiciones normales dentro de la cavidad, es más complicado de ver. La aplicación de técnicas para el análisis de cavidades, como es la fotografía 360° inmersiva, se revela como una herramienta de gran valor tanto para la investigación como en el ámbito didáctico.

Desarrollo

La aplicación de la técnica fotográfica 360° para visión inmersiva es más compleja que la fotografía tradicional, requiriendo equipamiento específico como grandes angulares, una meticulosa

y uniforme iluminación y un procesamiento posterior de las imágenes, como el apilamiento de fotografías con programas específicos para las imágenes 360° (Figura 2). La obtención final de la imagen difiere si es vista en un plano o sobre papel; esta se verá deformada e incluso algo borrosa en los extremos superiores e inferiores debido a la distorsión visual de la forma final de 360°, recreando un entorno inmersivo en todas direcciones. Las imágenes vistas con gafas especiales RV recrean una inmersión real de la cavidad con todo detalle, permitiendo moverse girando la cabeza por toda la sala: frente, lados, techo y suelo, con una sensación inmersiva de estar dentro de la cavidad.



Figura 2. Desarrollo de una sesión fotográfica 360° en el interior de Cueva del Puerto (Foto Espeleofoto)

Una vez obtenida la imagen, esta requiere una segunda manipulación para señalar los elementos que se quieren mostrar o los patrones indicadores de la espeleogénesis (Figura 4). La fotografía nos permite identificar con claridad patrones de tipo hipogénico u otros, como son los espeleotemas;

una vez procesada la imagen, esta se complementa previamente con una imagen igual sin los indicadores para, a continuación, mostrar los indicadores resaltados con una pequeña locución explicativa (Figuras 3, 4 y 5).



Figura 3. Conjunto de imágenes para ver en RV 360° con visión inmersiva (Foto: Espeleofoto)



Figura 4. Misma foto que la figura 3, procesada y con señalización de patrones en indicadores morfológicos (Foto: Espeleofoto, composición A. Ros)



Figura 5. Demostración de 360° inmersiva. La cueva es llevada a la ciudad

Conclusiones

La fotografía 360° inmersiva es una herramienta a considerar para la investigación, dado su alto nivel de detalle y, a su vez, como un elemento didáctico para cuevas turísticas o cuevas de difícil acceso o lugares especiales. Proyectos como la Realidad Virtual en la Geoda de Pulpí (Almería) permiten a los visitantes poder adentrarse en el interior de la Geoda, que no se puede visitar de otra manera. Esto también ocurre en otras cavidades que, por su recorrido o difícil acceso, no es posible visitar. Incluso es viable recrear ambientes extintos en yacimientos arqueológicos, como los realizados por la asociación Espeleofoto en el Complejo Kárstico de Ojo Guareña (Castilla y León) y Grottes d'Insturisz et d'Oxocelhaya (Francia).

El proyecto realizado en la Cueva del Puerto ha permitido obtener nuevas perspectivas de análisis en los procesos morfológicos y espeleogenéticos, ofreciendo un detalle ampliado difícil de captar in situ en su totalidad. Este enfoque no solo enriquece el registro visual de las cavidades, sino que también proporciona un documento gráfico de gran valor para el conocimiento de la espeleogénesis y la morfología de las cavidades, además de ser una herramienta didáctica muy atractiva.

Durante los días del congreso se pueden ver estas imágenes de realidad virtual en el stand preparado por la asociación Espeleofoto.

Agradecimientos

Las fotografías de este trabajo son de la Asociación Espeleofoto.

Referencias

- Klimchouk, A.B. (2007). *Hypogene speleogenesis: hydrogeological and morphogenetic perspective*. National Cave and Karst Research Institute Special Paper #1, Carlsbad.
- Klimchouk, A.B., Palmer, A. N., de Waele, J., Audra, P. (2017). *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*. Springer.
- Ros, A., et al. (2016). *Morfologías hipogénicas en la Cueva del Puerto (Murcia, España)*. Gota a Gota N°. 10: 8-15. Grupo de Espeleología de Villacarrillo G.E.V.
- Ros, A., et al. (2021). *La Cueva del Puerto: una cavidad hipogénica*. Edita CENM-naturaleza y Natursport, Murcia.

Aerobiología de las cuevas Covadura y C3 del Karst en yesos de Sorbas

Jurado, V.¹, Martín-Pozas, T.², Sánchez-Moral, S.³, Fernández Cortés, Á.², Calaforra, J.M.², Sáiz-Jiménez, C.¹

¹Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, IRNAS-CSIC, 41012 Sevilla.
v.jurado@csic.es; saiz@irnase.csic.es

²Departamento de Biología y Geología, Universidad de Almería, Almería.
tmp785@ual.es; acortes@ual.es; jmcalforra@ual.es

³Museo Nacional de Ciencias Naturales, MNCN-CSIC, Madrid.
ssmilk@mncn.csic.es

Resumen

Las cuevas, tanto visitables como las aún por descubrir, están colonizadas por una gran variedad de microorganismos que incluyen, entre los más conspicuos, bacterias, hongos, algas, y protozoos. Estos microorganismos se encuentran sobre las superficies de las rocas, espeleotemas, sedimentos, aguas de infiltración y estancadas, así como en el aire. La atmósfera es uno de los medios de transporte de microorganismos y contribuye decisivamente a su dispersión, tanto llevando microorganismos desde el exterior al interior de la cueva, como a la inversa, dependiendo de las pautas de ventilación estacionales. Existe una abundante literatura sobre la aerobiología de cuevas calizas (Altamira, La Garma, Castañar, Nerja, Tesoro, Gruta de las Maravillas, etc.), pero las cuevas en yesos no han sido aún estudiadas. Habitualmente los estudios de aerobiología se realizan con captadores de alto volumen, que permiten cuantificar la abundancia e identificar las bacterias y hongos cultivables presentes en el aire. Sin embargo, la fracción de microorganismos del aire no cultivables no es conocida. En este trabajo se han estudiado las bacterias cultivables y no cultivables, en este último caso mediante secuenciación masiva, de las cuevas Covadura y C3 situadas en el Karst en yesos de Sorbas. Mientras que los resultados de las bacterias cultivables muestran correspondencia entre las especies más abundantes en el interior y exterior de las cuevas, las especies no cultivables detectadas en el aire de las cuevas se corresponden mayoritariamente con las previamente observadas en los biofilms que colonizan las paredes de éstas y otras cuevas calizas.

Palabras clave: aerobiología, bacterias, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Streptomyces*.

Abstract

Caves, both show caves and those yet to be discovered, are colonized by a wide variety of microorganisms that include bacteria, fungi, algae, and protozoa, among the most conspicuous. These microorganisms are found on the surfaces of rocks, speleothems, sediments, dripping and pool waters, as well as in the air. The atmosphere is one of the most important means of transport for microorganisms and contributes decisively to their dispersion, both bringing microorganisms from outside to inside the caves, and vice versa, depending on seasonal ventilation patterns. There is abundant literature on the aerobiology of limestone caves (Altamira, La Garma, Castañar, Nerja, Tesoro, Gruta de las Maravillas, etc.), but gypsum caves have not been studied yet. Aerobiology studies are usually carried out with high-volume collectors, which allow to quantify the abundance and identify the culturable bacteria and fungi present in the air. However, the fraction of non-culturable microorganisms in the air is unknown. In this work, culturable and non-culturable bacteria have been studied, in the last case through NGS, from Covadura and C3 caves located in the Karst in yesos de Sorbas. While the results for culturable bacteria show correspondence between the most abundant species inside and outside the caves, the non-culturable species detected in the air of the caves correspond to those previously observed in the biofilms that colonize the walls of these two caves and other limestone caves.

Keywords: aerobiology, bacteria, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Streptomyces*.

Introducción

En las últimas décadas la geomicrobiología ha experimentado un considerable desarrollo y concretamente los estudios de las comunidades microbianas de cuevas se han visto impulsados por diferentes motivos, desde la necesidad de combatir los brotes de microorganismos en cuevas visitables hasta el aislamiento y descripción de nuevas especies de bacterias y hongos, productores de compuestos de interés biotecnológico (Gonzalez-Pimentel *et al.*, 2022; Martin-Pozas *et al.*, 2024 a).

Tal vez, una de las áreas menos investigadas en cuevas es la aerobiología, el estudio de las partículas biológicas transportadas y dispersadas por el aire. La aerobiología encontró su máxima expresión en los estudios de pólenes y hongos, y su implicación en procesos alérgicos, estableciéndose una Red Española de Aerobiología, con sedes y estaciones de muestreos en distintas ciudades, con una amplia cobertura del territorio nacional, y registros periódicos de los niveles de calidad del aire (Galán Soldevilla *et al.*, 2007). Comparativamente, los estudios aerobiológicos de cuevas son menos numerosos, habiéndose estudiado unas pocas cuevas calizas del norte y sur de España: Nerja, Altamira, La Garma, Ardales, Tesoro, Gruta de las Maravillas (Del Rosal Padial *et al.*, 2007; Garcia-Anton *et al.*, 2014; Dominguez-Moñino *et al.*, 2021 a,b; Martin-Pozas *et al.*, 2024 b). Estas investigaciones se desarrollaron con captadores de alto volumen, estudiándose la dispersión de bacterias y hongos a lo largo de las galerías, y en unos pocos casos, su relación con las poblaciones microbianas presentes en sedimentos y biofilms que cubrían las paredes (Martin-Pozas *et al.*, 2024 b). Los estudios se efectuaron sobre microorganismos cultivables en el laboratorio, lo que proporcionaba una información incompleta sobre la población total existente en el aire de las cuevas, ya que se desconocía la fracción de bacterias y hongos no cultivables. En general, en la fracción cultivable se observó una tendencia común en las cuevas calizas, con la representación de los mismos géneros y especies aisladas de forma reiterativa en la mayoría de ellas.

En los últimos años, se vienen utilizando métodos que no necesitan el cultivo de microorganismos, basados en la secuenciación del gen 16S rRNA de procariontes y la región ITS de hongos para diversos estudios, como la monitorización de las comunidades microbianas en bioaerosoles (Yoo *et al.*, 2017), la ecología microbiana de la atmósfera (Šantl-Temkiv *et al.*, 2022), la existencia de vida microbiana en la estratosfera (Thombre *et al.*, 2022), etc. Lancia *et al.* (2021) revisaron los progresos en aerobiología en los últimos 30 años y enfatizaron el desarrollo de las técnicas ómicas y particularmente de las tecnologías NGS (secuenciación de nueva generación) para este tipo de estudios.

Por otra parte, mientras que los anteriores estudios de aerobiología de nuestro grupo de investigación se centraron en cuevas calizas, las cuevas del Karst en Yesos de Sorbas no han sido estudiadas hasta ahora y se desconocía si los géneros y especies en estas últimas eran los mismos que habitualmente se recogían en las cuevas calizas.

Los estudios aerobiológicos en las cuevas en yesos se han realizado con un muestreador de alto volumen (SAS), equipo que ya se había empleado en otros estudios y que permite identificar las bacterias cultivables (Martin-Sanchez *et al.*, 2014; Dominguez-Moñino *et al.*, 2021 a,b). Para el estudio de las bacterias no cultivables se ha empleado el muestreador Coriolis μ (Martin-Sanchez y Saiz-Jimenez, 2014).

En este trabajo se han estudiado las bacterias de dos cuevas del Karst en yesos de Sorbas (Almería), tanto la fracción cultivable, como la no cultivable, en este último caso mediante técnicas moleculares de secuenciación masiva.

Material y métodos

El Paraje Natural Karst en yesos de Sorbas (Almería), comprende 100 km de galerías, entre las que se encuentran las cuevas Covadura y C3. La Cueva Covadura tiene una longitud de 275 m en la zona muestreada, y alcanza una profundidad de 120 m, que es el espesor máximo de la serie de yesos del miembro Yesares, con una serie de galerías a distintos niveles y de morfologías variadas, producidas por los procesos de disolución del yeso y por erosión de las margas (Fernández Cortés, 2004). La cueva C3 está situada en la parte norte del karst, con una entrada a sólo 200 m del acceso oeste de Covadura, pero aún no se ha encontrado una conexión entre estas dos cuevas. La cueva se desarrolla en el nivel superior del miembro Yesares, solo tiene unos 3 m de profundidad y una longitud de 150 m.

Habitualmente, los muestreos aerobiológicos se realizan en las distintas estaciones del año, o al menos en invierno y verano. Sin embargo, esto no ha sido posible por las restricciones impuestas por la Junta de Andalucía y la prohibición de acceso a las cuevas del Karst en yesos de Sorbas en el periodo de hibernación de los murciélagos, que habitan en muchas de sus cuevas. Por esta razón, se realizó una única campaña de muestreo.

Las muestras de aire del interior y exterior de las cuevas Covadura y C3 se tomaron con dos muestreadores de aire. El primero, el equipo DUO SAS (Surface Air System) SUPER 360 (PBI International, Milán, Italia), aspira el aire a través de dos cabezales provistos de numerosos orificios. En cada cabezal se inserta una placa de Petri con el medio de cultivo tripticosa soja agar (TSA, BD, Heidelberg, Alemania), en cuya superficie impacta el aire, lo que favorecerá el crecimiento de los microorganismos que se deseen cultivar. El volumen de aire recogido fue de 100 L. Las placas de Petri se incubaron a 28 °C durante cinco días, tras los cuales se realizaron los recuentos de las colonias crecidas y los valores se expresaron como unidades formadoras de colonias por metro cúbico de aire (UFC/m³). Posteriormente, las bacterias fueron aisladas y cultivadas en TSA. Las bacterias aisladas se identificaron mediante la secuenciación del gen del ARNr 16S (Martin-Sanchez *et al.*, 2014). La determinación del grado de similitud entre las bacterias y las especies descritas hasta la fecha, se realizó a través del algoritmo BLAST en la base de datos del NCBI (National Centre for Biotechnology Information, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>). También se empleó el servidor EzBioCloud (<https://www.ezbiocloud.net/>; Chalita *et al.*, 2024).

El segundo equipo, es un muestreador Coriolis μ (Bertin Technologies, Montigny-le-Bretonneux, Francia). El equipo recogió un total de 6000 L de aire a través de un contenedor con una solución (Triton X-1000 al 0,005%) en el que cualquier partícula presente en el aire queda retenida. Las muestras se mantuvieron en hielo hasta la llegada al laboratorio donde se procesaron directamente. Las muestras de aire en Triton-X-100 se filtraron utilizando un filtro de diámetro 0,22 μ m (Millipore, Billerica, EEUU), y el ADN se extrajo del filtro utilizando el Fast DNA SPIN Kit for Soil (MP Biomedicals, Solon, EEUU) siguiendo las instrucciones del fabricante. Las concentraciones

de ADN se cuantificaron mediante el fluorómetro Qubit 2.0 (Invitrogen, Carlsbad, EEUU). La secuenciación masiva (NGS) del ADN extraído se realizó en la empresa FISABIO (Valencia). Para la secuenciación de procariotas se amplificó las regiones V3 y V4 del ARN ribosómico 16S. Las secuencias de los cebadores utilizados fueron 341F (CCTACGGGNGGCWGCAG) y 805R (GACTACHVGGGTATCTAATCC) (Herlemann et al., 2011). Los datos sin procesar se trataron con QIIME2 versión 2019.10 (Bolyen et al., 2019), utilizando Illumina MiSeq y secuenciación de extremos emparejados de 2 × 300. Los datos de secuencias se procesaron utilizando el pipeline Qiime2 (Bolyen et al., 2019). El análisis taxonómico se realizó utilizando algunos de los complementos de Qiime2. La eliminación de ruido, la unión de los extremos emparejados y la eliminación de la quimera se realizaron a partir de los datos de los extremos emparejados utilizando el pipeline DADA2 (Callahan et al., 2016). Las afiliaciones taxonómicas se asignaron utilizando el clasificador Naive Bayes integrado en los complementos de Qiime2. La base de datos utilizada para la asignación taxonómica fue SILVA SSU 132 (Quast et al., 2013).

Resultados

Los puntos donde se efectuaron la toma de muestra en las cuevas Covadura y C3 correspondieron a las entradas de las cuevas, zona intermedia y final, así como en el exterior. Además, en Covadura se extendió el muestreo abarcando los dos primeros niveles de galerías (Tablas 1 y 2).

Las galerías de la Cueva Covadura y su exterior destacan por la abundante presencia de géneros y especies del filo *Bacillota*, entre ellos *Bacillus*, *Paenibacillus* y *Peribacillus*. Esta abundancia suele estar acompañada en las galerías por *Actinomycetota*, particularmente *Micrococcus luteus* y *Arthrobacter* spp., y en menor proporción *Streptomyces* spp. y *Rhodococcus erythropolis*. En la Cueva C3 los *Bacillota* están igualmente abundantemente representados, aunque presentan una mayor diversidad: *Bacillus*, *Peribacillus*, *Cytobacillus*, *Virgibacillus*, *Ureibacillus*, *Metabacillus*, *Terribacillus*, y *Paucisalibacillus*. *Peribacillus simplex* es muy abundante tanto en el exterior como en la entrada de la cueva, y más hacia el interior destaca *Ureibacillus chungkukjangi*. En el final de la cueva se encuentra la mayor diversidad, con 13 especies identificadas, entre las que destacan como más abundantes *Streptomyces pratensis*, *Paucisalibacillus globulus* y *Planococcus glaciei*.

Los datos de la secuenciación masiva arrojan resultados muy diferentes. Esta metodología llegó a identificar 1.199 géneros de bacterias entre las dos cuevas, de las cuales solo 34 presentaron abundancias relativas superiores al 2% en al menos una muestra. En la Tabla 3 se muestran los géneros más abundantes en el aire de las cuevas Covadura y C3 con valores >5%. De ellos solo *Streptomyces* y *Bacillus* fueron identificados entre las especies cultivables. Destacan las abundancias de *Acinetobacter* y *Enterobacteriaceae* en Covadura y de *Massilia* y *Nocardiosis* en C3, así como las abundancias de *Rubrobacter*, *Sphingomonas* y WD2101_soil_group en el exterior de las dos cuevas, aunque también presentes en el interior. En todas las muestras aparecen secuencias de cloroplastos debido a la homología entre estos y las secuencias del ARN ribosómico 16S de bacterias, aunque no con la abundancia reflejada en la muestra P-4 de la Cueva C3.

Cueva Covadura	UFC/m ³ *	Abundancia %	Identificación NCBI
P-1 Inicio galería inferior (a 125 m del exterior)	40 ± 0	57,1	<i>Micrococcus luteus</i> (= <i>M. yunnanensis</i>) 99,88%
		28,6	<i>Pseudarthrobacter oxydans</i> (= <i>A. oxydans</i>) 99,65%
		14,3	<i>Sporosarcina globispora</i> 99,77%
		38,9	<i>Micrococcus luteus</i> (= <i>M. yunnanensis</i>) 100%
		11,1	<i>Bacillus licheniformis</i> 100%
P-3 Intermedio galería inferior (a 180 del exterior)	90 ± 80	11,1	<i>Phyllobacterium myrsinacearum</i> 98,03%
		5,6	<i>Streptomyces</i> sp. (<i>S. pratensis</i> / <i>S. cyaneofuscatus</i>) 100%
		5,6	<i>Terribacillus saccharophilus</i> 99,89%
		22,2	<i>Arthrobacter pascens</i> 99,77%
		5,6	<i>Streptomyces lavendulae</i> 99,88%
P-4 Final galería inferior (a 280 m del exterior)	20 ± 10	25,0	<i>Bacillus</i> sp. (<i>B. toyonensis</i> / <i>B. thuringiensis</i>) 99,66%
		50,0	<i>Bacillus mojavenensis</i> 99,77%
		25,0	<i>Bacillus cereus</i> 100%
		23,1	<i>Erwinia endophytica</i> 98,01%
		30,8	<i>Peribacillus simplex</i> 100%
P-6 Galería superior (a 110 m del exterior)	70 ± 40	15,4	<i>Micrococcus luteus</i> (= <i>M. yunnanensis</i>) 100%
		7,7	<i>Streptomyces</i> sp. (<i>S. globisporus</i> / <i>S. rubiginosohelvolus</i>) 99,88%
		15,4	<i>Frigoribacterium endophyticum</i> 99,65%
		7,7	<i>Rhodococcus erythropolis</i> 99,88%
		38,5	<i>Bacillus mojavenensis</i> 100%
P-7 Exterior	70 ± 40	7,7	<i>Paenibacillus lautus</i> 100%
		38,5	<i>Peribacillus simplex</i> 100%
		15,4	<i>Bacillus atrophaeus</i> 99,89%

*Los valores corresponden al promedio de dos réplicas con errores estándar, expresados como Unidades Formadoras de Colonias por m³ de aire muestreado.

Tabla 1. Bacterias cultivables identificadas en el aire de la Cueva Covadura

La Tabla 4 muestra otros géneros abundantes en el aire de ambas cuevas, que aparecieron con una abundancia relativa >2%, en al menos uno de los puntos de muestreo. De todos estos géneros solo *Rhodococcus* apareció entre las bacterias cultivables. La mayoría de los géneros representados en la Tabla 4 se encuentran tanto en Covadura como en C3, si bien algunos géneros presentan abundancias mayores en el aire del exterior que en el de las dos cuevas. Estos son *Rhodococcus*, 67-14, *Acidimicrobiia* y *Frankiales* no cultivables (*Actinomycetota*), JG30-KF-CM45 y AKIW781 (*Chloroflexota*), y *Rhizobiales* no cultivables (*Pseudomonadota*).

Discusión y conclusiones

Existe un consenso general por el que se considera que el estudio de los microorganismos cultivables y no cultivables, empleando ambas técnicas, son complementarios. Los estudios basados en el cultivo de microorganismos tienen sus limitaciones, ya que los no cultivables en las condiciones específicas de laboratorio permanecen sin detectar, aún a pesar de su abundancia, y además puede aparecer una sobrerrepresentación de bacterias formadoras de esporas, que posiblemente no se corresponda con su abundancia real.

Cueva C3	UFC/m ³	Abundancia %	Identificación NCBI
P-1 Entrada (a 37 m del exterior)	260 ± 110	16,3	<i>Bacillus atrophaeus</i> 100%
		71,4	<i>Peribacillus simplex</i> 100%
		4,1	<i>Micrococcus luteus</i> (= <i>M. yunnanensis</i>) 99,76%
		4,1	<i>Cytobacillus oceanisediminis</i> 99,89%
		4,1	<i>Micrococcus antarcticus</i> 100%
P-2 Intermedio (a 62 m del exterior)	50 ± 30	20,0	<i>Micrococcus endophyticus</i> 99,88%
		10,0	<i>Macrococcus equiperficus</i> 100%
		10,0	<i>Virgibacillus jeotgali</i> 99,33%
		50,0	<i>Ureibacillus chungkukjangi</i> 99,89%
		10,0	<i>Micrococcus luteus</i> (= <i>M. yunnanensis</i>) 100%
P-4 Final (a 107 m del exterior)	120 ± 30	8,3	<i>Streptomyces exfoliatus</i> 99,76%
		4,2	<i>Metabacillus litoralis</i> 98,70%
		4,2	<i>Micrococcus luteus</i> (= <i>M. yunnanensis</i>) 100%
		8,3	<i>Micrococcus endophyticus</i> 100%
		4,2	<i>Terribacillus saccharophilus</i> 99,89%
		16,7	<i>Streptomyces pratensis</i> 99,76%
		12,5	<i>Paucisalibacillus globulus</i> 98,10%
		4,2	<i>Frigoribacterium faeni</i> 99,88%
		8,3	<i>Microbacterium saccharophilum</i> 99,76%
		12,5	<i>Planococcus glaciei</i> 99,76%
P-7 Exterior	180 ± 50	8,3	<i>Peribacillus simplex</i> 99,89%
		4,2	<i>Cellulosimicrobium composti</i> 99,88%
		4,2	<i>Cellulosimicrobium cellulans</i> 100%
		51,5	<i>Peribacillus simplex</i> 100%
		39,4	<i>Priestia endophytica</i> 100%
		6,1	<i>Pantoea vagans</i> 99,75%
		3,0	<i>Bacillus altitudinis</i> 100%

Tabla 2. Bacterias cultivables identificadas en el aire de la Cueva C3

Los estudios basados en el cultivo e identificación de microorganismos presentes en el aire exterior muestran que las bacterias Gram positivas formadoras de esporas (*Bacillus* y otros géneros relacionados dentro del filo *Bacillota*, así como *Micrococcus*) son usualmente los grupos más abundantes, mientras que la presencia de bacterias Gram negativas es mucho menor (Lighthart, 1997; Zhu *et al.*, 2003). Esto también se cumple en las cuevas (Dominguez-Moñino *et al.*, 2021 a). Sin embargo, esta tendencia no se refleja en los estudios de NGS, que muestran una inesperada abundancia y diversidad de bacterias Gram negativas en el aire (Yooseph *et al.*, 2013), como también se ha puesto de manifiesto en este estudio de las cuevas en yesos (Tablas 3 y 4).

Comparando las identificaciones de la fracción cultivable obtenidas en las cuevas Covadura y C3, solo cuatro especies son comunes a ambas cuevas: *Micrococcus luteus* (= *M. yunnanensis*), *Streptomyces pratensis*, *Terribacillus saccharophilus* y *Peribacillus simplex*. Esta última especie se encontró tanto en el interior como en el exterior de ambas cuevas. *Bacillus atrophaeus* se recogió en el exterior de Covadura y en el interior de C3.

Si se confrontan los resultados de las bacterias cultivables y las identificadas por NGS, ninguna de las especies aisladas en las cuevas Covadura y C3 (Tablas 1 y 2) aparecen representadas entre las 2.453 especies de bacterias identificadas por secuenciación masiva. Ello resulta sorprendente y plantea muchas dudas sobre la complementariedad de los datos obtenidos entre ambos métodos. ¿Es posible que las esporas presentes en el aire no sean detectables por NGS al no poder extraerse su ADN, mientras que las que se cultivan se detectan por la extracción de ADN de su biomasa?

La mayoría de las bacterias cultivables están incluidas en el grupo de las formadoras de endosporas y existe abundante evidencia sobre la dificultad de extraer ADN de estas esporas (Wielinga *et al.*, 2011; Mertens *et al.*, 2014). Otros autores indican que el tipo de kit utilizado para la extracción de ADN condicionan los resultados de los análisis (Soliman *et al.*, 2017). Es factible esperar que las muestras obtenidas para el estudio por NGS contengan bacterias formadoras de endosporas y estas sean resistentes a muchos de los métodos tradicionales de extracción de ADN, y por ello potencialmente indetectables.

Filippidou *et al.* (2015) señalaron que no todas las especies microbianas reaccionan de la misma manera a la extracción de ADN, principalmente debido a la diversidad de estados morfológicos y fisiológicos de las bacterias ambientales, y que por ello las *Bacillota* (bacterias formadoras de endosporas) están infrarrepresentadas en las librerías metagenómicas.

¿Qué forma se tiene de comprobar que los datos obtenidos en el aire de las cuevas por NGS pertenecen realmente a comunidades microbianas de cuevas? En un estudio NGS no publicado de los biofilms blancos y amarillos presentes en las paredes de estas dos cuevas se encontraron una evidente similitud entre los géneros y especies presentes en el aire, como mostramos en esta investigación, y en los biofilms. En efecto, en los biofilms, que se extendían por las paredes de Covadura y C3, se encontraron que los géneros más abundantes correspondieron a *Crossiella*, *Euzebyaceae* no cultivable, y 0319-7134 (*Actinomycetota*), y a los no cultivables wb1-P19 y Ga0077536 (*Pseudomonadota*). Otros géneros no cultivables y representativos en los biofilms fueron JG30-KF-CM45 y AKIW781 (*Chloroflexota*), WD2101_soil_group

Filo	Clase	Orden	Familia	Género	Cueva Covadura**							Cueva C3**		
					P-1	P-3	P-4	P-6	P-7	P-1	P-2	P-4	P-2	P-4
Actinomycetota	Rubrobacteria	Rubrobacterales	Rubrobacteriaceae	Rubrobacter	0,39	1,04	0,94	1,47	2,21	1,63	4,94	0,70	5,70	
Actinomycetota	Actinobacteria	Streptomycetales	Streptomycetaceae	Streptomyces	0,42	0,99	0,78	1,40	0,35	6,37	1,90	0,30	0,14	
Actinomycetota	Actinobacteria	Streptosporangiales	Nocardioles	Nocardopsis	0,64	0,05	0,41	0,12	0,29	0,33	10,92	0,05	0,00	
Cyanobacteria	Cyanobacteria	Chloroplast	Chloroplast	Chloroplast	0,34	1,08	1,12	0,38	1,48	0,97	0,29	12,39	0,14	
Bacillota	Bacilli	Bacillales	Bacillaceae	Bacillus	0,92	1,62	0,60	1,79	0,70	5,61	1,67	0,30	0,13	
Planctomycetota	Physisphaerae	Teptidysphaerales	WD2101_soil_group	WD2101_soil_group	0,35	1,28	2,49	0,69	2,35	0,23	0,55	2,45	5,95	
Pseudomonadota	Alphaproteobacteria	Sphingomonadales	Sphingomonadaceae	Sphingomonas	4,22	2,77	4,89	2,37	3,54	0,50	0,89	5,22	1,31	
Pseudomonadota	Gammaproteobacteria	Burkholderiales	Oxalobacteraceae	Massilia	1,46	1,42	1,55	0,65	1,41	26,05	7,63	2,11	0,02	
Pseudomonadota	Gammaproteobacteria	Pseudomonadales	Moraxellaceae	Acinetobacter	36,57	0,08	0,07	0,23	0,12	0,46	1,80	0,02	0,00	
Pseudomonadota	Gammaproteobacteria	Enterobacterales	Enterobacteriaceae	—	9,89	0,03	0,02	0,08	0,02	0,04	0,02	0,01	0,01	

*Abundancia relativa superior al 5% en al menos una muestra. ** La localización de las muestras (P-1, P-2, P-3, P-4, P-6 y P-7) en las cuevas están descritas en las tablas 1 y 2, respectivamente.

Tabla 3. Géneros bacterianos no cultivables más abundantes (>5%*) en el aire de las cuevas Covadura y C3

Filo	Clase	Orden	Familia	Género	Cueva Covadurra**							Cueva C3**						
					P-1	P-3	P-4	P-6	P-7	P-1	P-2	P-4	P-7	P-1	P-2	P-4	P-7	
Actinomycetota	Actinobacteria	Propionibacteriales	Nocardioideaceae	Nocardioides	0,90	2,79	3,19	3,39	2,21	0,82	1,63	2,86	0,49					
Actinomycetota	Actinobacteria	Frankiales	Geodermatophilaceae	Modestobacter	0,34	1,11	2,38	0,46	1,20	0,05	0,10	2,26	0,08					
Actinomycetota	Actinobacteria	Frankiales	Geodermatophilaceae	Blastococcus	0,44	1,15	2,18	1,02	4,16	0,44	0,65	2,72	2,54					
Actinomycetota	Actinobacteria	Frankiales	No cultivable	No cultivable	0,12	0,50	1,25	0,19	2,11	0,14	0,21	0,88	0,19					
Actinomycetota	Actinobacteria	Pseudonocardiales	Pseudonocardiaceae	Pseudonocardia	0,70	1,55	1,28	2,12	1,42	0,55	0,65	0,92	0,44					
Actinomycetota	Actinobacteria	Pseudonocardiales	Pseudonocardiaceae	Crossiella	1,78	3,37	1,20	4,47	0,85	4,56	2,50	0,33	1,03					
Actinomycetota	Actinobacteria	Euzebyales	Euzebyaceae	No cultivable	0,20	0,35	0,17	0,37	0,08	2,06	0,57	0,09	0,19					
Actinomycetota	Actinobacteria	Corynebacteriales	Nocardiaceae	Rhodococcus	0,04	0,16	0,02	0,12	0,03	0,18	0,56	0,04	3,37					
Actinomycetota	Thermoleophilota	Solirubrobacterales	67-14	67-14	0,45	0,85	0,64	1,53	0,63	0,19	0,57	0,55	2,06					
Actinomycetota	Acidimicrobiota	-	-	-	0,00	0,16	0,08	0,10	0,18	0,00	0,11	0,07	2,29					
Bacillota	Bacilli	Staphylococcales	Staphylococcaceae	Staphylococcus	0,11	0,48	0,08	0,40	0,08	0,91	2,27	0,00	0,00					
Bacteroidota	Bacteroidia	Cytophagales	Hymenobacteraceae	Hymenobacter	0,28	1,21	3,22	0,40	2,89	0,28	0,31	3,19	0,01					
Chloroflexota	Chloroflexia	Thermomicrobiales	JG30-KF-CM45	JG30-KF-CM45	0,33	1,00	0,94	0,97	0,92	0,32	0,71	0,57	4,39					
Chloroflexota	Chloroflexia	Kallotenuales	AKIW781	AKIW781	0,12	0,41	0,85	0,38	1,47	0,13	0,06	0,53	2,93					
Pseudomonadota	Gammaaproteobacteria	Nitrosococcales	Nitrosococcaceae	wb1-P19	1,18	1,95	0,72	4,17	0,29	0,01	0,19	0,14	0,01					
Pseudomonadota	Gammaaproteobacteria	Pseudomonadales	Pseudomonadaceae	Pseudomonas	2,15	0,51	0,11	0,63	0,18	3,20	1,93	0,07	0,00					
Pseudomonadota	Alphaproteobacteria	Rhizobiales	Beijerinckiaceae	Methyllobacterium-Methylorubrum	0,44	1,36	1,92	0,52	1,04	0,24	0,71	2,13	0,01					
Pseudomonadota	Alphaproteobacteria	Rhizobiales	Beijerinckiaceae	Microvirga	0,26	1,20	1,70	0,91	2,68	0,70	0,45	1,92	1,11					
Pseudomonadota	Alphaproteobacteria	Rhizobiales	Hypomicrobiaceae	Pedomicrobium	1,03	0,81	0,19	0,45	1,29	1,53	3,47	0,17	0,00					
Pseudomonadota	Alphaproteobacteria	Rhizobiales	No cultivable	No cultivable	0,05	0,29	0,55	0,27	0,16	0,08	0,01	0,46	2,12					
Pseudomonadota	Alphaproteobacteria	Rhodobacterales	Rhodobacteraceae	Rubellimicrobium	0,39	1,18	2,84	0,80	2,16	0,27	0,50	2,43	0,58					
Pseudomonadota	Alphaproteobacteria	Acetobacterales	Acetobacteraceae	Roseomonas	0,79	0,96	2,10	0,28	1,26	0,07	0,34	1,49	0,07					
Pseudomonadota	Alphaproteobacteria	Caulobacterales	Caulobacteraceae	No cultivable	0,74	0,63	0,10	0,22	1,35	1,26	2,32	0,19	0,01					
Myxococota	Polyangia	Haliangiales	Haliangiaceae	Haliangium	2,26	0,28	0,14	0,42	0,24	0,16	0,28	0,35	0,16					

*Abundancia relativa superior al 2% en al menos una muestra. ** La localización de las muestras (P-1, P-2, P-3, P-4, P-6 y P-7) en las cuevas están descritas en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

Tabla 4. Otros géneros no cultivables abundantes (>2%*) en el aire de las cuevas Covadurra y C3

(*Planctomycetota*), y 67-14 (*Actinomycetota*). Todos ellos estaban también representados en el aire con mayor o menor abundancia relativa (Tablas 3 y 4).

Una posible explicación a estas similitudes fue revelada por Martín-Pozas et al. (2024 b), quienes estudiaron la composición de los biofilms de la Cueva de La Garma y la compararon con las bacterias aisladas del aire, encontrando que las especies más abundantes en el aire: *Streptomyces cyaneofuscatus*, *Streptomyces pratensis*, *Streptomyces avidinii*, *Peribacillus simplex*, *Bacillus licheniformis*, *Rhodococcus erythropolis* y *Stenotrophomonas maltophilia*, también se aislaban de los biofilms. Estos autores concluyeron que las bacterias de los biofilms y sedimentos de la cueva se liberaban al aire por las actividades antropogénicas (excavaciones arqueológicas, pisadas de los visitantes que removían los biofilms, así como por corrientes de aire, etc.).

Si se comparan las bacterias presentes en el aire de las cuevas en yesos con cuevas calizas andaluzas (Gruta de las Maravillas, Ardales y Tesoro) se observa una constante en todas ellas, la abundante presencia de *Micrococcus luteus* (= *M. yunnanensis*). En Ardales, además abundan diversas especies de *Arthrobacter* y *Pseudoarthrobacter*, y en Tesoro y Gruta de las Maravillas *Micrococcus endophyticus* (Dominguez-Moñino et al., 2021 a). Destacan en las cuevas calizas la baja abundancia y diversidad de especies de *Bacillus* y géneros relacionados, tan abundantes en las cuevas en yesos, lo que se relaciona con una menor humedad relativa en las cuevas de Sorbas y la producción de endosporas por las especies del filo *Bacillota*.

En conclusión, las bacterias presentes en el aire de las cuevas Covadura y C3, detectadas por NGS, también se encuentran en los biofilms de las paredes, y posiblemente en los sedimentos, lo que da idea de que la microbiota del aire está relacionada con las comunidades microbianas existentes en las cuevas. La abundancia de géneros y especies de los filos *Bacillota* (*Bacillus* y otros géneros relacionados filogenéticamente) y *Actinomycetota* (*Micrococcus*, *Streptomyces*, etc.) entre las bacterias cultivables, generalmente ausentes en las librerías NGS o con muy baja abundancia relativa, posiblemente se deba a la dificultad de extraer el ADN de las endosporas.

Agradecimientos

Se agradece la financiación de los proyectos PID2019-110603RB-I00 y PID2020114978GB-I00, MCIN/AEI/FEDER, UE/10.13039/501100011033 del Ministerio de Ciencia e Innovación. Esta es una contribución de la Plataforma Temática Interdisciplinar del CSIC, Patrimonio Abierto: Investigación y Sociedad (PTI-PAIS).

Referencias

- Bolyen, E., Rideout, J.R., Dillon, M.R., Bokulich, N.A., Abnet, C., Al-Ghalith, G.A., et al. 2019. Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2. *Nature Biotechnology* 37, 852–857.
- Callahan, B.J., McMurdie, P.J., Rosen, M.J., Han, A.W., Johnson, A.J., Holmes, S.P. 2016. DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data. *Nature Methods* 13, 581–583.
- Chalita, M., Kim, Y.O., Park, S., Oh, H.S., Cho, J.H., Moon, J., et al. 2024. EzBioCloud: a genome-driven

- database and platform for microbiome identification and discovery. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 74, 006421.
- Del Rosal Padial, Y., Martínez Manzanares, E., Marín Girón, F., Liñán Baena, C., Simón Vallejo, M.D. 2007. Análisis de la calidad microbiológica aérea en el interior de la Cueva de Nerja. En: *Cuevas Turísticas: Aportación al Desarrollo Sostenible*. J.J. Durán Valsero, P.A. Robledo Ardila, J. Vázquez (eds.). pp. 181–190
- Dominguez-Moñino, I., Jurado, V., Rogerio-Candelera, M.A., Hermosin, B., Saiz-Jimenez, C. 2021 a. Airborne bacteria in show caves from Southern Spain. *Microbial Cell* 8, 247–255.
- Dominguez-Moñino, I., Jurado, V., Rogerio-Candelera, M.A., Hermosin, B., Saiz-Jimenez, C. 2021 b. Airborne fungi in show caves from Southern Spain. *Applied Sciences* 11, 5027.
- Fernández Cortés, A. 2004. Caracterización microclimática de cavidades y análisis de la influencia antrópica de su uso turístico. Tesis Doctoral, Universidad de Almería.
- Filippidou, S., Junier, T., Wunderlin, T., Lo, C-C., Li, P-E., Chain, P.S., et al. 2015. Under-detection of endospore-forming *Firmicutes* in metagenomic data. *Computational and Structural Biotechnology Journal* 13, 299–306.
- Galán Soldevilla, C., Cariñanos González, P., Alcázar Teno, P., Domínguez Vilches, E. 2007. Manual de Calidad y Gestión de la Red Española de Aerobiología. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba.
- García-Anton, E., Cuezva, S., Jurado, V., Porca, E., Miller, A.Z., Fernández-Cortés, A., et al. 2014. Combining stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$) of trace gases and aerobiological data to monitor the entry and dispersion of microorganisms in caves. *Environmental Science and Pollution Research* 21, 473–484.
- González-Pimentel, J.L., Domínguez-Moñino, I., Jurado, V., Laiz, L., Caldeira, A.T., Saiz-Jimenez, C. 2022. The rare actinobacterium *Crossiella* sp. is a potential source of new bioactive compounds with activity against bacteria and fungi. *Microorganisms* 10, 1575.
- Herlemann, D.P., Labrenz, M., Jürgens, K., Bertilsson, S., Waniek, J.J., Andersson, A.F. 2011. Transitions in bacterial communities along the 2000 km salinity gradient of the Baltic Sea. *The ISME Journal*. 5, 1571–1579.
- Lancia, A., Capone, P., Vonesch, N., Pelliccioni, A., Grandi, C., Magri, D., et al. 2021. Research progress on aerobiology in the last 30 years: A focus on methodology and occupational health. *Sustainability* 13, 4337.
- Lighthart, B. 1997. The ecology of bacteria in the alfresco atmosphere. *FEMS Microbiology Ecology* 23, 263–274.
- Martin-Pozas, T., Nováková, A., Jurado, V., Cuezva, S., Fernández-Cortés, A., Saiz-Jimenez, C., et al. 2024 a. A second fungal outbreak in Castañar Cave, Spain, discloses the fragility of subsurface ecosystems. *Microbial Ecology* 87, 53.
- Martin-Pozas, T., Fernández-Cortés, A., Cuezva, S.; Jurado, V., González-Pimentel, J.L.; Hermosin, B., et al. 2024 b. Microclimate, airborne particles, and microbiological monitoring protocol for conservation of rock-art caves: The case of the world-heritage site La Garma Cave (Spain). *Journal of Environmental Management* 351, 119762.
- Martin-Sánchez, P.M., Saiz-Jimenez, C. 2014. Contribution of culture-independent methods to cave aerobiology: The case of Lascaux Cave. En: Saiz-Jimenez, C. (ed.), *The Conservation of Subterranean Cultural Heritage*, CRC Press/Balkema, Leiden, pp. 215–222.
- Martin-Sánchez, P.M., Jurado, V., Porca, E., Bastian, F., Lacanette, D., Alabouvette, C., et al. 2014. Airborne microorganisms in Lascaux Cave (France). *International Journal of Speleology* 43, 295–303.
- Mertens, K., Freund, L., Schmoock, G., Hansel, C., Melzer, F., Elschner, M. C. 2014. Comparative evaluation of eleven commercial DNA extraction kits for real-time PCR detection of *Bacillus anthracis* spores in spiked dairy samples. *International Journal of Food Microbiology* 170, 29–37.
- Quast, C., Pruesse, E., Yilmaz, P., Gerken, J., Schweer, T., Yarza, P., et al. 2013. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools. *Nucleic Acids Research*. 41, D590–D596.

- Šanti-Temkiv, T., Amato, P., Casamayor, E.O., Lee, P.K.H., Pointing, S.B. 2022. Microbial ecology of the atmosphere. *FEMS Microbiology Reviews* 46, 1–18.
- Soliman, T., Yang, S-Y., Yamazaki, T., Jenke-Kodama, H. 2017. Profiling soil microbial communities with next-generation sequencing: the influence of DNA kit selection and technician technical expertise. *PeerJ* 5, e4178.
- Thombre, R.S., Kaur, K., Jagtap, S.S., Dixit, J., Vaishampayan, P.V. 2022. Microbial life in space. En: *New Frontiers in Astrobiology*, Elsevier, pp. 135–166.
- Wielinga, P. R., de Heer, L., de Groot, A., Hamidjaja, R. A., Bruggeman, G., Jordan, K., et al. 2011. Evaluation of DNA extraction methods for *Bacillus anthracis* spores spiked to food and feed matrices at biosafety level 3 conditions. *International Journal of Food Microbiology* 150, 122–127.
- Yoo, K., Lee, T.K., Choi, E.J., Yang, J., Shukla, S.K., S.H., Park, J. 2017. Molecular approaches for the detection and monitoring of microbial communities in bioaerosols: A review. *Journal of Environmental Sciences* 51, 234–242.
- Yooseph, S., Andrews-Pfannkoch, C., Tenney, A., McQuaid, J., Williamson, S., Thiagarajan, M., et al. 2013. A metagenomic framework for the study of airborne microbial communities. *PLoS One* 8, e81862
- Zhu, H., Phelan, P.E., Duan, T., Raupp, G.B., Fernando, H.J.S., Che, F. 2003. Experimental study of indoor and outdoor airborne bacterial concentrations in Tempe, Arizona, USA. *Aerobiologia* 19, 201–211.

La monitorización hidrológica en la Cueva de las Güixas como herramienta clave en la gestión turística de la cavidad

Giménez Portero, R.⁽¹⁾, Moreno Caballud, A.⁽¹⁾, Luetscher, M.⁽²⁾, Ezquerro Ruiz, L.⁽³⁾, Benito Ferrández, G.⁽⁴⁾, Bartolomé Úcar, M.⁽⁴⁾

(1) Departamento de Procesos Geoambientales y Cambio Global, Instituto Pirenaico de Ecología - CSIC, Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza, España.

rgimenez@ipe.csic.es; amoreno@ipe.csic.es

(2) Swiss Institute for Speleology and Karst Studies (SISKA), Rue de la Serre 68, 2300 La Chaux-de-Fonds, Switzerland. marc.luetscher@isska.ch

(3) Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid, España.

lopezque@ucm.es

(4) Departamento de Geología. Museo Nacional de Ciencias Naturales – CSIC, Calle José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid, España. benito@mncn.csic.es; mbart@mncn.csic.es

RESUMEN

Las cuevas ubicadas en niveles cercanos al nivel freático son propensas a sufrir inundaciones esporádicas que limitan su uso durante esos periodos temporales. Esto hace que la utilización de estas cuevas para su explotación turística no sea común, aunque se dan algunos casos en la Península Ibérica como la Cueva de las Güixas en los Pirineos. Esta cueva se ubica en el Macizo de Collarada, próxima al nivel freático. La galería habilitada para el turismo actúa como un rebosadero durante determinados eventos de precipitación y de deshielo, causando inundaciones ordinarias de la cavidad. Estos eventos de inundación ponen en riesgo a los visitantes, obligando al cierre transitorio de las instalaciones. Además, la cueva está expuesta a inundaciones extraordinarias, consecuencia de situaciones meteorológicas propias de alta montaña, que pueden inundar por completo la galería turística provocando pérdidas económicas considerables. El seguimiento de los niveles de agua en la zona freática de la cavidad durante cinco años, junto al registro de precipitaciones, ha permitido caracterizar mejor el funcionamiento hidrológico de la cavidad y así, conocer los periodos de mayor riesgo de inundación y estimar los tiempos de reacción de los niveles de agua en la cueva frente a los eventos de precipitación o deshielo. La información obtenida con este estudio proporciona las claves para una mejor gestión de las actividades y visitas programadas en la cueva, mitigando las pérdidas económicas generadas por las situaciones de cierre de la cueva debidas a las inundaciones. Además, se proponen medidas para la mejora de la predicción de inundaciones, ayudando así a aumentar la seguridad de los visitantes.

Palabras clave: cueva turística, hidrogramas, pérdidas económicas, riesgo de inundación, zona de montaña.

ABSTRACT

Caves located close to the water-table are prone to sporadic flooding, which limits their use during those periods. This made not common the use of this caves as show caves, although there are some cases in the Iberian Peninsula, such as the las Güixas cave in the Pyrenees. This cave is located in the Collarada Massif, close to the water table. The gallery used for tourism acts as an overflow during certain precipitation and thawing events, causing ordinary flooding of the cave. These flooding events put visitors at risk, forcing the temporary closure of the facilities. In addition, the cave is exposed to extraordinary flooding, as a result of meteorological conditions typical of high mountains, which can completely flood the tourist gallery, causing significant economic losses. Monitoring of the cave water levels in the phreatic zone during five years, together with records of rainfall and outside temperatures, has enabled us to better characterise the cave's hydrological dynamics and thus to understand the periods of greatest risk of flooding and to estimate the reaction times of water levels in the cave to precipitation or thawing events. The information obtained from this study provides the keys to better management of activities and visits scheduled in the cave, mitigating the economic losses generated by situations where the cave is closed due to flooding. In addition, measures are proposed to improve flood prediction, thus helping to increase visitor safety.

Keywords: economic losses, flood risk, hydrographs, mountain area, show cave.

Introducción

Las cuevas son lugares con importantes activos patrimoniales naturales y culturales. Las cuevas habilitadas para el turismo, suponen una excelente oportunidad para difundir el conocimiento y la concienciación del mundo subterráneo (Chiarini *et al.*, 2022; Cigna y Forti, 2013). En la actualidad, suponen un atractivo para millones de visitantes a nivel mundial, representando un importante recurso económico en el lugar en el que se ubican (Chiarini *et al.*, 2022; Rivas *et al.*, 2004). Las cuevas afectadas por inundaciones se clasifican como cuevas vinculadas a flujos de alta energía (Heaton, 1986), representando la minoría de las cuevas habilitadas para el turismo debido a la dificultad y al costo que supone tanto habilitarlas como mantenerlas (Cigna y Burri, 2000). Además, las cuevas que se inundan con frecuencia plantean un riesgo que solo se puede abordar mediante el conocimiento de la dinámica hidrológica. Estos sistemas kársticos tienen una respuesta no lineal a las precipitaciones, caracterizada por umbrales asociados a derivaciones hidrológicas que dificultan la evaluación del riesgo de inundación (Jeannin y Malard, 2018). Un aumento abrupto en los niveles de agua dentro de las cuevas, incluso en respuesta a una precipitación gradual, amenaza la seguridad de las personas presentes en la cueva. Dos ejemplos son el rescate de niños en 2018 en la cueva Tham Luang, Tailandia (Ahmed *et al.*, 2021), y un rescate de espeleólogos en España el mismo año (Bartolomé *et al.*, 2023). Las cuevas turísticas ubicadas en la zona epifreática requieren por tanto una evaluación precisa del peligro y el riesgo de inundaciones para garantizar que las actividades turísticas sean seguras y reducir las pérdidas económicas.

En la Península Ibérica, hay pocas cuevas turísticas afectadas por inundaciones periódicas u ocasionales, sin existir estudios enfocados a comprender la dinámica que genera las inundaciones que ofrezcan estrategias o ayuden en su gestión. En este trabajo se presentan los resultados de la monitorización hidrológica de cueva de Las Gúixas (Pirineo Central), situada en la zona epifreática del sistema kárstico de Collarada y sometida a los bruscos cambios hídricos de la alta montaña. La zona de la cueva habilitada para el turismo se encuentra cerca del nivel freático y sufre esporádicas inundaciones que obligan a modificar o restringir el régimen de visitas. El nivel del agua en la cueva puede cambiar rápidamente, como en 1974, cuando un accidente provocado por una subida repentina del nivel del agua provocó la muerte de un buceador durante la exploración del sifón principal. En 2012, una inundación extrema provocó la destrucción de las instalaciones del sector turístico de la cueva. En este estudio se ha realizado el seguimiento instrumental del nivel de agua en la cueva y de las precipitaciones para conocer su interrelación y completar el vacío de conocimiento sobre los cambios en el nivel del agua de la cueva como respuesta a las lluvias externas. El objetivo principal es mejorar nuestra comprensión de la dinámica hidrológica actual para proponer algunas acciones e inversiones encaminadas a la adaptación al riesgo de inundación, aumentando la rentabilidad de la cueva turística.

Localización y características de la cueva

La cueva de las Gúixas está situada en el sur del Pirineo Centro Occidental (NE de España) en la base del Macizo de Collarada (975 m s.n.m.) junto al río Aragón y cerca del pueblo de Villanúa (Fig. 1a). La primera apertura de la cueva al turismo se realizó en 1929, aunque se cerró con

el comienzo de la Guerra Civil Española (1936) y permaneció muchos años con distintos usos que implicaban su ocupación o visitas esporádicas. La actividad turística se retomó en 1996 y continúa en la actualidad, realizando visitas durante todo el año. Las visitas se han duplicado desde 2012, superando los 30.000 visitantes en la actualidad, y sus ingresos se han triplicado en el mismo periodo, convirtiéndose en el principal activo económico de Villanúa.

La cueva se desarrolla en los materiales carbonatados de la megacapa de Villanúa (Eoceno) y se corresponde con uno de los principales manantiales del sistema de Collarada. El clima en esta zona de montaña es de transición mediterráneo a oceánico. La temperatura media anual es de $\sim 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la precipitación total es de $\sim 1100\text{ mm}$. La mayor parte de las precipitaciones se producen entre octubre y mayo, asociadas a frentes atlánticos. Durante el verano, el anticiclón de las Azores impide la entrada de borrascas atlánticas mientras que los eventos convectivos son capaces de producir precipitaciones repentinas e intensas. La primavera y el otoño se ven afectados tanto por la dinámica alternada como por las fuentes de humedad, lo que provoca un clima lluvioso cambiante e inestable que resulta en la mayor cantidad de precipitación por evento (Giménez *et al.*, 2021).

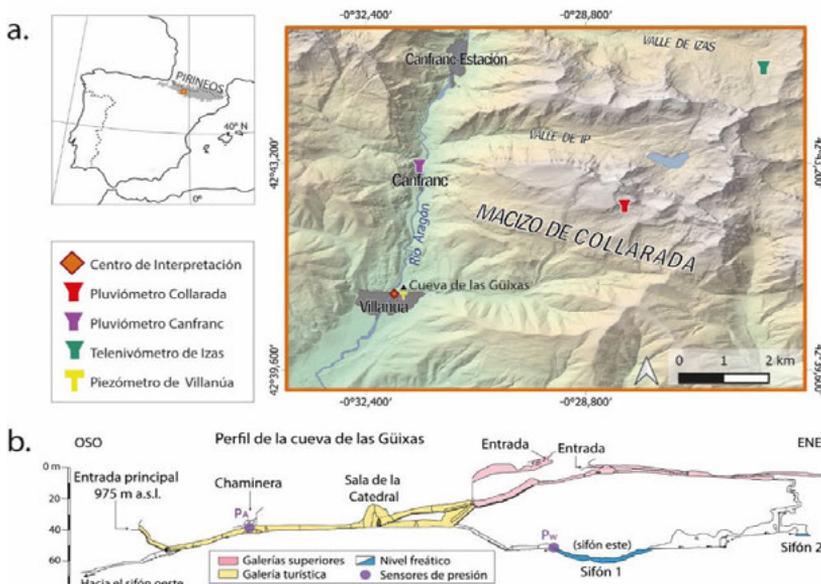


Figura 1. (a) Localización de los Pirineos, el Macizo de Collarada y la cueva de las Güixas con la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para la obtención de registros de datos. (b) Perfil de la cueva de las Güixas indicando las localizaciones más relevantes y los sensores utilizados para la monitorización hidrológica

La cueva tiene un desarrollo de $\sim 1100\text{ m}$ y un desnivel vertical de $\sim 67\text{ m}$, tratándose de una cueva poco profunda. Está conformada por tres niveles: i) el nivel inferior (freático), accesible solo mediante técnicas de buceo, comprende dos sifones explorados (Bengoetxea *et al.*, 1994) y varias galerías con un arroyo activo (Fig. 1b); ii) el nivel medio (epifreático), con 290 m de recorrido habilitado para el turismo, es hidrológicamente activo durante las inundaciones y; iii) el

nivel superior, que comprende varias galerías fósiles situadas en la zona más alta, restringidas al uso turístico por ser hábitat de varias especies de murciélagos. El nivel medio de la cueva, que corresponde con la galería turística, se conecta con el nivel inferior a través de una rampa (15 m de desnivel) que termina en el sifón este (Fig. 2), permanentemente inundado. En este nivel existe una corriente de agua permanente que, durante un régimen de caudal bajo, se filtra por una estrecha abertura localizada en la salida del sifón este (Fig. 2), para salir al exterior formando una surgencia sobre el lecho del río Aragón. Esta surgencia drena gran parte del agua del sistema kárstico de Collarada y está activa durante todo el año, con caudales entre 10 y 100 l/s durante el estiaje (Giménez *et al.*, en revisión), aunque puede llegar a secarse por completo durante sequías extremas. Cuando el nivel de agua sube, en respuesta a las precipitaciones o el deshielo, el agua que llega a la cueva no puede ser desalojada por la pérdida del sifón y asciende por la rampa hasta alcanzar la galería turística. A partir de ese momento el agua comienza a correr por la galería turística, que funciona como un rebosadero (*trop-plein*), inundando la mayor parte del recorrido con un torrente de gran actividad y obligando a cancelar las visitas. El agua que circula por la galería turística desaparece por el sifón oeste, situado cerca de la entrada turística (Fig. 1b).

Tras las excepcionales precipitaciones ocurridas en la cabecera del valle del Aragón entre el 19 y el 21 de octubre de 2012 (Serrano-Muela *et al.*, 2013), en las que se acumularon 235 mm de lluvia en Canfranc, la cueva se inundó por completo y la entrada turística actuó como un *trop-plein*. El sendero turístico permaneció bajo el agua, produciéndose grandes daños en barandillas, cables eléctricos y otras instalaciones. Tras este episodio, se instaló una alarma de inundación en la cueva para advertir de los niveles de agua peligrosos. El sistema de alarma se instaló en la rampa que conecta el nivel freático y la galería turística, y está formado por 3 sensores tipo boya instalados a diferentes alturas (niveles de inundación bajo, medio y alto en Fig. 2). Las alarmas se activan cuando el agua alcanza las boyas y se desactivan cuando dejan de flotar, momentos en los que el sistema envía un mensaje SMS al centro de interpretación y a los guías, y se activa en la cueva un sistema de alarmas luminosas que avisan del nivel alcanzado por el agua. En el caso de una subida repentina del nivel del agua durante una visita a la cueva, los guías están formados para evacuar a las personas fuera de la cueva, utilizando la entrada principal o una de las entradas superiores, dependiendo de su ubicación.

Metodología

El trabajo de monitorización hidrológica ha consistido en el seguimiento instrumental del nivel de agua subterránea y de las precipitaciones durante cinco años. En noviembre de 2017 se instaló un sensor de presión HOBO U20L-02 en el sifón este, bajo lámina de agua permanente (P_w en Fig. 1b) para registrar en continuo las variaciones del nivel de agua. Un segundo sensor del mismo tipo se instaló en la dolina de la cueva para medir la presión atmosférica (P_A en Fig. 1b). Estos sensores registran la presión cada 15 minutos y el nivel de agua se calcula compensando la presión atmosférica en el registro del sensor ubicado bajo el agua. Por otro lado, se recuperaron los mensajes de aviso enviados por el sistema de alarma de inundación, con la hora exacta de envío, como registro de la altura del agua en la cueva con resolución de minuto. Además, se evaluó la variación del nivel de agua registrado por un piezómetro en un sondeo de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) a 270 m de la cueva, a una altura de

958 m s.n.m. En cuanto al seguimiento de las precipitaciones, se obtuvieron datos de distintas estaciones meteorológicas en el exterior para el mismo periodo de tiempo. La cantidad de precipitación a intervalos de 15 minutos, se obtuvo de una estación de aforo de la CHE ubicada en el pueblo de Canfranc, 4 km al norte de la cueva (Fig. 1a). Los datos de espesor de nieve, con registro quinceminutal, se obtuvieron de la estación de la CHE ubicada en el valle de Izas (2086 m s.n.m.) a 10 km al norte de la cueva (Fig. 1a). Además, se instaló un pluviómetro junto al centro de interpretación de la cueva, donde se midió manualmente la cantidad de precipitación en cada evento (Giménez *et al.*, 2021 y nuevos datos). Se instaló un segundo pluviómetro a 2588 m en el macizo de Collarada, para medir la cantidad de precipitación y la temperatura a mayor altitud en la zona de infiltración, aunque este registro muestra largas interrupciones debidas a fallos derivados de las condiciones climáticas extremas sufridas en la alta montaña. Finalmente, se caracterizó la respuesta hidrológica para cada evento de inundación, analizando los hidrogramas y calculando el retardo de cada inundación como la diferencia de tiempo entre el centro de gravedad del hietograma de lluvia o deshielo y la punta de la inundación dada por el nivel máximo de agua en el hidrograma.

Resultados de la monitorización hidrológica

El registro de nivel de agua del sensor ubicado en el sifón de la cueva, muestra valores estables que aumentan durante eventos cortos de duración variable (unas pocas horas a varios días), en los que se observan las variaciones de agua durante las inundaciones de la zona turística. En estos eventos se producen rápidos ascensos y descensos del agua a través de la rampa, que coinciden con las activaciones de los sensores tipo boya (Fig. 2). Durante el pico de la inundación, las variaciones del nivel de agua registradas son mínimas (plano en el gráfico de la figura 2), debido al desbordamiento del agua por la galería turística que actúa como rebosadero, traduciéndose en un aumento y descenso del caudal que inunda la galería turística.

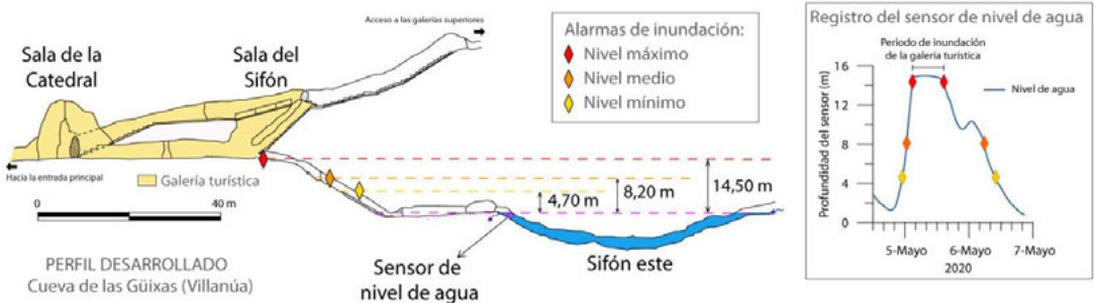


Figura 2. Topografía del final de la zona turística de la Cueva de las Güixas (salas de la Catedral y del Sifón) y la rampa descendente que conecta con el sifón. Los rombos indican la ubicación de los sensores que envían aviso cuando el nivel de agua alcanza su posición y el círculo morado la ubicación del sensor de nivel de agua. Se muestra un ejemplo de los datos registrados en el sensor de nivel de agua durante una inundación de la zona turística (registro quinceminutal) y las alarmas registradas (rombos) en los diferentes niveles de inundación a la hora en la que se emitió el mensaje de alerta

La comparación del registro de nivel de agua con los registros de precipitaciones y de deshielo (representados por los descensos en el espesor de la nieve), permiten diferenciar tres modos de inundación según el origen del agua infiltrada que la produce: lluvia, deshielo o una mezcla de ambas. Así, se observa que las precipitaciones son causa directa del aumento del nivel de agua, pero en primavera, la infiltración debida únicamente al deshielo es suficiente para producir una inundación. Durante el periodo de monitorización se registraron 52 eventos de inundación, de los cuales el 62% ocurrió en primavera, el 29% en otoño, el 7% en invierno y el 2% en verano. Se observa una tendencia decreciente en las inundaciones a lo largo del periodo monitorizado.

El registro del nivel de agua en la cueva, permite caracterizar cada inundación según la duración del evento, la altura máxima alcanzada por el agua (pico de inundación) y la velocidad de ascenso del agua por la rampa desde el sifón. La duración de la inundación en la galería turística es muy variable, desde menos de 2 horas para un evento causado por lluvia, hasta 55 horas para un evento causado por deshielo. La altura máxima alcanzada por el agua, una vez que sobrepasa el nivel de inundación (boya nivel máximo), se correlaciona positivamente con el caudal máximo que fluye por la galería turística y, por tanto, con la cantidad de agua aportada en el evento. La altura máxima alcanzada por el agua durante el periodo de monitorización es 16,4 m desde el sensor de presión. La velocidad de ascenso del agua a través de la rampa del sifón también es muy variable, desde 1 a 29 cm/min, ocurriendo los aumentos más rápidos en otoño. Las tasas bajas de ascenso generalmente se asocian con el deshielo, mientras que los aumentos rápidos del nivel del agua generalmente están relacionados con eventos de lluvia de alta intensidad.

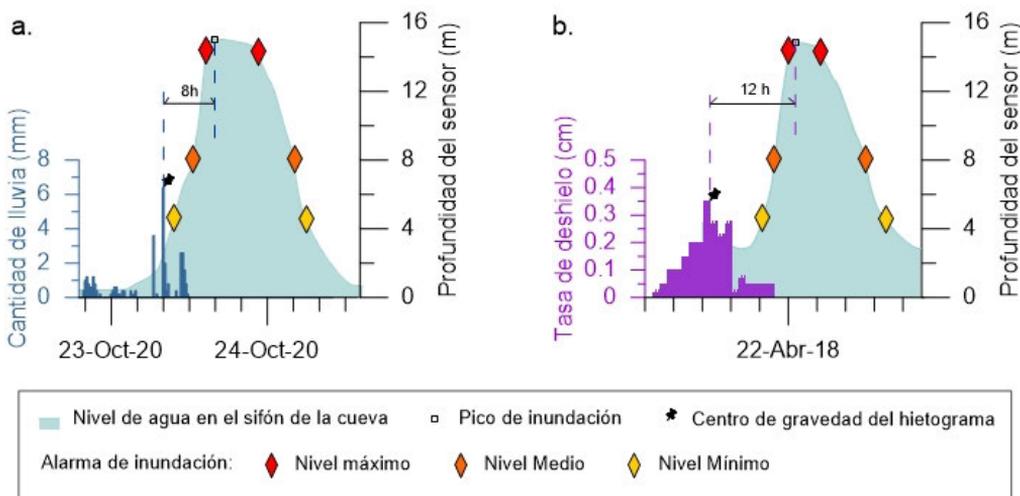


Figura 3. (a) Hidrograma de una inundación causada por un evento de precipitación el 23 de octubre de 2020. (b) hidrograma de una inundación causada por un evento de deshielo en abril de 2018

El análisis de los hidrogramas de las inundaciones, permite obtener el tiempo de respuesta de cada inundación respecto a las precipitaciones o el deshielo que la producen, definido

como retardo. Los hidrogramas muestran los tiempos de retardo como la diferencia entre el centro de gravedad del evento de precipitación o deshielo y el pico de la inundación (Fig. 3). El retardo de las inundaciones registradas es variable. Las inundaciones causadas por eventos de lluvia muestran tiempos de respuesta dependientes de la duración e intensidad del evento de precipitación. Los episodios de lluvia breves y aislados tienen un retardo de 8 ± 1 horas (Fig. 3). En el caso de episodios de lluvia prolongados, incluso de varios días, el retardo no es fácil de calcular debido a la dificultad de definir el episodio de lluvia que causa la situación de inundación, y los retardos suelen ser de más de 10 horas. Una vez que el nivel del agua es alto y la cueva se inunda, los retardos de los picos posteriores causados por lluvias posteriores, son mucho más cortos. En el caso de inundaciones causadas únicamente por el deshielo, los retardos son más largos y bastante estables, en torno a 12 ± 1 horas (Fig. 3). Cuando se combinan el deshielo y la lluvia, se requiere un análisis más detallado para obtener los retardos. En ocasiones, se observan varios picos durante un mismo evento de inundación, con retardos más variables y, por lo general, más largos.

Los aumentos del nivel de agua causados por eventos de lluvia, se compararon con los datos de precipitación de Canfranc, por disponer un registro continuo quinceminutal, necesario para poder analizar variaciones de intensidad a lo largo del evento de precipitación y determinar los tiempos de retardo con precisión. Esto implica suponer una distribución espacial uniforme de las precipitaciones en el macizo y en el valle. Sin embargo, algunos aumentos en el nivel de agua de la cueva que ocurren en verano, no se correlacionan con los datos de precipitación en Canfranc ni en Villanúa, mostrando una correlación con las precipitaciones en la zona de mayor altitud en Collarada, donde se ubica la principal zona de recarga del sistema kárstico. Esta situación muestra el efecto de la distribución de las precipitaciones a diferentes altitudes e ilustra la discrepancia entre el registro local de precipitaciones en el valle, donde se ubica la cueva y la recarga efectiva observada en la zona de infiltración. Lamentablemente, los pluviómetros instalados en Collarada no proporcionan datos de registro continuo para poder observar las irregularidades en la distribución de la lluvia durante el periodo de monitorización.

El registro del nivel piezométrico en el sondeo de Villanúa, muestra claras variaciones estacionales en un rango de 6 metros de altura (Fig. 4d). Durante el verano, se observan niveles de agua bajos (~ 952 m s.n.m.), coincidiendo con valores de infiltración nulos (Fig. 4). En otoño, cuando la recarga hidrológica del sistema kárstico es máxima por ser el periodo más lluvioso, el nivel piezométrico aumenta, mientras que el periodo con mayor volumen de agua almacenada corresponde al invierno y la primavera (~ 956 m s.n.m.). En estos periodos, la infiltración en la zona principal de recarga (por encima de ~ 1800 m s.n.m.) es la suma de la precipitación efectiva y la variación en el espesor de nieve (Fig. 4), con signo negativo en los momentos de acumulación de nieve. En invierno las nevadas limitan la recarga del sistema kárstico, observándose los niveles piezométricos más altos en primavera, cuando al agua del deshielo se suma el de lluvia.

Comparando los registros del nivel piezométrico y el nivel del agua de la cueva, se observa una altura de 956,75 m s.n.m. (-1,25 m desde la superficie) en el nivel de agua en el pozo, cuando el agua inunda la galería turística de la cueva de las Güixas, es decir, cuando el agua alcanza el nivel de 980 m s. n. m. en la cueva. Así, el registro de nivel piezométrico en el pozo, permite observar la variación estacional de los niveles de agua subterránea y las reacciones de

las crecidas que causan inundación en la cueva en los distintos momentos de disponibilidad hídrica. Las inundaciones se producen predominantemente en primavera, cuando el nivel freático es alto y la infiltración elevada (Fig. 4).

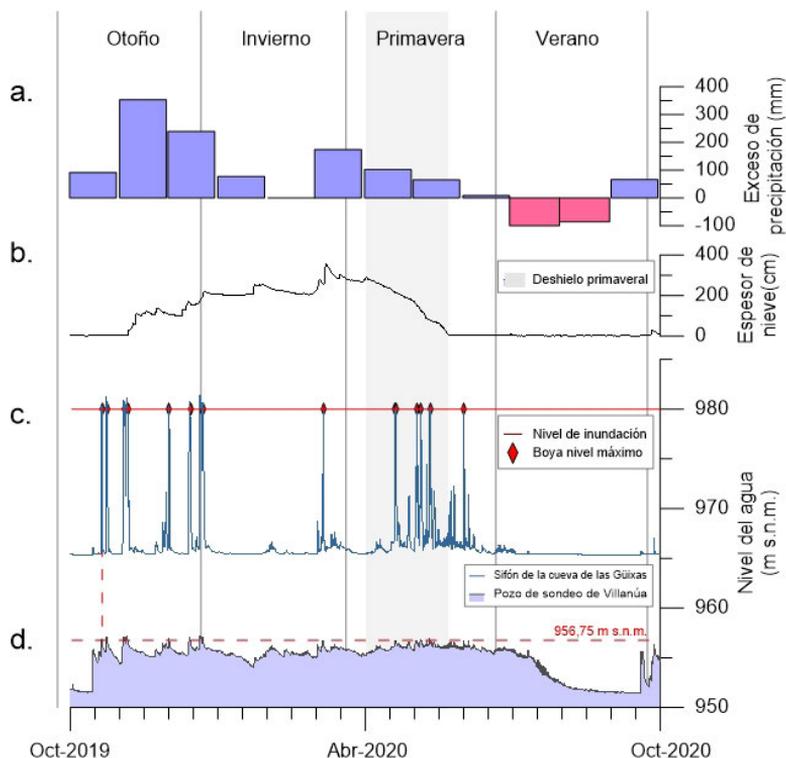


Figura 4. Registro del año hidrológico 2019-2020 como ejemplo de variación estacional de los niveles: (a) cantidad teórica de infiltración de lluvia aproximada como el exceso de precipitación, obtenido de la precipitación mensual menos la evapotranspiración potencial calculada según la fórmula de Thornwaite (1954). (b) espesor de nieve obtenido del telenivómetro en Izas (CHE). (c) nivel de agua en la cueva de las Gúixas y alarmas de nivel máximo de inundación (d) variación de nivel de agua registrada en el piezómetro en Villanúa

Estas observaciones permiten comparar cómo varía la cantidad de lluvia necesaria para producir una inundación, en relación a los valores de nivel de agua almacenada en el sistema kárstico. Así, cuando el nivel freático es alto (Fig. 5), como por ejemplo durante el deshielo, la cantidad de lluvia necesaria para producir una inundación es pequeña. Por el contrario, cuando nivel es bajo (Fig. 5), se necesita una precipitación mucho más abundante para llegar a inundar la cueva. Para los eventos causados solo por la lluvia, la frecuencia más alta de inundación ocurre para precipitaciones mayores de ~20 mm. Esta cantidad de lluvia puede ser menor para eventos de lluvia-inundación prolongados.

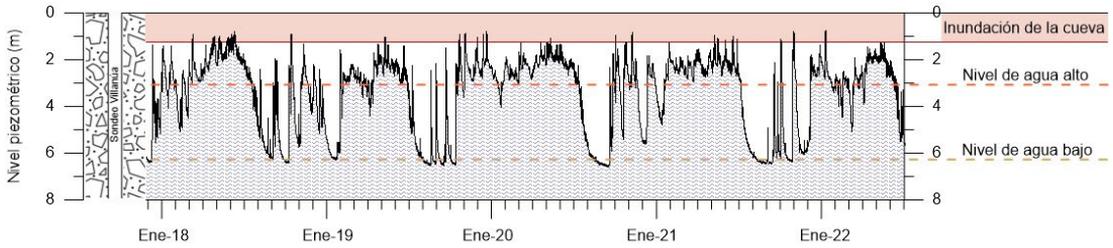


Figura 5. Nivel piezométrico, distancia desde superficie (cota 0, localizada 958 m s.n.m.) a la lámina de agua

Respuesta del nivel de agua en la cueva

Los aumentos bruscos del nivel del agua en la cueva indican una respuesta rápida a la precipitación y reflejan una recarga concentrada asociada a un sistema kárstico bien desarrollado. Durante las inundaciones, el retardo, la velocidad de ascenso del agua a lo largo de la rampa del sifón y la magnitud de la inundación son muy variables, dependiendo de la cantidad de agua almacenada y del tipo de precipitación. La distribución espacial de la lluvia, la duración de la precipitación y la intensidad a lo largo del evento determinan la respuesta del nivel de agua en la cueva. El tiempo de respuesta del nivel de agua frente al evento de precipitación es variable, aunque está principalmente controlado por el tipo de recarga asociado a la inundación. Después de varios días de lluvia o deshielo, con altos niveles de agua en el sistema, los tiempos de retardo pueden ser mucho más cortos y la cantidad de lluvia necesaria para la inundación puede ser mucho menor.

El control de la variación de los niveles de agua en el piezómetro, permite determinar periodos con baja frecuencia de inundación cuando el nivel de agua es bajo (próximo a 6 m en el nivel piezométrico, Fig. 5). En estos periodos, las inundaciones generadas por lluvias tienen retardos de ~8 horas, siendo necesario grandes cantidades de lluvia (más de ~40 mm) para generar una inundación. Por el contrario, cuando el nivel de agua se sitúa por encima del nivel alto (en torno a 3 m de nivel piezométrico), las inundaciones se pueden generar con menores cantidades de precipitación (a partir de ~20 mm), con un retardo similar de ~8 horas. Durante los periodos de deshielo, el agua infiltrada es predominantemente la que viene del deshielo, tomando el control de las variaciones del nivel freático y la respuesta de las inundaciones. Durante este periodo, las inundaciones causadas únicamente por eventos diarios de deshielo, tienen un retardo de ~12 horas, causando generalmente inundaciones de varias horas con su máximo durante la noche. La evolución del manto de nieve y su espesor total dirige la evolución de las inundaciones en la cueva. Cuando hay fuerte deshielo con gran cantidad de nieve acumulada, las inundaciones se hacen de mayor duración, pudiendo llegar a producirse varios picos diarios sin que el agua baje por debajo del nivel de inundación. Es cuando se producen los eventos de inundación de mayor duración (varios días). Si el espesor de nieve no es elevado o el deshielo es progresivo, las inundaciones producidas no afectan a la zona turística durante el día, esperándose un nivel creciente del caudal hacia la noche, y una bajada del nivel de agua al principio de la mañana. Esta información permite deducir y prever las inundaciones de la galería turística a partir del seguimiento de los niveles de agua freáticos (nivel piezométrico en el pozo de Villanúa), las precipitaciones y la temperatura como desencadenante del deshielo en primavera.

Por otro lado, los eventos de lluvia convectiva, que ocurren principalmente en verano, determinan una distribución irregular de la lluvia, concentrando grandes cantidades de agua de lluvia en pequeñas áreas, lo que dificulta el monitoreo de la recarga hidrológica efectiva. Por lo tanto, el carácter espacial de las tormentas de verano es un factor muy importante a considerar al evaluar la respuesta de los niveles de agua de la cueva a la lluvia.

Aplicación del estudio de monitorización hidrológica a la gestión del riesgo de inundación

Las inundaciones suponen el mayor reto para la correcta gestión de las visitas en la cueva de las Gúixas, especialmente durante los meses de primavera y otoño. La inundación de la zona turística obliga a cancelar las visitas, generando pérdidas económicas para la empresa gestora de la cueva. Las inundaciones de corta duración obligan a cerrar la cueva solo durante un corto periodo de tiempo (uno o dos días) y, en consecuencia, las visitas pueden reprogramarse, en la mayoría de los casos con cancelaciones mínimas. Sin embargo, estas inundaciones breves producen mayores pérdidas cuando coinciden con periodos de alta ocupación durante las vacaciones o periodos festivos en primavera y otoño (p.e. puentes de Todos los Santos, Semana Santa, etc.). Por otro lado, durante la primavera un gran número de escolares programan su visita a la cueva de las Gúixas todos los días laborables, pero también es cuando existe mayor riesgo de inundación. Durante la primavera de 2018, un deshielo prolongado debido a las condiciones meteorológicas y de espesor de la capa de nieve, mantuvo las alarmas activas durante un total de 45 días, produciendo el periodo con mayor número de días con la cueva cerrada al público y coincidiendo con la totalidad de la temporada escolar. Una vez que el sistema de alarma de inundación se activa en nivel mínimo, permanece activo hasta que el agua desciende por debajo de ese nivel. Tradicionalmente, cuando se activa el aviso de nivel mínimo, las visitas se cancelan inmediatamente para evitar cualquier riesgo y la cueva permanece cerrada al público mientras la alarma está activa, incluso si el nivel del agua está bajando hacia la zona del sifón. Esto ejemplifica una gestión responsable de las visitas poniendo la seguridad como prioridad, aunque también genera las mayores pérdidas económicas debidas al cierre de la cueva por inundación en primavera. La formación de los gestores y guías en la hidrodinámica del sistema de cuevas es clave para una gestión adecuada del riesgo de inundación, lo que permite además disminuir las pérdidas ocasionadas por la cancelación de visitas. Los resultados de este estudio son fundamentales para mejorar la formación de los guías y gestores, capacitándolos para poder anticipar las inundaciones y reducir las incertidumbres de su predicción. Conocer los periodos de mayor frecuencia y probabilidad de inundaciones, facilita la organización de visitas y eventos especiales en la cueva. Conocer el tiempo de respuesta hidrológica es una herramienta importante para anticipar el cierre de la cueva y organizar los horarios de visita, mejorando el servicio de reservas durante los periodos de crecida. Conocer la respuesta de los niveles de agua durante el periodo de deshielo, permite mantener la cueva abierta a los visitantes cuando el nivel de agua es alto pero no existe riesgo de inundación (en ausencia de precipitaciones), en particular cuando el nivel de agua está bajando. Finalmente, aproximar la cantidad de precipitación necesaria para producir una inundación, permite predecir una inundación con antelación. Por otro lado, la distribución irregular de las precipitaciones complica la predicción de inundaciones cuando los eventos son causados por lluvias en la zona de alta montaña. La instalación de pluviómetros en la zona de infiltración (~2000 m s.n.m.) para el seguimiento de las precipitaciones en remoto, permitiría identificar con precisión el riesgo de inundación derivado de las tormentas en esta zona.

El conocimiento generado a partir de la monitorización hidrológica, ha proporcionado las herramientas para gestionar el riesgo de inundación de forma más adecuada. Para ello, ha sido imprescindible la transferencia de este conocimiento por parte del personal técnico a los gestores y guías de la cueva, a través del trabajo conjunto con la gestora de la cueva y la realización de jornadas de formación a los guías. La información generada ha servido para predecir inundaciones hasta 8 horas antes de la activación de las alarmas, mejorando la organización de las reservas. Además, ha permitido reducir el tiempo de cierre de la cueva, reduciendo así las pérdidas económicas en primavera, por ejemplo, considerando que las inundaciones causadas solo por el deshielo afectan a la cueva durante la noche, y permiten la entrada durante el día. Otra medida para reducir las pérdidas en caso de inundación de la cueva, es ofrecer al público otro tipo de actividad, incluyendo la contemplación del espectacular torrente de agua que se forma en la cueva cuando se inunda, desde un lugar seguro. Para ello, se puede realizar el acceso a la cueva desde la entrada principal, avanzando solo unos metros para la observación del torrente y adaptando una barrera de protección a la valla actual para impedir el paso de personas. Otra opción, es la utilización de alguna de las entradas de las galerías superiores para acceder hasta la zona elevada y segura antes de la sala de la Catedral. Esta actividad sirve para difundir el conocimiento sobre las inundaciones, integrando la información adquirida con la monitorización de la cueva. Por otro lado, se puede complementar fácilmente con los recursos que se ofrecen en el centro de interpretación de la cueva.

Las pérdidas económicas debidas a las cancelaciones causadas por las inundaciones han oscilado entre el 1% y el 5% de los ingresos anuales totales desde 2018. No obstante, la actividad turística en la cueva está expuesta a la ocurrencia de inundaciones de gran magnitud y baja recurrencia (eventos extraordinarios), que pueden producir daños en las instalaciones de la cueva y que conllevan grandes pérdidas económicas e incluso riesgos humanos. La inversión en materiales realizada en la cueva de las Güixas tras el evento de inundación extrema de 2012, representó casi el 100% de los beneficios de ese año, sirviendo de ejemplo de las significativas pérdidas económicas que puede generar un evento extraordinario. En el contexto actual de calentamiento global y el aumento previsto de eventos hidrológicos extremos en Europa (IPCC, 2021), uno de los mayores retos en la gestión de la cueva de las Güixas, será hacer frente a la ocurrencia de futuros eventos de inundación de gran magnitud e intensidad. El análisis de estaciones meteorológicas en los Pirineos, refleja una tendencia hacia un menor número de eventos de lluvia (Pérez-Zanón *et al.*, 2017), tendencia también detectada en el registro de nivel de agua subterránea de Villanúa, coincidiendo con la baja acumulación de nieve en las montañas (OPCC-CTP, 2018). Mientras que se prevé que las precipitaciones en los Pirineos disminuyan (López-Moreno *et al.*, 2008), induciendo por tanto una disminución en la tasa anual de inundaciones de la cueva, se espera que el número de inundaciones repentinas aumente (Llasat, 2021). Las inundaciones extremas plantean riesgos económicos significativos y su ocurrencia es una preocupación para el futuro. Es importante monitorizar las precipitaciones y los niveles de agua en la cueva para determinar si se producen cambios en otros factores (por ejemplo, en la estacionalidad de las precipitaciones) que puedan conducir a un aumento de inundaciones extremas en la cueva en los próximos años.

Conclusiones

El seguimiento de los niveles de agua en la cueva y de las precipitaciones proporciona información sobre la dinámica hidrológica de la cavidad, lo que resulta de gran utilidad para la gestión de la cueva. El aumento del nivel del agua dentro de la cueva está relacionado con la cantidad de agua recargada y almacenada en el sistema kárstico, que varía estacionalmente. La evolución de la capa de nieve en la cuenca controla el balance del acuífero y las inundaciones de la cueva. El análisis de los hidrogramas durante la inundación de la cueva indica un tiempo de respuesta de aproximadamente 8 - 12 horas respecto al evento de lluvia/deshielo que lo causa. Cuando el nivel piezométrico es elevado, principalmente en primavera, pequeñas precipitaciones pueden desencadenar una rápida inundación de la cueva con un corto retardo (menos de 8 horas). La distribución irregular de las precipitaciones, que se produce principalmente en verano, debe tenerse en cuenta para predecir las inundaciones de la cueva. La monitorización hidrológica ha sido fundamental para comprender la dinámica de las inundaciones en la cueva de las Güixas y evaluar el riesgo de inundación, permitiendo mejorar la gestión de las visitas y reducir las pérdidas económicas ocasionadas por las inundaciones. La ocurrencia de futuras inundaciones extremas supone un riesgo económico significativo. La monitorización resultará fundamental para abordar los futuros retos en la gestión de la cavidad.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a los guías de la cueva de las Güixas por su disposición para colaborar en las observaciones de seguimiento, a María José Ezquerro, Sandra Brunet y Alberto Zárate, por su inestimable ayuda en el seguimiento de las precipitaciones durante 5 años, a Andrea Dumall por su colaboración para la obtención de información sobre la gestión de la cueva, y al Ayuntamiento de Villanúa por el apoyo financiero. Además, nos gustaría expresar nuestro agradecimiento a la Confederación Hidrográfica del Ebro, por proporcionar datos climáticos de las estaciones meteorológicas de Villanúa, Canfranc e Izas. Un agradecimiento especial a Laureano Gómez y Mario Gisbert, por su transmisión de conocimiento espeleológico del sistema y su ayuda en la monitorización de los sifones.

Referencias

- Ahmed, J.U., Talukder, N., Alam, S.R., Ahmed, A., 2021. Rescue Mission in the Tham Luang Nang Non Cave, Thailand. London. <https://doi.org/10.4135/9781529758122>
- Bartolomé, M., Giménez, R., Pérez-Villar, G., Gisbert, M., *et al.*, 2023. El potencial de los sedimentos de la cueva del Ubriga (El Vallecillo, Teruel) para la reconstrucción de paleoinundaciones. *La Cija de Teruel*, 18, 15-19.
- Chiarini, V., Duckeck, jochen, De Waele, J., 2022. A Global Perspective on Sustainable Show Cave Tourism. *Geoheritage* 14, 1–27. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00717-5>
- Cigna, A., Forti, P., 2013. Caves: The most important geotouristic feature in the world. *Tourism and Karst Areas* 6, 9–26.
- Cigna, A.A., Burri, E., 2000. Development, management and economy of show caves. *KIP Articles*.
- Giménez, R., Bartolomé, M., Gázquez, F., Iglesias, M., Moreno, A., 2021. Underlying Climate Controls in Triple Oxygen (16 O, 17 O, 18 O) and Hydrogen (1 H, 2 H) Isotopes Composition of Rainfall (Central Pyrenees). *Frontiers in Earth Science* 9, 209. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.633698>

- Heaton T (1986) Caves; a tremendous range of energy environments on Earth. *Nat Speleol Soc News* August: 301-304
- IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.
- Jeannin, P.-Y., Malard, A., 2018. A Way to Predict Natural Hazards in Karst. *Sinkhole Conference 2018*.
- Llasat, M.C., 2021. Floods evolution in the Mediterranean region in a context of climate and environmental change. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 47, 13–32. <https://doi.org/10.18172/cig.4897>
- López-Moreno, J.I., Goyette, S., Beniston, M., 2008. Climate change prediction over complex areas: spatial variability of uncertainties and predictions over the Pyrenees from a set of regional climate models. *International Journal of Climatology* 28, 1535–1550. <https://doi.org/10.1002/joc.1645>
- OPCC-CTP group, 2018. El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación. Bases de conocimiento para la futura estrategia de adaptación al cambio climático en los Pirineos. 149.
- Pérez-Zanón, N., Sigró, J., Ashcroft, L., 2017. Temperature and precipitation regional climate series over the central Pyrenees during 1910–2013. *International Journal of Climatology* 37, 1922–1937. <https://doi.org/10.1002/joc.4823>
- Rivas, A., Cabezas, J., Carrasco, F., Durán, J.J., González-Ríos, M., 2004. Las cuevas turísticas españolas: un recurso natural de gran interés ecológico, económico y social. Andreo, B. y Durán, J. J. *Investigaciones en sistemas kársticos españoles*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, 12, 367–384.
- Serrano-Muela, M.P., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., González-Hidalgo, J.C., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Sanjuan, Y., García-Ruiz, J.M., 2013. An Exceptional Rainfall Event in the Central Western Pyrenees: Spatial Patterns in Discharge and Impact. *Land Degradation & Development* 26, 249–262. <https://doi.org/10.1002/ldr.2221>
- Thornwaite, C.W., 1954. The measurement of potential evapotranspiration: Seabrook, New Jersey, John P. Mather, 225.

Primeras investigaciones geomorfológicas, mineralógicas y microclimáticas en la Cueva Grande del Arco (Cueva del Arco III, Cieza, Región de Murcia)

Gázquez, F.^(1,2), Martegani, L.^(1,2), Fernández-Cortés, Á.^(1,2), Martín-Lerma, I.⁽³⁾, Román, D.⁽⁴⁾ y Calaforra, J.M.^(1,2)

⁽¹⁾ Departamento de Biología y Geología. Universidad de Almería, Carretera de Sacramento s.n, La Cañada de San Urbano, Almería, 04120, España.
f.gazquez@ual.es

⁽²⁾ Centro Andaluz para el Cambio Global - Hermelindo Castro (Engloba), Universidad de Almería 04120, España

⁽³⁾ Área de Prehistoria, Facultad de Letras, Universidad de Murcia, Murcia, España

⁽⁴⁾ Departament d'Història, Geografia i Art, Universitat Jaume I, Castelló de la Plana, España

Resumen

Las excavaciones arqueológicas llevadas a cabo en la Cueva del Arco (Cieza, Región de Murcia) han permitido desobstruir una gran cavidad. Se ha realizado una campaña preliminar de muestreo para estudiar su geomorfología, mineralogía y atmósfera subterránea. La cueva tiene un recorrido longitudinal conocido de 1360 m y alberga amplias salas y galerías. Se observan cúpulas de varios metros de diámetro en sus techos, así como superficies de disolución. Estos elementos indican procesos de espeleogénesis hipogénica y disolución de la roca de caja por la acción corrosiva de aguas de origen profundo. La presencia de yeso sobre paredes y techos también pudiera estar relacionada mecanismos de espeleogénesis por ácido sulfúrico. Los depósitos de guano que aparecen en las partes más profundas revelan la paleo-actividad de quirópteros, que también pudieron influenciar la morfología de la cavidad. En conjunto, su espeleogénesis pudo ser similar a la de otras cuevas cercanas, como la Sima del Pulpo (a 1,5 km) y la Cueva del Puerto (a 7,5 km). Se han identificado espeleotemas de fosfatos, que incluyen hidroxilapatito, fluoroapatito y crandallita, relacionados con la alteración de los depósitos de guano. La temperatura del aire osciló entre 19,5 y 20,0 °C durante la visita. La concentración de CO₂ varió entre 1300 y 1850 ppm y sus valores de δ¹³C relativamente bajos (-19,5 a -21,4‰) sugieren contribuciones de CO₂ procedentes de la actividad biológica del suelo sobre la cavidad, o más probablemente de la degradación microbiana del guano. La concentración de CH₄ es más baja en las salas interiores y sus valores de δ¹³C (<-65‰) son más negativos que en el exterior (~-50‰), probablemente como consecuencia de la actividad conjunta de bacterias metanogénicas y metanotróficas. Estos resultados preliminares permitirán establecer un plan de investigación a medio y largo plazo en esta cavidad, centrado principalmente en su conservación.

Palabras clave: atmósfera subterránea, cuevas hipogénicas, fosfatos, guano, minerales de cuevas, yeso.

Abstract

The archaeological excavations carried out in Cueva del Arco (Cieza, Region of Murcia) have allowed the finding of a large cavity. A preliminary sampling campaign has been conducted to investigate its geomorphology, mineralogy, and underground atmosphere. The cave has a known longitudinal length of 1360 m and contains large halls and galleries. Cupolas several meters in diameter can be seen on its ceilings, as well as dissolved surfaces and corrosion features. These elements indicate processes of hypogenic speleogenesis and the dissolution of the host rock by the corrosive action of deep-origin waters. The presence of gypsum on walls and ceilings may indicate also sulfuric acid speleogenesis. The guano deposits found in the deepest parts reveal the paleo-activity of bats, which may have also influenced the morphology of the cavity. Overall, its speleogenesis might be like that of other nearby caves, such as Sima del Pulpo cave (1.5 km away) and the Cueva del Puerto (7.5 km away). Phosphate speleothems have been identified, including hydroxylapatite, fluorapatite, and crandallite, related to the alteration of guano deposits. The air temperature ranged between 19.5 and 20.0 °C during the visit. The concentration of CO₂ varied between 1300 and 1850 ppm, and its relatively low δ¹³C values (-19.5 to -21.4‰) suggest contributions of CO₂ from biological activity in the soil above the cavity or in-cave microbial degradation of the guano. The concentration of CH₄ is lower in the interior halls, and its δ¹³C values

(<-65‰) is lower than outside (~-50‰), because of methanogenic and methanotrophic bacterial activity associated with the guano. These preliminary results will allow the establishment of a medium- and long-term research plan in this cavity, with special focus on cave protections.

Keywords: cave minerals, gypsum, guano, hypogenic caves, phosphates, underground atmosphere.

Introducción

Las exploraciones espeleológicas llevadas a cabo durante las últimas décadas en la Región de Murcia (sudeste de la península ibérica) han permitido identificar más de 20 cavidades cuyas morfologías sugieren un origen hipogénico, en muchas ocasiones relacionado con procesos hidrotermales (Ros *et al.*, 2014; Gázquez *et al.*, 2017). Los mecanismos de formación de estas cuevas estuvieron relacionados con la acción corrosiva de aguas ligeramente ácidas, debido a la presencia de CO₂ y/o H₂S de origen profundo. Las formas subterráneas generadas por la espeleogénesis hipogénica suelen incluir morfologías de disolución con un marcado componente vertical, debido al movimiento ascendente de los flujos de agua hidrotermal, así como cúpulas de gran tamaño, entre otras (Klimchouk, 2009). La interacción del agua con la roca encajante puede dar lugar a alteraciones características de sus superficies, y en el caso de aguas cargadas en ácido sulfúrico, pueden generar minerales como el yeso (CaSO₄·2H₂O) y la alunita (KAl₃(SO₄)₂(OH)₆), entre otros (Hill y Forti, 1997).

En el entorno del sinclinal de Calasparra, al norte de la región, existen dos cavidades de marcado origen hipogénico: la Cueva del Puerto, al norte del sinclinal, y la Sima del Pulpo (Ros *et al.*, 2014; Gázquez *et al.*, 2017), al sur de éste. Estas cuevas son conocidas desde hace décadas, y en el caso de la Cueva del Puerto, ha sido habilitada como cavidad turística. Por otro lado, las excavaciones arqueológicas llevadas a cabo en la Cueva del Arco (Martín-Lerma *et al.*, 2023), al sur del mismo sinclinal y a tan solo 1,5 km de la Sima del Pulpo, han dado lugar al descubrimiento de una cavidad de grandes dimensiones que ha empezado a ser estudiada con una perspectiva multidisciplinar. En este trabajo se presentan los primeros resultados de esta investigación, que incluyen observaciones geomorfológicas, análisis mineralógicos y de su atmósfera subterránea. El objetivo fue generar un primer modelo genético de la cavidad, evaluar su riqueza mineralógica y caracterizar su atmósfera subterránea. Estos resultados marcarán la hoja de ruta para las próximas investigaciones científicas en esta cueva.

Entorno geológico y descripción de la cavidad

La Cueva Grande del Arco, también conocida como Cueva del Arco III, está ubicada en el municipio de Cieza, Región de Murcia (España), a una altitud aproximada de 350 m s.n.m. (Fig. 1), en el lado izquierdo del Barranco de la Tabaquera, que drena hacia el río Segura. Gracias a los trabajos arqueológicos llevados a cabo desde 2015 en el exterior de la cavidad (Martín-Lerma *et al.*, 2023), se descubrió su entrada natural. El clima en el entorno de la cueva es típicamente Mediterráneo, con una temperatura anual media de 16.7°C, precipitación de 328 mm/año y veranos secos en los que las temperaturas máximas pueden alcanzar los 40°C. La vegetación sobre la cueva es escasa y está dominada por matorrales de tipo mediterráneo, donde predominan el esparto (*Stipa tennacissima*).

La entrada a la cavidad está situada en una pequeña meseta que se encuentra entre el cañón de Almadenes al norte y la Sierra de la Palera (654 m s.n.m) al sur. La cueva se desarrolla en rocas carbonatadas del Cretácico pertenecientes al dominio prebético interno (Jerez-Mir *et al.*, 1972), en el límite entre las calizas masivas blanquecinas del Coniaciense, que aflora al este de la cueva y las dolomías masiva del Turoniense, que se encuentra al oeste. El paisaje geomorfológico alrededor de la Cueva del Arco III muestra evidencia de dinámicas fluviokársticas, como el cañón de Almadenes, y procesos de disolución kárstica, como dolinas y *karren*.

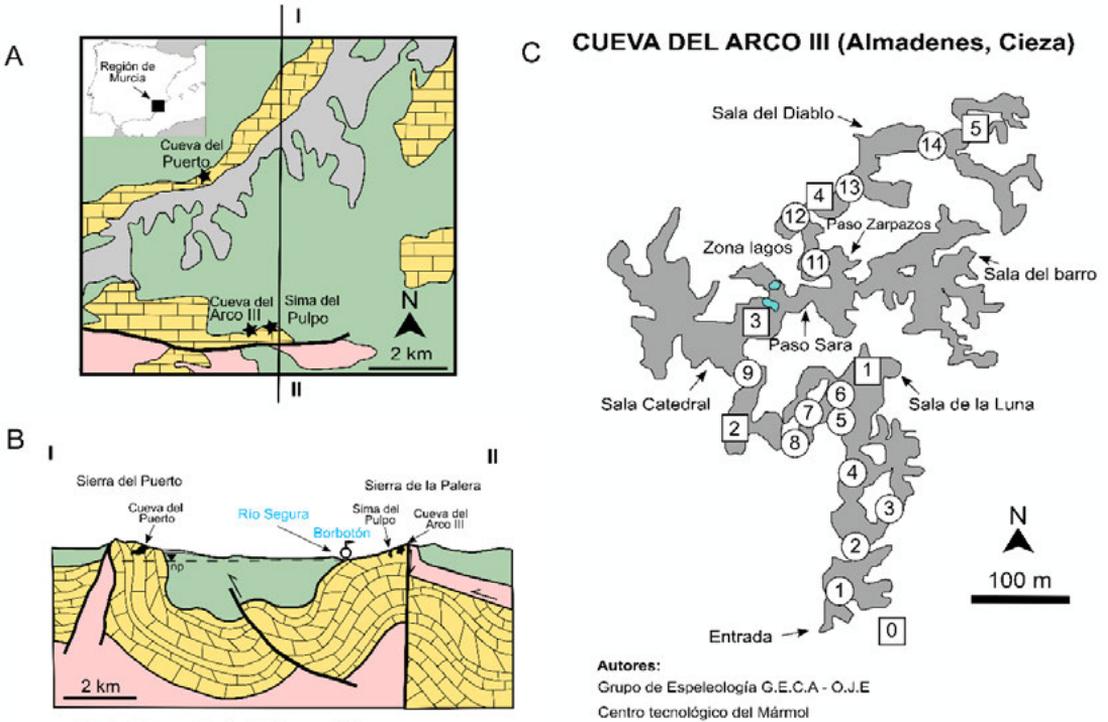


Figura 1. A. Ubicación de la Cueva Grande del Arco y otras cavidades hipogénicas cercanas asociadas al sinclinal de Calasparra: Cueva del Puerto y Sima del Pulpo. Mapa geológico modificado de MAGNA 1:50.000 (Jerez-Mir *et al.*, 1972); B. corte geológico del sinclinal de Calasparra y ubicación de las cuevas mencionadas, modificado del Mapa Geológico de España (Jerez-Mir *et al.*, 1972) y Alhama *et al.* (2020); C. planta de la Cueva Grande del Arco y ubicación de los lugares de muestreo. Los círculos denotan muestras de minerales, mientras que los cuadrados indican toma de muestras de aire

La cavidad tiene un desarrollo conocido de 1360 m y un desnivel de 28 m, siendo el sector de la entrada el que se encuentra a mayor altitud. En algunas zonas aparecen galerías laberínticas, en torno a la Sala de la Luna y antes de llegar a la Sala de la Catedral (Figura 1). Por lo general, el

volumen de las galerías y salas es amplio, de más de 2 m de altura en la mayoría del recorrido. Las morfologías por disolución son abundantes en toda la cavidad, especialmente en los niveles superiores, donde en ocasiones aparecen cúpulas de tamaño métrico. También se han observado tubos cenitales y otras formas de disolución, similares a las identificadas en las cercanas Cueva del Puerto y Sima del Pulpo (Gázquez *et al.*, 2017). La presencia de espeleotemas convencionales, como estalactitas y estalagmitas, es relativamente escasa en las grandes salas y se limita al entorno de una zona donde aparecen pequeños lagos colgados ubicada en el sector central de la cavidad y en las galerías más alejadas de la entrada donde se han inventariado fistulosas (*sodastraws*) de casi 2 m de longitud. También aparecen mineralizaciones menos convencionales sobre las paredes y techos a modo de costras, tanto blancas y de aspecto microcristalino, como finas láminas que cubren cúpulas en los techos de la cueva. En la zona más alejada de la entrada, más allá del conocido como Paso de los Zarpazos, se observan abundantes depósitos de guano de quirópteros con distintos grados de mineralización. Es especialmente relevante la acumulación de guano en la Sala Colmatada, donde el depósito alcanza en torno a 1,5 m de altura, presentando un aspecto menos mineralizado que en otros sectores.

Metodología

Muestreo de minerales y gases

En septiembre de 2021 se llevó a cabo un muestreo sistemático en el que se tomaron 13 muestras de minerales procedentes de distintos puntos de la cavidad (Figura 1). Las muestras consistieron en costras microcristalinas sobre las paredes y techos (ARC-01, ARC-02, ARC-03, ARC-05, ARC-08, ARC-14C), sedimentos blancos pulverulentos sobre los suelos (ARC-04), rellenos en fracturas de la roca de caja (ARC-06), superficies de la roca con motas negras (ARC-07), costras muy finas sobre la roca que aparecen principalmente en techo y en el interior de cúpulas (ARC-09), espeleotemas laminados azulados que se observan sobre depósitos de guano de murciélagos (ARC-11A), espeleotemas rojizos de aspecto cristalino y de tamaño milimétrico (ARC-11B) y minerales blanquecinos pulverulentos que aparecen también sobre el guano (ARC-12).

Paralelamente, se tomaron 5 muestras de aire en bolsas Ritter® de 1 L con una bomba manual para estudiar la composición isotópica del carbono en CO₂ y CH₄ con el fin de determinar su origen y grado de intercambio gaseoso con el exterior. Los puntos de muestreo de aire en el interior de la cueva y en el exterior aparecen indicados en la Figura 1. En estas localizaciones también se midieron los parámetros ambientales *in situ* con sensores portátiles XP100 y XP200 (Lufft), equipados con una sonda de temperatura externa (PT100 1/10 DIN-B, con una precisión de ±[0,03+ 0,002*medida]) y una sonda NDIR para concentración de CO₂ (EE871, E+E Elektronik) con un rango de medida de 0-10000 ppm y una exactitud de ±5 %.

Análisis isotópicos de CO₂ y CH₄

Una vez en el laboratorio, las bolsas de aire se analizaron para determinar la concentración de CO₂ y CH₄ y sus valores de δ¹³C, utilizando un sistema CRDS (Analizador Picarro G2201-i, USA) en el Laboratorio de Isótopos Estables de la Universidad de Almería. Se utilizaron tres estándares

internos con mezclas de gases certificadas y concentraciones conocidas de CO_2 (7000 ppm, 400 ppm y cero CO_2) y CH_4 (1,8 ppm, 0,5 ppm y cero CH_4), suministrados por Abello Linde-España, para calibrar los valores de concentración de CO_2 de las muestras de aire. Las composiciones isotópicas estables de carbono de ambos gases (CO_2 y CH_4) se expresaron como $\delta^{13}\text{C}$ con relación al estándar *Vienna Pee Dee Belemnite* (VPDB). Las mediciones de isotopólogos de CO_2 lograron una precisión de 200 ppb ($\pm 0,05$) y 10 ppb ($\pm 0,05$) para $^{12}\text{CO}_2$ y $^{13}\text{CO}_2$, respectivamente, resultando en una precisión mejor de 0,15‰ para $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$, mientras que para el CH_4 la precisión fue de 5 ppb ($^{12}\text{CH}_4$) y 1 ppb ($^{13}\text{CH}_4$), resultando en una precisión mejor a 1,15‰ para $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$.



Figura 2. Morfologías y minerales en la Cueva Grande del Arco. A. Cúpulas en techos, que en algunas ocasiones aparecen cubiertas por costras finas de color marrón (B) de las cuales se tomó la muestra ARC-9 (hidroxiapatita); C. signos de corrosión de la roca de caja; D. dostras de yeso que en ocasiones aparecen a modo de bolas huecas o "blisters" (muestra ARC-02); E. depósitos de guano mineralizados en torno a la Sala del Diablo (ARC-11A) (fluorapatita, cuarzo y candrallita); F. espeleotemas rojizos a modo de pequeñas esferas de tamaño centimétrico a milimétrico (ARC-11B) (fluorapatita, cuarzo y candrallita)

Análisis mineralógicos y composicionales

Las muestras para los análisis de difracción de rayos X en polvo (~ 100 mg) se molieron y se

secaron a 40 °C durante 24 horas. Los análisis se realizaron con un difractómetro de rayos X modelo D8 ADVANCE DAVINCI, con un ánodo de Cu ($\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 0,154 \text{ nm}$) y un monocromador de grafito. Se utilizaron un filtro de Ni y soportes de muestra de Al. La tensión y la corriente producidas por el generador fueron de 40 kV y 30 mA, respectivamente, para todos los análisis. Se utilizó el método de escaneo 2θ , con 0,400 segundos por paso y dentro de los límites angulares de 5 a 80°. La determinación mineralógica se realizó utilizando la base de datos PDF-2 (*Powder Diffraction Files*). Además, se estudió la estructura microscópica de los minerales mediante un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM) Zeiss Sigma 300 VP. La composición química se determinó mediante una sonda de rayos X acoplada al SEM que permite analizar puntos concretos de las muestras a escala microscópica. Los análisis mineralógicos y geoquímicos se llevaron a cabo en los Servicios Técnicos Centrales de la UAL.

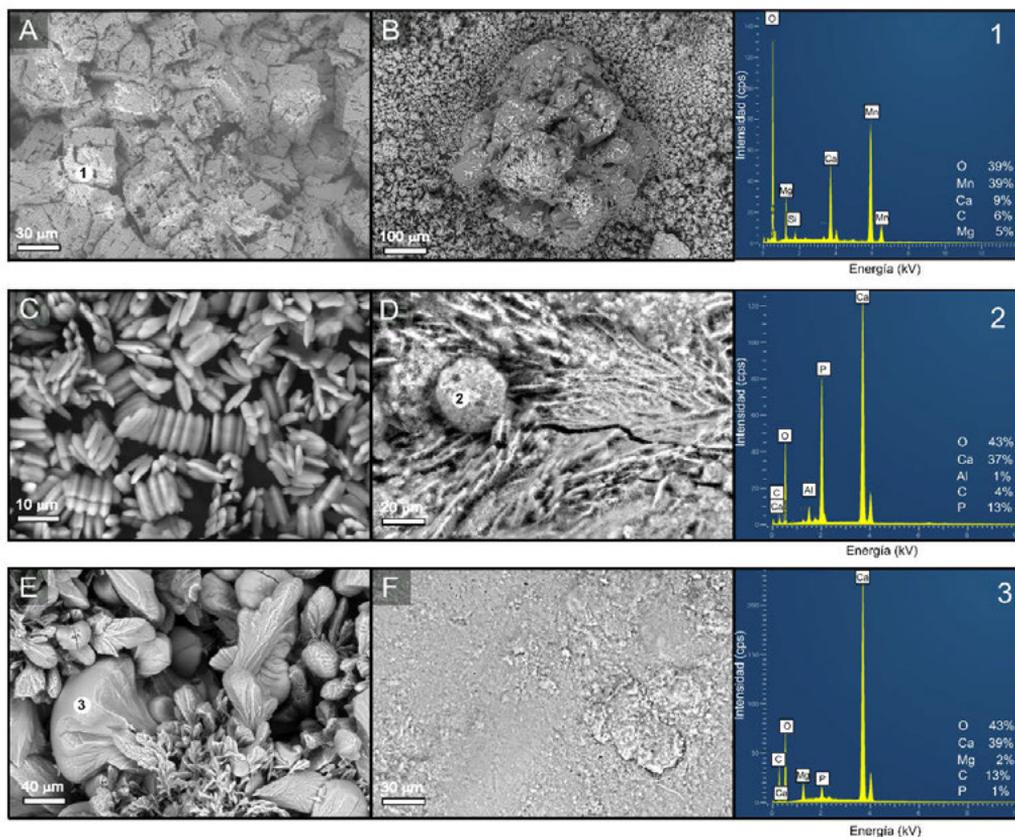


Figura 3. Fotografías de FESEM de las muestras ARC-07 (A), ARC-04 (B y C), ARC-11 (D), ARC-14 (E), ARC-09 (F). Los microanálisis con la microsonda se realizaron sobre las zonas indicadas en las fotografías y corresponden con los números de los espectros

Resultados

Composición isotópica y concentración del CO₂ y CH₄ en el aire de la cueva

Los resultados preliminares obtenidos en una primera campaña de reconocimiento de la cueva, realizada a principios de septiembre bajo elevadas temperaturas en el exterior, indicaron una marcada estabilidad térmica y una composición gaseosa muy homogénea de la atmósfera subterránea. La temperatura del aire disminuyó hasta 20,2 °C en los primeros 250 m de recorrido desde la entrada natural recientemente descubierta. La temperatura descendió al bajar la cota de las galerías y se estabilizó en un estrecho rango entre 19,6 y 19,7 °C, en el sector de galerías con presencia de masas de agua, situado entre 400 y 600 m desde la entrada (Zona de los Lagos, Figura 1). En las galerías más alejadas de la entrada, a más de 700 m de ésta y profundidad entre -22 y -24 m respecto a la superficie (sector de Sala del Diablo en Figura 1), la temperatura se estabilizó en torno a 20,03 °C, con variaciones espaciales de $\pm 0,01$ °C. La concentración media de CO₂ fue relativamente elevada (1659 ppm), lo cual sugiere un escaso intercambio de gases con el exterior en el periodo en que se llevó a cabo la campaña de muestreo. La variación espacial de la concentración de este gas fue de 588 ppm, desde 1298 ppm en la estación 5 (más cercana a la entrada) hasta casi 1900 ppm en las zonas más profundas (~-24 m). La señal isotópica $\delta^{13}\text{C}$ del CO₂ presentó un valor medio de -20,7 ‰, variando en un estrecho rango entre -19,5 y -21,5 ‰ en todas las galerías exploradas (Figura 4A). La concentración media de CH₄ fue de 0,47 ppm, variando desde 0,2-0,3 ppm, en las zonas más distales a la entrada, a 0,9 ppm en las zonas más exteriores (Figura 4 B).

Composición química y mineralógica de los espeleotemas

En las muestras sólidas analizadas se ha observado una diversidad mineralógica considerable, que incluye minerales pertenecientes a los grupos de los sulfatos, fosfatos, carbonatos, óxidos y silicatos. El yeso (CaSO₄·2H₂O) aparece principalmente en las muestras tomadas en las zonas más cercanas a la entrada de la cavidad, en forma de costras sobre las paredes y suelos (ARC-01, ARC-02 y ARC-03). Junto al yeso aparecen otros minerales como cuarzo (SiO₂), calcita (CaCO₃), dolomita (CaMg(CO₃)₂) y goethita (FeOOH) en proporciones menores. Los microanálisis confirman estos resultados mineralógicos. También se ha encontrado yeso en materiales poco consolidados en el suelo de la Sala de la Luna (ARC-04), donde aparecen estructuras tipo conulitos. El yeso de esta última muestra presenta un hábito cristalino singular que se asemeja al aspecto de un "acordeón" (Figura 3C). La muestra ARC-09 es una costra de ~1 mm de grosor sobre el techo de la cavidad que está constituida por hidroxiapatita (Ca₅(PO₄)₃(OH)), un fosfato de calcio típico de la interacción entre residuos de murciélagos (orina y guano) con la roca caja carbonática. Una muestra tomada del suelo (ARC-11A), justo debajo de estas cúpulas, contiene principalmente fluorapatita (Ca₅(PO₄)₃F), otro fosfato típico de depósitos de guano en cavidades. La muestra ARC-12, tomada de los depósitos negros pastosos que aparecen en el suelo de la cavidad tiene una mineralogía poco definida, que solo deja ver la presencia de cuarzo (SiO₂) y moscovita (KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂). Esto sugiere que se trata de depósitos de guano relativamente recientes y que aún no están mineralizados. En algunas de estas localizaciones con depósitos de guano también se ha identificado candallita (CaAl₃(PO₄)(PO₃OH)(OH)₆) junto con calcita (muestra ARC-11B), otro fosfato de calcio y aluminio asociado típicamente a depósitos de guano

de cavidades (Figura 3D y E). En algunas muestras relacionadas con los depósitos de guano también se ha identificado yeso (ARC-12).

Discusión

Características y composición isotópica de la atmósfera subterránea

El ajuste de la función Keeling (Figura 4A) que modeliza el proceso de mezcla del CO₂ de la cueva con el CO₂ de la atmósfera exterior, permite constatar el origen del gas asociado a la degradación de materia orgánica y respiración de raíces en el suelo externo con predominio de vegetación tipo C3 (con un δ¹³C-CO₂ en torno a -25‰), junto con un probable aporte de CO₂ procedente de la red de fisuras y poros de la roca encajante situada sobre la cavidad, que ha sido generado por desgasificación del agua de infiltración lenta. La concentración de CO₂ en la cueva, elevada y espacialmente homogénea, y los valores de δ¹³C-CO₂ registrados en esta campaña inicial, son indicativos de un intercambio gaseoso (mezcla) limitado con la atmósfera externa. Este relativo aislamiento de la atmósfera subterránea es especialmente evidente a partir de los primeros 250 m desde la entrada, con una marcada homogenización espacial en la concentración de CO₂ (>1600 ppm) y en los valores de δ¹³C-CO₂ (<-20‰). Un seguimiento a largo plazo permitirá evaluar si este grado de aislamiento, debido al reciente descubrimiento y desobstrucción parcial de la entrada natural (paleolítica) a la cueva, persiste en el tiempo o bien experimenta cambios estacionales en función de condiciones meteorológicas externas.

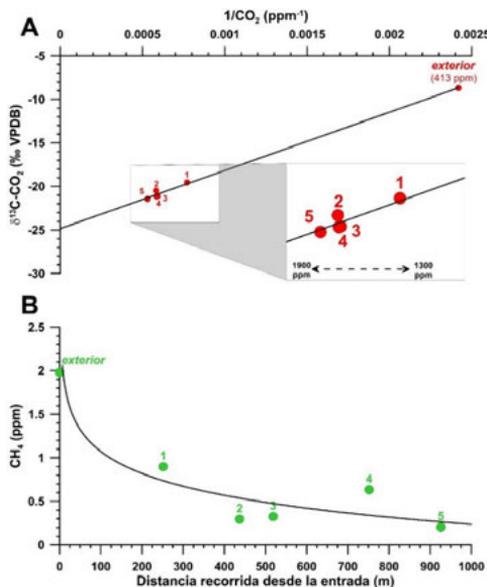


Figura 4. A: Diagrama de Keeling del CO₂ (1/CO₂ vs. δ¹³C-CO₂) y B: gradiente de variación espacial de la concentración de CH₄ para la atmósfera subterránea de la Cueva Grande del Arco. Las etiquetas de cada punto indican la localización de la muestra de aire (Figura 1).

La concentración de metano disminuye hacia el interior (Figura 4B), por lo que cabe interpretar que se consume casi en su totalidad por acción de microorganismos metanótrofos presentes en las paredes y sedimentos de la cavidad. Algunas colonias bacterianas son visibles en las zonas de la entrada, si bien su presencia puede ser más generalizada y requeriría un muestreo y estudio microbiológico específico. En concreto, ensayos de bioluminiscencia (medición de ATP) permitirían cuantificar el contenido de biomasa microbiana en sedimentos y superficies de la cavidad, como paso preliminar en la evaluación del grado de colonización microbiológica por sectores de la cueva y su relación con el gradiente espacial en la oxidación (consumo) de CH_4 . Los valores de d^{13}CH_4 son muy dispares, si bien los valores claramente inferiores al d^{13}CH_4 de la atmósfera exterior ($\sim 50\%$) podrían indicar que se trata de un CH_4 residual generado por la actividad metanogénica de bacterias presente en las numerosas acumulaciones de guano de quirópteros que hay en la cavidad, por ejemplo, en las inmediaciones del punto 4, donde se detecta una anomalía en el gradiente espacial de eliminación del CH_4 (Figura 4B). Este CH_4 biogénico sería posteriormente oxidado por acción de los microorganismos metanótrofos hasta concentraciones por debajo del CH_4 atmosférico (1,98 ppm en el exterior). No obstante, hay que tener en cuenta que el analizador CRDS baja su precisión en $\text{d}^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ para concentraciones subatmosféricas del gas ($<0,5$ ppm), por lo que de momento hay que interpretar estos resultados con cautela y se requieren más datos para identificar algún patrón espacio-temporal más contrastado en el proceso de consumo de CH_4 .

Interpretaciones geomorfológicas preliminares y mineralogía de la Cueva Grande del Arco

La Cueva Grande del Arco muestra signos de un origen primigenio relacionado con procesos hipogénicos, los cuales se manifiestan en forma de elementos geomorfológicos y minerales típicos de este tipo de sistemas. La presencia de superficies redondeadas en paredes y techos (Figura 2A), algunas zonas que presentan pasajes laberínticos (Figura 1C), superficies corroídas (Figura 2C) y la total ausencia de sedimentos fluvio-kársticos, sugieren que la cueva estuvo inundada por agua en condiciones relativamente estables en el pasado y totalmente desconectadas de la superficie, probablemente en un acuífero confinado. La relativa escasez de espeleotemas convencionales formados por goteo en la mayor parte de las salas, como estalagmitas o estalactitas indica, por un lado, un epikarst poco desarrollado y escasa infiltración de agua de lluvia. Por otro lado, sugiere que la cueva pudo haber estado inundada por agua hasta tiempos relativamente recientes desde el punto de vista geológico. Por otro lado, sugiere que la cueva pudo haber estado inundada por agua hasta tiempos relativamente recientes desde el punto de vista geológico. En caso contrario, es probable que se hubiera dado el tiempo suficiente para que se desarrollara el epikarst y una mayor presencia de espeleotemas subaéreos, que sin embargo solo se han observado en algunas localizaciones puntuales dentro de la cavidad. No se aprecian marcas de niveles de agua ni espeleotemas típicamente ligados a las zonas de desgasificación de CO_2 en condiciones epifreáticas, como aceras, folias, nubes de cuevas o conos de calcita flotante (Audra *et al.*, 2009; Gázquez y Calaforra, 2013). Esto podría indicar que la cueva quedó emergida de forma rápida, pasando de condiciones freáticas a vadosas en poco tiempo. Este cambio súbito no propició las condiciones necesarias de estabilidad para la formación de este tipo de espeleotemas, como se ha sugerido previamente para la Cueva del Puerto (Gázquez *et al.*, 2017).

Cabe destacar la presencia de cúpulas de gran tamaño, especialmente en la Sala de la Luna. Estas formas están muy relacionadas con procesos de agua termal y flujos hipogénicos profundos (Audra *et al.*, 2009; Klimchouk, 2009) que habrá que comprobar en estudios posteriores, ya que la presencia de cúpulas en cuevas también se ha ligado en algunas ocasiones a la actividad de quirópteros (Barriquand *et al.*, 2021). La gran abundancia de depósitos antiguos de guano es llamativa en varias salas de la cavidad. Sin embargo, actualmente no hay colonias de quirópteros por lo que estos debieron desaparecer de la cavidad en tiempos remotos, posiblemente por un cierre natural de la primitiva entrada de la cueva. Otras cavidades cercanas, como la Cueva del Puerto y la Sima del Pulpo, presentan elementos geomorfológicos muy similares (Gázquez *et al.*, 2017), lo cual sugiere un origen común a ambos flancos del sinclinal de Calasparra debido a una masa de agua confinada de carácter regional. Por ello, el estudio conjunto de estas cavidades podría arrojar luz sobre procesos hidrotermales regionales y su cronología.

El yeso es especialmente abundante en la Cueva Grande del Arco, apareciendo principalmente en la parte superior de la cavidad. Su origen podría ser subacuático, debido al reemplazamiento de la roca carbonática en contacto con aguas ácidas cargadas de sulfatos. Este proceso ocurre especialmente en la parte más superficial del acuífero, que está más oxigenada, mientras que en las zonas más profundas se darían condiciones más anóxicas y el azufre se encontraría en su forma reducida como ion sulfuro. Una primera interpretación sobre el origen de estos yesos es que probablemente estén relacionados con la reacción de la roca caliza con ácido sulfúrico generado a partir de gases de azufre (H_2S y H_2SO_4) durante la fase hipogénica del acuífero (Onac *et al.*, 2009; De Waele *et al.*, 2024). Es posible que este proceso se produjera también en condiciones subaéreas debido a los gases sulfurosos y a los procesos de condensación sobre la roca de caja. Estas aguas de condensación ligeramente ácidas y cargadas en sulfatos debido a la oxidación de H_2S también podrían dar lugar a reemplazamiento del carbonato por sulfato de calcio. Las estructuras tipo "blíster" que se han observado en las zonas cercanas a la entrada (Figura 2), podrían estar relacionada con este proceso subaéreo. El yeso también aparece en las vecinas Cueva del Puerto y Sima del Pulpo (Gázquez *et al.*, 2017), lo cual sugiera que además de los procesos geomorfológicos, estas cavidades comparten un pasado hidrogeoquímico común que dio lugar a ciertas analogías mineralógicas. Cabe destacar que algunos depósitos de yeso pulverulento sobre el suelo en la Sala de la Luna parecen haberse desprendido del techo. Es posible que éstos procedan de la alteración de la roca por parte de los gases emanados por los extensos depósitos de murciélaguina, ya que, además de fosfatos y nitratos, los sulfatos como el yeso son un mineral secundario común asociado a la actividad de quirópteros. Será necesario un estudio geoquímico más detallado, por ejemplo, mediante el análisis de la composición isotópica de este yeso, para llegar a conclusiones más sólidas.

Además del yeso, destaca la presencia de otros minerales menos convencionales como los fosfatos, que aparecen tanto relacionados con la maduración de depósitos de guano en las zonas más profundas de la cavidad, como con la interacción entre los orines de los quirópteros y la superficie de los techos en el interior de las cúpulas. Estos minerales se han encontrado en otras cuevas globalmente, en la mayoría de los casos relacionados con guano de quirópteros, como es el caso de distintos tipos de apatito y otros menos comunes como la candrallita (Hill y Forti, 1997). Cabe destacar que la cavidad no tenía una entrada accesible hasta su descubrimiento, y es probable que los quirópteros accedieran en el pasado a través de otras entradas ya taponadas, puede que por la descubierta recientemente antes de obstruirse, o por fracturas menores. Es

especialmente notable la acumulación de guano en la sala más alejada de la entrada actual de la cavidad. A su vez, el techo de esta sala es una gran cúpula desarrollada en sedimentos detríticos que no parecen estar relacionados con la secuencia estratigráfica de calizas y dolomías jurásicas y cretácicas, sino que parecen materiales más recientes. Es posible que el acceso a la cavidad ocurriera en el pasado a través de esta sala, hoy taponada. La datación de los sedimentos mediante técnicas de luminiscencia, como el OSL (*Optically Stimulated Luminescence*), podría ayudar a determinar, en su caso, cuándo se taponó esta entrada potencial. Además, datar los depósitos de guano mediante radiocarbono (^{14}C) permitirá determinar en qué momento la cueva dejó de albergar murciélagos y durante cuánto tiempo la ocuparon. Otra posible línea de investigación podría ser el estudio de los depósitos de guano con el fin de conocer el clima del pasado en esta región, tal y como se ha hecho en cuevas de otros lugares del mundo (Onac *et al.*, 2015). Finalmente, cabe destacar la presencia de óxidos de manganeso como inclusiones en la roca carbonática en varios puntos de la cavidad (Figura 3A). Se trata de minerales que contienen elementos metálicos que, al oxidarse, generan protones que acidifican el medio y contribuyen a disolver la roca caliza. Este proceso se ha observado en otras cavidades de la Región de Murcia como la Sima de la Higuera (Gázquez *et al.*, 2012). De hecho, es posible que parte de la espeleogénesis de la cavidad esté relacionada con este proceso, además de la disolución en condiciones freáticas, el ataque ácido posterior en condiciones vadosas por procesos de condensación-corrosión y la actividad biogénica de los quirópteros.

Conclusiones

La recientemente descubierta Cueva Grande del Arco de Cieza presenta unas características geomorfológicas singulares y distintas a las de la mayoría de cavidades españolas, pero similares a las de otras cuevas de la Región de Murcia. Estos elementos, que incluyen cúpulas de gran tamaño y formas de corrosión, son típicos de procesos hipogénicos provocados por aguas de origen profundo en acuíferos confinados. La presencia de importantes cantidades de yeso, indican que probablemente se trató de un mecanismo de espeleogénesis en presencia de ácido sulfúrico. Se han identificado minerales del grupo de los fosfatos que están ligados a colonias de quirópteros que habitaron la cavidad en periodos pasados. Las características de la atmósfera subterránea durante la visita sugieren un ambiente poco ventilado y contribuciones importantes de CO_2 procedentes del suelo sobre la cueva, o más probablemente de la degradación de los abundantes depósitos de guano de quirópteros por parte de microorganismos. La tendencia decreciente en la concentración de CH_4 hacia el interior de la cavidad indica un consumo de este gas por parte de microorganismos metanotrofos, si bien los niveles residuales observados, empobrecidos en ^{13}C , indicarían una mínima contribución de CH_4 atmosférico (exterior) y sí, en cambio, una posible producción in situ asociada a la degradación del guano. Debido a su excelente estado de conservación y a la gran cantidad de elementos interesantes desde el punto de vista científico, es urgente elaborar un plan de investigación estructurado para los próximos años, en el que se priorice la conservación y protección de esta cavidad.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los Servicios Centrales de Investigación de la Universidad de Almería,

y en especial a las Dras. Esmeralda Urea y Sonia Mañas, los análisis geoquímicos y mineralógicos. Este trabajo fue posible gracias al Proyecto de Fortalecimiento a Grupos P_FORT_GRU-POS_2023/17 de la UAL, financiado por la Junta de Andalucía a través de fondos FEDER de la UE. El Dr. Fernando Gázquez agradece el contrato Ramón y Cajal (RYC2020-029811-I) y la ayuda PPIT-UAL de la Junta de Andalucía-FEDER 2022-2026 (RyC-PPI2021-01). Lucía Martegani agradece el contrato predoctoral FPU FPU21/06924 del Ministerio de Educación y Formación Profesional. La topografía de la cavidad fue elaborada por el grupo de espeleología G.E.C.A – O.J.E. y Centro tecnológico del Mármol (Cehegín, Murcia). Los trabajos del Dr. Dídac Roman se enmarcan en el proyecto CIDEAGENT/2018/043 de la Generalitat Valenciana. El proyecto de la Cueva del Arco ha recibido financiación del Ayuntamiento de Cieza y del proyecto 32248 exp. ARQ105/2018 (Gobierno de Murcia). Agradecemos al grupo de espeleología G.E.C.A de Cieza su importante colaboración en la exploración de la cavidad y su apoyo constante al proyecto de la Cueva del Arco.

Referencias

- Alhama, I., García-Ros, G., Alhama, F. (2020). Integrated water resources management in the basin of the Segura River (southeast Spain); an example of adaptation to drought periods. *Environ. Earth Sci.* 79: 7.
- Audra, P., Mocochain, L., Bigot, J.Y. et al. (2009). The association between bubble trails and folia: a morphological and sedimentary indicator of hypogenic speleogenesis by degassing, example from Adouste Cave (Provence, France). *Int. J. Speleol.* 38(2), 93-102.
- Barriquand, L., Bigot, J-Y., Audra, Ph., et al., (2021). Caves and bats: Morphological impacts and archaeological implications. The Azé Prehistoric Cave (Saône-et-Loire, France). *Geomorphology* 388: 107785.
- De Waele, J., D'Angeli, I., Audra, Ph., Plan, L., Palmer, A.N. (2024) Sulfuric acid caves of the world: A review. *Earth-Science Reviews.* 250: 104693-
- Gázquez, F., Calaforra, J.M., Rull, F. (2012). Boxwork and ferromanganese coatings in hypogenic caves: an example from Sima de la Higuera Cave (Murcia, SE Spain). *Geomorphology* 177–178: 158–166.
- Gázquez, F., Calaforra, J.M. (2013). Origin of double-tower raft cones in hypogenic caves. *Earth Surf. and Land. Process.* 38: 1655–1661.
- Gázquez, F., Calaforra, J.M., Rodríguez-Estrella, et al., (2017). Evidence for regional Hypogene Speleogenesis in Murcia (SE Spain). *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*. Springer International Publishing AG 2017.
- Hill C.A., Forti P (1997) *Cave minerals of the world* (2nd ed.). National Speleological Society, Huntsville, Alabama, 464 p.
- Klimchouk, A.B. (2009) Morphogenesis of hypogenic caves. *Geomorphology* 106, 100–117.
- Jerez-Mir, L., García-Monzón, G., Jerez-Mir, F. (1972). Mapas Geológicos de España 1:50.000. Hoja 890 (Calasparra). Instituto Geológico y Minero de España.
- Martín-Lerma, I., Román, D., Armellini, J. et al. (2023) First Data from the Prehistoric Site Complex of Cueva del Arco (Murcia, Spain). *J Paleo Arch* 6, 19.
- Ros, A., Llamusí, J.L., Sánchez, J. (2014). Cuevas hipogénicas en la Región de Murcia – España. Tomo 1. Centro de Estudios de la Naturaleza y el Mar. Murcia. 46pp.
- Onac, B. P., Sumrall, J., Tămaș, T., Povară, I., Kearns, J., Dârmiceanu, V., Veres, D., Lascu, C. (2009). The Relationship Between Cave Minerals and H₂S - Rich Thermal Waters along Cerna Valley (SW Romania). *Acta Carsologica*, 38(1).
- Onac B.P., Hutchinson S.M., Geantă A., Forray F.L., Wynn J.G., Giurgiu A.M., Coroiu I. (2015) - A 2500-yr late Holocene multi-proxy record of vegetation and hydrologic changes from a cave guano-clay sequence in SW Romania. *Quat. Res.* 83 (3): 437-448.

La galería de Las Cortes: una pequeña mina abandonada en el Parque Nacional de Guadarrama, España

Jordá-Bordehore, L.¹, Mezga, K.², Gullón Corral, L.³, Jordá-Bordehore, R.⁴, Rosado, S.⁵

1 ETSI Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/Prof. Aranguren, s/n, 28040 Madrid, España, l.jorda@upm.es

2 Institute SeMe, Environmental Awareness and Sustainable Development, Poljane. Eslovenia kim@i-seme.si

3 Fundación Gómez Pardo C. de Alenza, 1, 28003 Madrid, España direccion.tecnica@fgomezpardo.es

4 Geólogos del Mundo-World Geologists, C/ de Raquel Meller, 7, 28027 Madrid, España rafael_jorda@hotmail.com

5 Fundación Gómez Pardo C. de Alenza, 1, 28003 Madrid, España santiago.rosado@fgomezpardo.es

Resumen

La mina de Las Cortes es una pequeña galería minera abandonada del siglo XIX situada en las faldas de la montaña de Siete Picos, Madrid. Se trata de la única mina conservada dentro del perímetro del Parque Nacional de Guadarrama. Se tienen pocos datos sobre esta mina que benefició un pequeño filoncillo de wolframita. Se trata de una interesante y didáctica excursión en el marco de actividades geológicas en el parque, poco conocida y aun no explotada. Durante los confinamientos del COVID19 en 2020, dado que no se podía salir de la provincia de Madrid y las clases universitarias eran *online*, aprovechamos para visitar la mina, escanearla y generar una serie de contenidos didácticos en Realidad Virtual, orientados al público universitario. En estas líneas presentamos los últimos "productos" docentes con nuevos escáneres y datos tomados en una nueva campaña de campo en 2024, dentro del proyecto patrocinado por la EIT, RISBRIEFCASE.

Palabras clave: didáctica, gemelo digital, patrimonio minero, realidad virtual.

Las Cortes adit: a small abandoned mine in the Guadarrama National Park, Spain.

Abstract

The Las Cortes mine is a small, abandoned mining gallery from the 19th century located on the slopes of the Siete Picos mountain, Madrid. It is the only mine preserved within the perimeter of the Guadarrama National Park. There is little data about this mine, which exploited a small vein of wolframite. This is an interesting and educational excursion within the framework of geological activities in the park, little known and not yet exploited. During the COVID19 confinements in 2020, given that you could not leave the province of Madrid and university classes were online, we took the opportunity to visit the mine, scan it and generate a series of educational content in Virtual Reality, aimed at the university public. In these lines we also present a series of new scans and data taken in a new field campaign in 2024, within the EIT founded RISBRIEFCASE educational project.

Keywords: didactics, digital twin, mining heritage, virtual reality.

Introducción y objetivos

También conocida como la mina de “Siete Picos”. Se trata de una pequeña minilla situada a una altitud de 1.450 metros, en la zona conocida como Collado Albo – Pradera de Las Cortes en la vertiente madrileña del Puerto de Navacerrada. Es el único vestigio minero conocido en el interior del Parque Nacional de Guadarrama. La galería data de los años 1856 a 1859 (Jordá, 2009). Parece ser que después de la Guerra Civil se explotó durante un tiempo para intentar extraer wolframio (Jordá, 2011). La mina encaja en adamellitas porfídicas de grano grueso, tipo La Granja (Figura 1).

La mina es difícil de encontrar. Parte de una pequeña calicata de unos 3 metros que desemboca en una galería de 30 metros de longitud con dos cortos ramales siguiendo un filón (Jordá, 2009, 2011). La pequeña escombrera de la mina es visible desde El Ventorrillo, en la subida al Puerto de Navacerrada, antes de llegar a la Fuente de Los Geólogos, pero el acceso no se realiza desde ahí. El acceso a pie empieza en el embalse de Navalmedio y remonta el arroyo homónimo. tras 1.500 metros recorridos por una buena senda – pista, se alcanza la gran pradera de Las Cortes, con las ruinas de unos cimientos hacia la montaña, hacia la vía del tren que contornea Siete Picos. Desde las ruinas hay que remontar el barranco ascendiendo un desnivel de unos 50 metros. Se llega a unas escombreras y a la bocamina.

Históricamente demarcada en el siglo XIX como mina de piritas arsenicales (arsenopirita), en los mapas topográficos figura como mina de cobre. Hemos encontrado escaso mineral en las escombreras, solo algunos fragmentos de cuarzo de aspecto tostado, con trazas de óxidos y arsenopirita alterada. En el interior de la galería se aprecian algunos filoncillos de cuarzo en los hastiales y el techo. En Jiménez *et al.* (2013) se describen muestras de mineral de esta mina, no sabemos si del interior o de escombrera, catalogadas en el Museo Geominero, en concreto: arsenopirita, clorita, cuarzo, wolframita.

El objetivo del trabajo fue el de replicar la toma de datos geotécnicos en una galería minera mediante realidad aumentada en un repositorio digital abierto. El proyecto comenzó durante la pandemia de COVID 19 pero se amplió durante los siguientes años para su empleo en docencia híbrida, en la cual parte de la materia se da de forma presencial y otra “online”. Para ello se visitó una galería minera “sencilla” donde tomar datos reales y “virtualizarla”. Es decir, generar un “gemelo digital” en el cual tomar datos como si estuviésemos en el campo. A partir de estos datos se pueden llevar a cabo análisis equivalentes sin tener que ir al terreno, a modo de simulador de vuelo.

Trabajo de campo

Se hicieron varias salidas de campo con el doble objetivo de tomar datos geotécnicos subterráneos y escanear la galería para hacer un modelo digital de la misma. Los datos geotécnicos reales de campo son los que se van a subir al repositorio digital o herramienta de Realidad Aumentada. Se realizaron tres estaciones geomecánicas en la galería: en el emboquille, centro de la galería y el cruce al final de la misma. Se tomaron datos de Resistencia de la roca mediante esclerómetro, análisis de orientación de las juntas y las propiedades de las discontinuidades con objeto de determinar parámetros de las juntas y el macizo y los índices geotécnicos Rock

Mass Rating e índice Q, cuyos resultados no son objeto de esta presentación. Se escaneo la totalidad de la galería mediante fotogrametría Structure from Motion e iPhone con Lidar, así como toma de fotografías esféricas 360°.



Figura 1. Contexto geológico de la mina Las Cortes en Navacerrada (modificado sobre IGME-Hoja Magna 508)

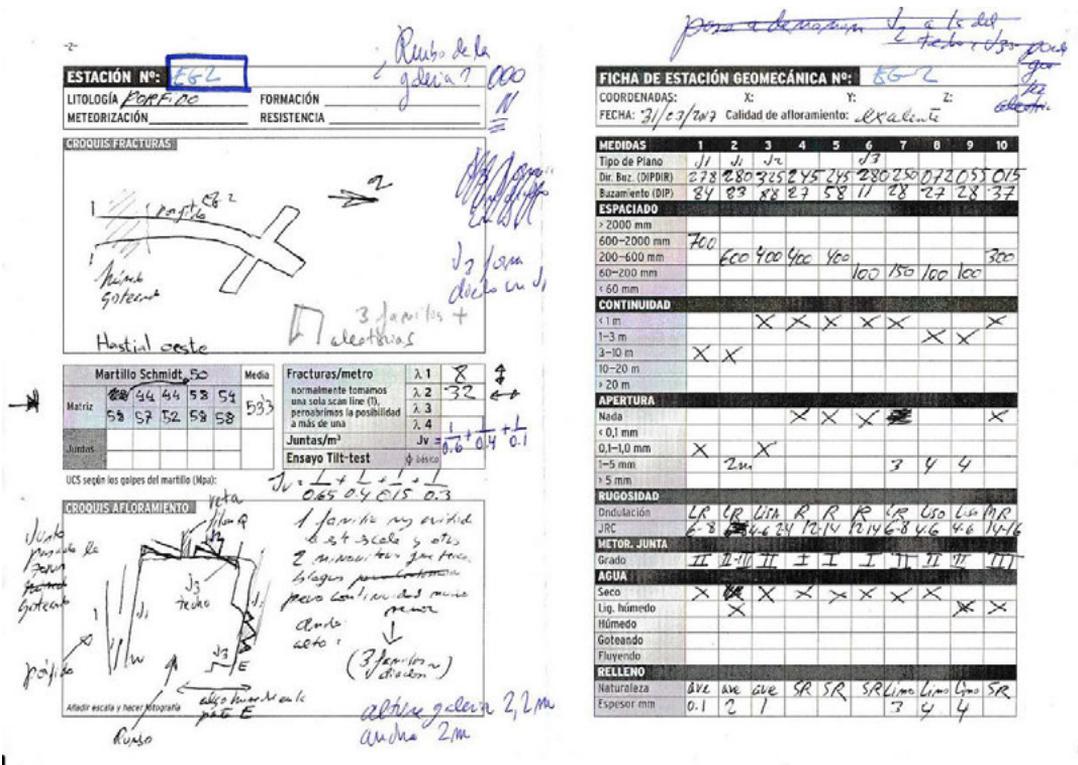


Figura 2. Estación geomecánica realizada en la mitad de la galería de Las Cortes

Resultados y discusión

La mina se virtualizó de dos formas, por un lado una serie de fotografías esféricas 360° que se ensamblaron en un documento denominado "tour 360" o itinerario virtual. Además de esto se hicieron varios escáneres de la galería para virtualizarla en 3D y acceder a información de la misma en un repositorio en la plataforma Sketchfab.

La imagen superior muestra el resultado educacional elaborado. La figura 4-a es la pantalla de acceso a los diferentes entornos virtuales de túneles de grado de dificultad variado. La figura b es el código QR de acceso a la plataforma, para facilitar su aplicabilidad rápida en aula con el móvil. La figura c muestra una de las ventanas con información desplegable.

En una plataforma comercial de realidad aumentada en la que se puede navegar con ordenador, móvil, tablet o bien gafas de Realidad Virtual se ha subido la información geotécnica tomada en campo. En lugar de ir al campo (con sus connotaciones de costes, riesgos o incomodidades) se accede al entorno virtual donde diferentes escenarios muestran diferentes zonas de la mina donde se va colocando la información en menús desplegables. El alumnado toma esta información como se estudia en el campo, usando una libreta o plantilla de toma de datos (Figura 5) equivalente a la que hemos usado en campo, estación geomecánica (Figura 2).



Figura 3. Zona central de la galería donde se tomó una de las fotografías 360° para elaborar los escenarios virtuales



b



Figura 4. Imágenes del "juego" virtual en la plataforma Cospaces en la que se colocan diversas pistas e información tomada en campo

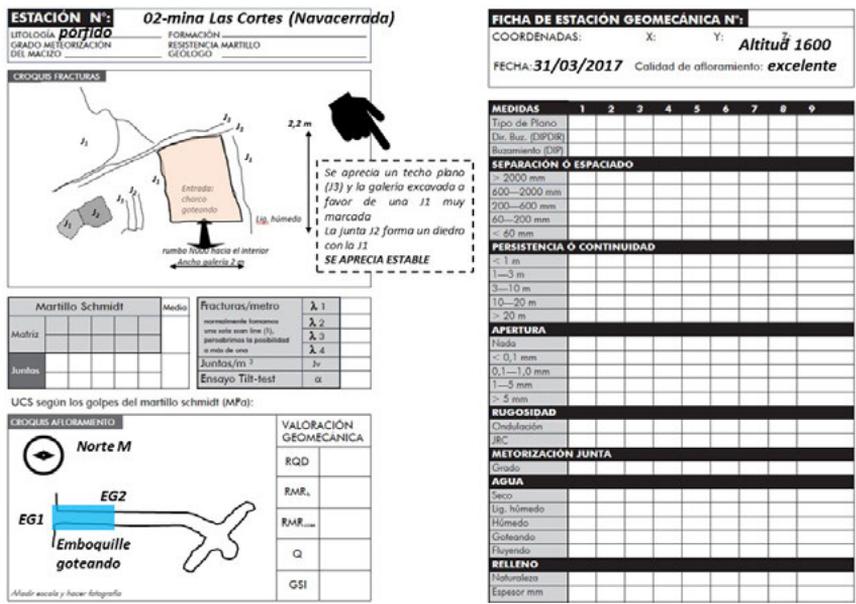


Figura 5. Plantilla utilizada para tomar datos geomecánicos en el entorno virtual

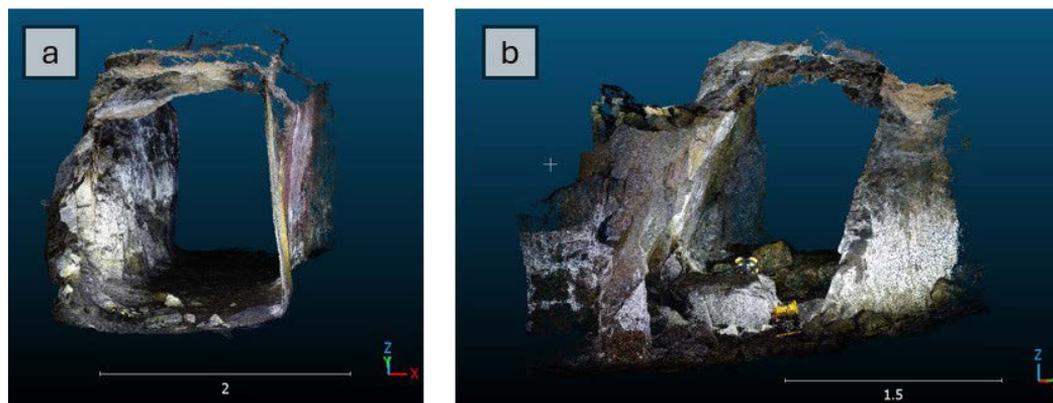


Figura 6. Modelos digitales escaneados de la mina

La Figura 6 muestra la nube de puntos de los modelos digitales de varios sectores de la mina. Los modelos digitales pueden visualizarse mediante un programa como Cloudcompare y de forma remota se pueden tomar datos de orientación de las principales familias de juntas (Girardeau-Montaut, 2023). En este caso no hay tantas “pistas” de información geotécnica en el sistema, sino simplemente un modelo digital que puede estudiarse con diferentes herramientas dependiendo del tipo de análisis geotécnico requerido. Fuera de este ámbito académico ingenieril, estos mismos repositorios y modelos pueden emplearse con fines didácticos de cursos inferiores, educación secundaria e incluso primaria, simplemente cambiando los contenidos en cada uno de los escenarios virtuales.

Referencias

- Cospaces (2023). Clasificaciones geomecánicas y túneles virtuales <https://edu.cospaces.io/TLS-TUT> consultado 21/07/2024
- Girardeau-Montaut (2023). <https://www.danielgm.net/cc/> consultado el 21/07/2024
- IGME. Hoja Geológica Cercedilla. Magna 2ª serie, nº 508
- Jordá (2011) Mina de las Cortes. Navacerrada Madrid <https://speleominas.blogspot.com/2011/05/mina-de-las-cortes-navacerrada-madrid.html> Consultado el 21/07/2024
- Jordá (2002). Homenaje a Vicente Sos Baynat. Una excursión geológica inédita a una mina de cobre en Siete Picos (Sierra de Guadarrama, Madrid). Boletín de la Institución Libre de Enseñanza.
- Jordá (2009). La minería de los metales en la provincia de Madrid : Patrimonio minero y puesta en valor del espacio subterráneo. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/2061/1/LUIS_JORDA_BORDEHORE.pdf
- Jiménez et al (2013). Colección de minerales de las Comunidades y Ciudades Autónomas del Museo Geominero: Catálogo de la Comunidad de Madrid. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Cuadernos del Museo Geominero nº 16.

Discusión sobre la aplicabilidad de metodologías empíricas “tuneleras” para análisis de estabilidad de cuevas: caso del tubo de lava de Al-Badia, en Harrat Al-Shaam, Jordania

Jordá-Bordehore, L.¹, Al-Malabeh, A.², Abdelmadjid, B.³,
Jordá-Bordehore, R.⁴

¹ ETSI Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/Prof. Aranguren, s/n, 28040 Madrid, España, l.jorda@upm.es

² Department of Earth and Environmental Science, P.O.Box 150459, 13115 – Zarka / Jordan, am@hu.edu.jo

³ ETSI Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/Prof. Aranguren, s/n, 28040 Madrid, España, abdelmadjid.benrabah@alumnos.upm.es

⁴ Geólogos del Mundo-World Geologists, C/ de Raquel Meller, 7, 28027 Madrid, España, rafael_jorda@hotmail.com

Resumen

La cueva de Al-Badia es un tubo de lava volcánico de 445 m de longitud situado en las jóvenes coladas basálticas olivínico - alcalinas del complejo volcánico de Harrat Al-Shaam en Jordania (Al-Malabeh, 1994). La cueva fue descubierta por primera vez por Al-Malabeh en 1985 y examinada detalladamente en 2003 por Al-Malabeh, Kempe y Henschel y comenzó a ser pulida en 2006 (Al-Malabeh et al., 2006). En el presente trabajo se analiza su estabilidad y grado de riesgo a partir de la toma de datos con estaciones geomecánicas. Los criterios geomecánicos empleados son de tipo empírico e incluyen el Rock Mass Rating - RMR (Bieniawski, 1973), índice Q (Barton, 1974), método minero del ancho escalado (Carter y Miller, 1995) y el recientemente creado índice geomecánico de cuevas o CGI. Durante la toma de datos se elaboraron modelos tridimensionales de la entada y varias secciones características de la cueva que pueden visualizarse en un repositorio y Realidad Aumentada. Los métodos empíricos de análisis de espacios subterráneos o clasificaciones geomecánicas nacieron en ellos años 1970 para evaluar la estabilidad y necesidades de sostenimiento de túneles y minas; se llevan aplicando a todo tipo de litologías en numerosísimos países del mundo. En el presente trabajo se discuten los resultados de su aplicación en cuevas valorando cuáles de ellos son más razonables y cuáles excesivamente alarmistas o conservadores en el caso particular de la cueva analizada.

Palabras clave: clasificaciones geomecánicas, estabilidad, geotecnia, túneles.

Discussion on the applicability of empirical “tunnelling” methodologies for cave stability analysis: case of the Al-Badia lava tube in Harrat Al-Shaam/Jordan

Abstract

Al Badia cave is a 445 m length lava tube located in the young alkali olivine basaltic lava flows of the Harrat Al-Jabban volcanics in Jordan (Al-Malabeh, 1994). It was mapped by Kempe and Al-Malabeh in 2005. Al-Badia Cave is a 445 m long volcanic lava tube located in the young olivine/alkaline basaltic flows of the Harrat Al-Al-Shaam volcanic complex in Jordan (Al-Malabeh, 1994). The cave was first discovered by Al-Malabeh in 1985 and detailed surveyed in 2003 by Al-Malabeh, Kempe and Henschel and start pulished in 2006 (Al-Malabeh et al., 2006). In this work, its stability and degree of risk are analyzed based on data collection with geomechanical stations. The geotechnical stability approach used is empirical and includes the Rock Mass Rating -- RMR (Bieniawski, 1973), Q Index (Barton, 1974), scaled span mining

method (Carter and Miller, 1995). During the field data collection, three-dimensional models of the cave entrance and several characteristic sections where scanned and can be viewed in a online repository and Augmented Reality. Empirical methods for analyzing underground spaces using geomechanical classifications were born in the 1970s to evaluate the stability and support needs of tunnels and mines (Jordá, 2017). They have been applied to lithologies in numerous countries around the world. In this work, the results of their application in caves are discussed, assessing which of them are more reasonable and which are excessively alarmist or conservative in this particular case of the cave analyzed.

Keywords: geotechnics, geomechanical classifications, tunnels, stability.

Introducción y objetivos

La cueva de Al-Badia es un tubo de lava volcánico situado en las jóvenes coladas basálticas olivínicas/alcalinas del complejo volcánico de Harrat Al-Shaam en Jordania (Figura 1). La cueva fue topografiada en 2005 por Kempe y Al-Malabeh y tiene una longitud de 445 m. La cueva tiene un único acceso a través de un colapso que requiere para su descenso, de unos 8 metros, de técnicas verticales de espeleología o bien el uso de una escala de gran longitud adecuadamente asegurada (Figura 2).

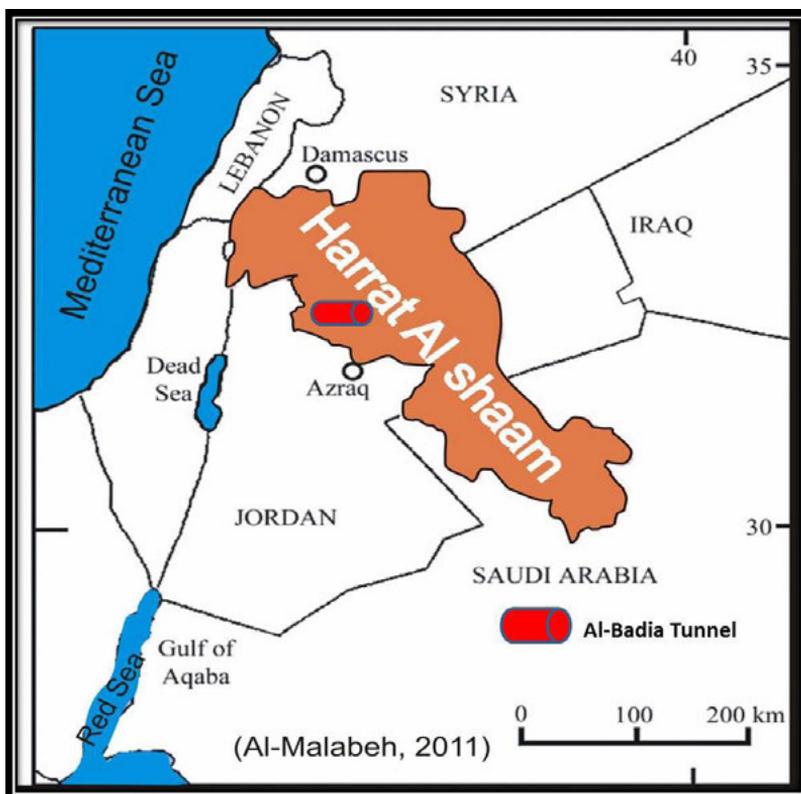


Figura 1. Mapa de la zona de estudio, el Campo de lava de Harrat Al-Shaam, al noroeste de la meseta de Arabia (Al-Malabeh y Hamed, 2020)

El objetivo del presente trabajo es mostrar unos resultados preliminares de estabilidad de la cueva tras la visita realizada a ésta y otros tubos de lava de Jordania en marzo de 2024. El análisis comprende únicamente metodologías empíricas (RMR (Bieniawski, 1973), Q (Barton, 1974) y ancho escalado (Carter y Miller, 1995) a partir de los datos tomados en campo en estaciones geomecánicas. Se discutirá la aplicabilidad de las metodologías de análisis de estabilidad de minas y túneles a cuevas naturales enfocado en un caso real: un tubo de lava de Jordania.



Figura 2. Cueva de Al-Badia: a) colapso de entrada, b) colapso visto desde abajo, con 16 metros de vano, estación geomecánica 3, c) sección de la cueva a unos 90 metros de la entrada: situación de la estación geomecánica 1, el vano se reduce a unos 12 m

Metodología

Las metodologías empíricas en base a clasificaciones geomecánicas para análisis de obras subterráneas se emplean de forma extensiva desde los años 1970 (Jordá, 2017), siendo las más empleadas el *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1973), y el índice Q (Barton, 1974). De forma paralela al desarrollo de su aplicación han surgido otras clasificaciones y variantes con aplicaciones a taludes y muchas de ellas específicas para minería, con aplicaciones particulares a grandes cámaras y pilares corona. Precisamente para analizar la estabilidad y riesgos asociados a pilares corona superficiales tanto en minas en activo como abandonadas surgió el método del ancho escalado (Golder 1990, Carter y Miller 1995, Carter et al. 2008, y Carter, 2014). No hay prácticamente referencias de su aplicación en cuevas, siendo sin embargo un campo de sumo interés para cuevas cerca de la superficie. Una aplicación posible es el de los tubos de lava someros (Benrabah et al., 2024b).

Bajo estas líneas mostramos la ecuación típica para determinación del índice Q (Barton, 1974). Nos remitimos a la extensa y conocida bibliografía para la justificación de sus parámetros y su aplicación reciente a la estabilidad de cuevas naturales (Jordá 2017, Bastidas et al., 2022, Rodríguez et al., 2023, Benrabah et al., 2024a).

$$Q = RQD / J_n \times J_r / J_a \times J_w / SRF \quad (1)$$

Por su parte el método del ancho escalado analiza la estabilidad en términos de factor de seguridad y probabilidad de fallo relacionando un vano máximo estable (S_c) con un ancho escalado (*Scaled span* o C_s) (Figura 3). A partir de las siguientes relaciones, remitimos a las referencias del método (Carter y Miller, 1995, Carter et al., 2008, y Carter, 2014).

$$FoS = S_c / C_s \quad (2)$$

$$S_c = 3,58 \times Q^{0.4} \quad (3)$$

$$C_s = S \left\{ \gamma / T (1 + S_R) (1 - 0.4_{\cos\theta}) \right\}^{0.5} \quad (4)$$

Por otro lado, la fórmula para la probabilidad de fallo dependiendo del factor de seguridad se define de la siguiente forma:

$$Pf(\%) = \frac{100}{1 + 441 \exp(-17 C_s / Q^{0.44})} \quad (5)$$

Resultados

El trabajo de campo consistió en la inspección de unos 150 metros de cueva en un ramal más accesible y otros 50 en otro ramal que parte del hundimiento y presenta pasajes más estrechos. Se realizaron varios escáneres mediante lidar de Iphone de las secciones más representativas del tubo de lava, incluyendo algunas con varios desprendimientos (Figura 4). Se realizaron también dos levantamientos fotogramétricos del colapso de entrada, mediante la técnica de

Structure from Motion (SfM) (Benrabah et al., 2024a), Algunas de las secciones escaneadas se han subido a un repositorio digital de libre acceso para su visualización mediante Realidad Virtual. Se han hecho 3 estaciones geomecánicas, una a unos 90 metros de la entrada, otra en las proximidades del colapso de entrada y una en la parte baja del colapso.

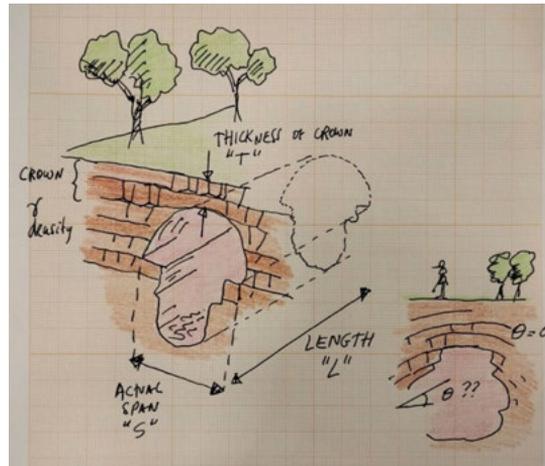


Figura 3. Concepto del ancho escalado minero aplicado a cuevas volcánicas (Benrabah et al., 2024 b)



Figura 4. Sección escaneada, donde se ha realizado la estación geomecánica #1

La imagen de la figura anterior es accesible en el siguiente enlace
<https://sketchfab.com/3d-models/bodia-cave-2-f346b60a3c98419bb1cf432c9839365a>

A continuación, se muestran los parámetros geotécnicos de cada una de las estaciones y la obtención de los índices geotécnicos RMR y Q para el análisis empírico de la estabilidad de la cueva (Tabla 1). Es importante notar que la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa se ha obtenido en la estación geomecánica 3 mediante esclerómetro y los valores de RQD en cada estación se han determinado en base al índice volumétrico de juntas (Jv) o bien mediante las juntas por metro lineal (Lambda).

		Estación 1		Estación 2		Estación 3	
		valor	puntuación	valor	puntuación	valor	puntuación
RMR1	UCS	42 MPa	4	42 MPa	4	42 MPa	4
RMR2	RQD	80%	15	95%	20	80%	15
RMR3	Espaciado	0,2 m	9	0,4 m	10	0,2 m	9
RMR4 Condición juntas	Continuidad	10-20 m	1	10-20 m	1	>20 m	0
	Abertura	>5mm	0	>5mm	0	>5mm	0
	Rugosidad	Muy rug.	6	Muy rug	6	Muy rug	6
	Alteración	Grad II-III	4	Grado II	5	Grado I-II	5
	Relleno	Limo	0	Rell. duro	2	Sin relleno	6
RMR5	agua	Lig humed	10	Lig.humed	10	seco	15
RMRb 89			49		58		60

Tabla 1. Rock Mass Rating obtenido en cada una de las estaciones

Los resultados del valor del RMR para las tres estaciones corresponden a la clase III de Bieniawski (entre 40 y 60) que implicaría en el caso de un túnel un refuerzo intenso en base a gunita y bulones, pero no requeriría en principio cerchas.

A continuación, mostramos los resultados del índice Q en cada estación (Tabla 2)

	Estación 1		Estación 2		Estación 3	
	valor	puntuación	valor	puntuación	valor	puntuación
RQD	80%	80	95%	95	80%	80
Número de juntas Jn	3 familias	9	4 familias	15	3 familias	9
Rugosidad de juntas Jr	Ondul rugosa	3	Ondul rugosa	3	Ondul rugosa	3
Alteración de juntas Ja	Relleno arcilloso	4	Algo alterada	2	Algo alterada	2
Factor agua en juntas Jw	Lig hum	1	Lig hum	1	seco	1
Tensiones SRF	Bajas tensiones cerca superf	2,5	Ancho mayor prof	5	Ancho mayor prof	5
Índice Q		2,7		1,9		2,7
Ancho o vano real		12 m		16 m		16 m
Coefficiente reductor túneles ESR		0,8		0,8		0,8
B/ESR ancho de proyecto para túneles		15 m		20 m		20 m

Tabla 2. Valores del índice Q obtenido en cada una de las estaciones

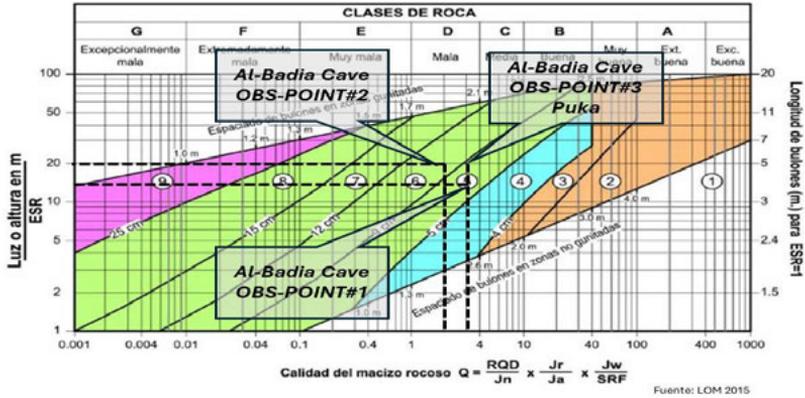


Figura 5. Estabilidad de cada tramo de cueva según la metodología empírica de túneles (sobre gráfico de LOM, 2015)

En la figura anterior se han situado los 3 puntos de análisis teniendo en cuenta un criterio “tunelero”, donde se ha dividido el ancho real de cada tramo de cavidad por el coeficiente ESR que para un lugar de acceso público sería de 0,8. Los resultados muestran que todos los puntos están lejos de la zona “1” de autoestable, en la que no se requiere soporte. Los puntos correspondientes a las secciones de estudio caen en las zonas 5 y 6, que se recomienda tanto bulones como gunita para acceder con seguridad por las galerías, requieren por tanto bastante refuerzo.

En la figura 6 se aplica un criterio específico para cuevas (Jordá, 2017).

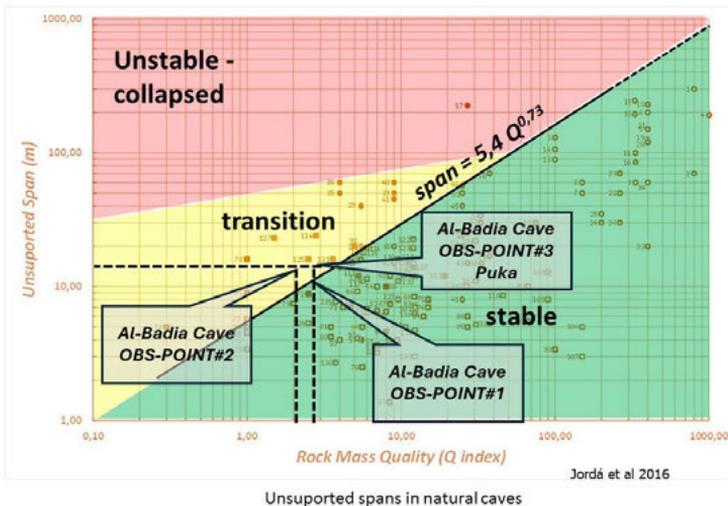


Figura 6. Estabilidad de cada tramo según la metodología empírica de cuevas (sobre gráfico de Jordá, 2017)

En esta figura se analiza la estabilidad de cada uno de los tramos únicamente a través del ancho real y la calidad de roca, empleando un gráfico empírico específico para cuevas (Jordá, 2017). En este caso ninguno de los tramos aparece en zona de colapso, el punto 1 de menor ancho aparece en el límite de zona estable – transición, y los otros dos puntos, incluyendo el hundimiento de la entrada aparece en la zona de transición. Estos puntos no reflejan adecuadamente la realidad observada, el punto 3 del hundimiento debería aparecer en zona de colapso pues es de hecho un colapso. No sabemos si el hundimiento es total o bien había una apertura tipo skylight previa, típica de tubos de lava en los que no se cierra la costra del techo. Por su parte el punto 2 corresponde a una zona de caída de bloques que ha evolucionado hasta la formación de un arco natural de descarga por lo que también debería de aparecer más cerca de la zona de colapso: por tanto, en el caso de estos dos puntos no parece que el grafico esté del lado de la seguridad y es preciso “ajustar” estas líneas limite. Por ultimo podría ser que algún parámetro geotécnico (J_n) esté sobrevalorado.

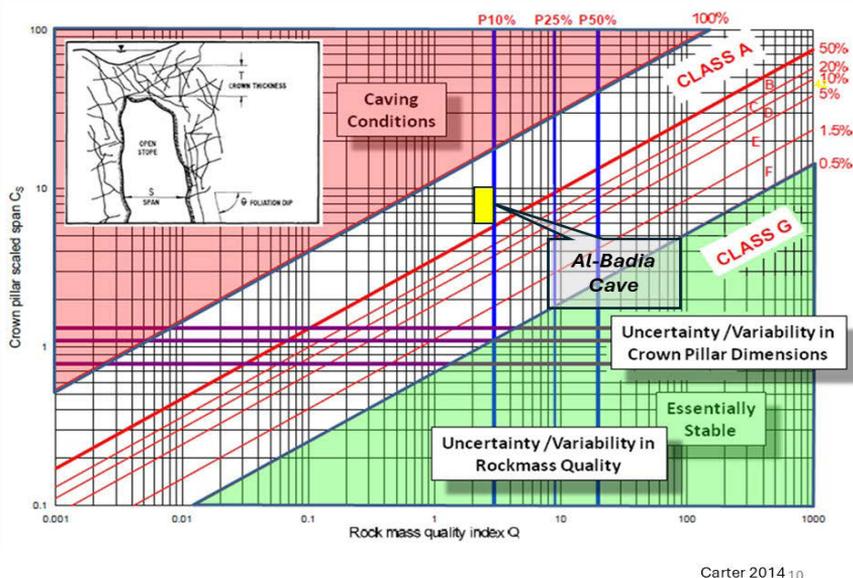


Figura 7. Estabilidad general de la cueva según la metodología de ancho escalado (sobre gráfico de Carter, 2014)

El método ancho escalado es complejo en cuanto a geometría y no considera únicamente el vano sino varios parámetros geométricos más, que lo modifican en un “ancho escalado” (Figura 7). Según el análisis del gráfico de ancho escalado la cavidad se encontraría en la zona A-B que correspondería a un factor de seguridad de “1” o menor, por tanto, en una situación crítica de estabilidad ante el colapso. Las recomendaciones para estas zonas son claras: evitar el acceso público, monitoreo sofisticado y en cuanto a su estabilidad: “Muy corto plazo -solo para propósitos mineros temporales - riesgo inaceptable en emboquille de túneles”. En este caso la cavidad tiene miles de años, y el único colapso exterior es el colapso de entrada. Como en el caso anterior, parece igualmente un criterio muy conservador.

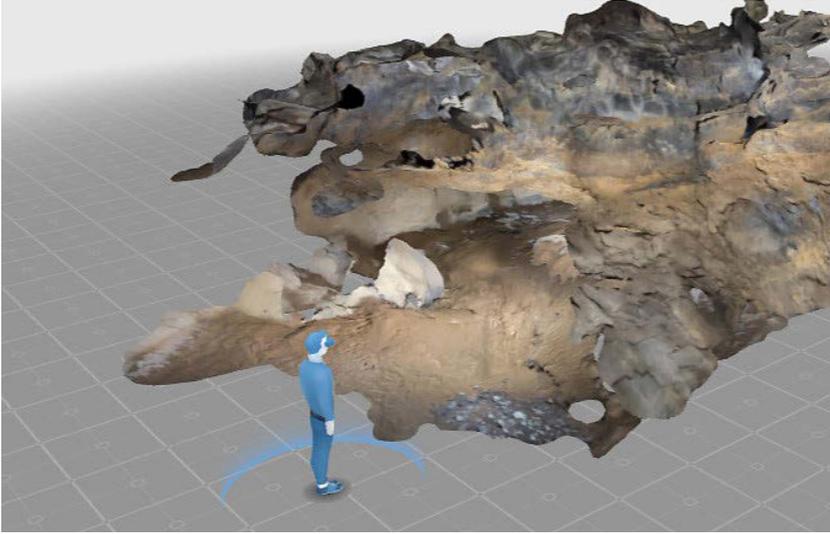


Figura 8. Visualización de la cueva mediante Realidad Aumentada

Dentro de los trabajos en curso está el “subir” la información geotécnica al repositorio virtual, y que el observador pueda además de recorrer la cueva (figura 8) tomar datos en menús desplegables y replicar los cálculos.

Discusión

Tras tomar los datos geotécnicos en campo mediante estaciones geomecánicas se ha realizado un análisis de estabilidad de tres tramos de la cueva mediante metodologías empíricas “tuneleras” y “mineras”, resultando en general excesivamente conservadoras. Estos resultados del análisis del RMR nos parecen muy conservadores para un tubo de lava que, aun con varias zonas con bloques desprendidos, estos parecen muy antiguos y la cueva está estabilizada tras miles de años abierta. La estabilidad según el índice Q se ha evaluado en primer lugar mediante un gráfico típico de túneles, resultando que la cavidad no es estable a largo plazo y requiere un importante refuerzo de gunita y bulones. Nos parece excesivo dado que la cueva, aun con algunos colapsos puntuales y desprendimientos es globalmente estable y los refuerzos que se necesitarían serían: sostener algún bloque puntual y estabilizar alguna laja. Por su parte el gráfico específico para cuevas e índice Q sugiere que la cueva está en zona de transición: no se diferencian bien las situaciones del colapso de entrada y las galerías del fondo más estables. Creemos en este caso que sería conveniente “afinar” alguno de los parámetros del Q calculado, pues en el caso particular de la estación 3 del colapso debería aparecer en el gráfico en zona “hundida”. Para el método de ancho escalado se ha considerado un tramo de cueva de 90 metros que ha incluido las tres estaciones. Los resultados del ancho escalado sugieren una situación en el límite de la estabilidad y recomiendan no acceder al lugar; estas indicaciones parecen contradictorias con lo observado, a nivel general, la cueva no amenaza colapso.

Las metodologías empíricas de túneles (RMR y Q con gráfico específico de túneles)- y mineras

de ancho escalado resultan para esta situación demasiado conservadoras y aportan soluciones constructivas muy "agresivas" o bien el no acceso a la cavidad. Por tanto, creemos que no son en este caso adecuadas y a nivel general deben de revisarse, lógicamente con muchos casos de aplicación. La cueva es estable a nivel global, pero puntualmente ha habido desprendimientos importantes. Por tanto, el grafico específico Q ancho para cuevas es más realista, a excepción del colapso (estación 3). Las metodologías tuneleras y mineras consideran excavaciones que llevan escasos años abiertas y están en proceso de estabilización. Su aplicación a cavidades naturales que llevan a veces miles de años evolucionando y se han estabilizado globalmente es cuanto menos discutible y debe de evaluarse en cada situación. En todo caso este tipo de cuevas requiere una inspección periódica de bloques y lascas y aplicar refuerzos puntuales, que pueden ser ocasionalmente bulones o impregnaciones de resinas, técnicas que no están descritas en los gráficos empíricos de obras subterráneas. Todas estas observaciones se van a incorporar progresivamente en modificaciones del grafico Q-ancho de Jordá (2017) específicamente para cuevas volcánicas.

Referencias

- Al-Malabeh, A. 1994. Geochemistry of Two Volcanic Cones from the Intra- continental plateau Basalt of Harra El-Jabban, NE-Jordan. In Basaltic rocks of Various Tectonic Setting, Special Issue of the Geochemical Journal. 28: 542-558, Japan.
- Al-Malabeh, A., Frehat, M., Henschel, H.-V. & Kempe, S., (2006) Al-Fahda Cave (Jordan): the longest lava cave yet reported from the Arabian Plate. - Proc. 12th Intern. Symp. on Vulcanospeleology, Tepoztlán, Mexico, 2-7 July, 2006, Assoc. for Mexican Cave Studies, Bull. 19 and Sociedad Mexicana de Exploraciones Subterráneas Bol. 7: 201-208.
- Al-Malabeh, A, Hamed, R. 2020. Enrichment of radon (^{222}Rn) concentration in Remah volcano, NE-Jordan. Iraqi Geological Journal Vol.53, No. 2B, 58-70.
- Barton, N., 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support.
- Bastidas, G.; Soria, O.; Mulas, M.; Loaiza, S.; Jordá-Bordehore, L. (2022). Stability Analysis of Lava Tunnels in Santa Cruz Island (Galapagos Islands, Ecuador) Using Rock Mass Classifications: Empirical Approach and Numerical Modeling. Geosciences, 12, 380.
- Benrabah, A., Domínguez, S. S., Bordehore, L. J., Alonzo, D. A., Herrero, A. D., & de Andrés Herrero, M. (2024a). Preliminary Assessment of Badajo Cave (Segovia, Spain) Stability Using Empirical, Numerical and Remote Techniques. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1295, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.
- Benrabah, A., S. Senent, and L. Jordá-Bordehore. "Application of the scaled span method for stability analysis of volcanic caves." *New Challenges in Rock Mechanics and Rock Engineering*. CRC Press, 2024b. 388-394.
- Benrabah, Abdelmajid, Salvador Senent Domínguez, Fernando Carrera-Ramírez, David Álvarez-Alonso, María de Andrés-Herrero, and Luis Jordá Bordehore. 2024c. "Structural and Geomechanical Analysis of Natural Caves and Rock Shelters: Comparison between Manual and Remote Sensing Discontinuity Data Gathering" *Remote Sensing* 16, no. 1: 72. <https://doi.org/10.3390/rs16010072>
- Bieniawski, Z.T. (1973) Engineering Classification of Jointed Rock Masses. *Transaction of the South African Institution of Civil Engineers*, 15, 335-344
- Carter, T. G. & Miller, R. I., 1995. Crown-pillar risk assessment-planning aid for cost-effective mine closure remediation. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, pp. 104:41-57.
- Carter, T., Cottrell, B. E., Carvalho, J. & Steed, C., 2008. Logistic Regression improve-ments to the Scaled Span Method for dimensioning Surface Crown Pillars over Civil or Min-ing Openings. *Proc. 42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd Can-US Rock Symp.* San Francisco., pp. Paper 08-282 10pp.

- Carter, T., 2014. Guidelines for use of the Scaled Span Method for Surface Crown Pillar Stability Assessment. Proc. 1st International Conference on Applied Empirical Design Methods in Mining, Lima-Perú.
- Golder, A., 1990. Report 881-1739 to CanMet on "Crown Pillar Stability Back-Analysis". Report #23440-8-9074/01-SQ, CANMET, pp. 90., s.l.: s.n.
- Jordá Bordehore, L., 2017. Stability Assessment of Natural Caves Using Empirical. Rock Mechanics and Rock Engineering, pp. DOI 10.1007/s00603-017-1216-0.
- Rodríguez, G.; Mulas, M.; Loaiza, S.; Del Pilar Villalta Echeverría, M.; Yanez Vinueza, A.A.; Larreta, E.; Jordá Bordehore, L. Stability Analysis of the Volcanic Cave El Mirador (Galápagos Islands, Ecuador) Combining Numerical, Empirical and Remote Techniques. Remote Sens. 2023, 15, 732. <https://doi.org/10.3390/rs15030732>

65 años del descubrimiento de la cueva de Nerja (Málaga): las excavaciones arqueológicas del profesor Francisco Jordá Cerdá y su equipo

Jordá Pardo, J.F.^{1,2}, Aura Tortosa, J.E.^{3,4} y Álvarez-Fernández, E.^{2,5}

¹ Departamento de Prehistoria y Arqueología. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Senda del Rey, 7. E-28040 Madrid. jjorda@geo.uned.es

² Grupo de Investigación Reconocido PREHUSAL, Universidad de Salamanca

³ Departament de Prehistòria i Arqueologia. Universitat de València. Avda. Blasco Ibañez, 28. E-46010 València. emilio.aura@uv.es

⁴ Grup PROMETEO SocPaleoMed, Generalitat Valenciana (CIPROM/2021/036)

⁵ Departamento de Prehistoria, Hª Antigua y Arqueología. Universidad de Salamanca. Calle Cervantes, s/n, E-37002 Salamanca (España). epanik@usal.es

RESUMEN

La cueva de Nerja fue descubierta en enero de 1959 y, ese mismo año, con motivo de las obras para su adecuación turística, se realizaron en ella excavaciones arqueológicas en varias de sus salas por parte del profesor Manuel Pellicer Catalán, a las que siguieron en 1962/63 las efectuadas en el Vestíbulo por la arqueóloga Ana María de la Quadra Salcedo. En 1965 el profesor Francisco Jordá Cerdá realizó excavaciones en las salas del Vestíbulo y de la Mina, que tuvieron continuidad en esta segunda sala durante 1966 y 1967 en codirección con el profesor Antonio Arribas Palau, cuyos resultados se plasmaron en una memoria con abundantes ilustraciones que nunca se llegó a publicar. Posteriormente, entre 1979 y 1987, el profesor Jordá realizó nuevas excavaciones arqueológicas sistemáticas en las salas del Vestíbulo y de la Mina en el marco de un proyecto de investigación desarrollado con un enfoque interdisciplinar. El estudio del registro arqueológico recuperado en estas excavaciones ha sido llevado a cabo por un amplio equipo liderado desde las universidades de Valencia, Salamanca y la UNED. Los resultados del proyecto han dado lugar hasta la fecha a 143 publicaciones en libros, actas de congresos y revistas nacionales e internacionales. De forma paralela se han defendido y se siguen realizando numerosos trabajos de investigación académicos y tesis doctorales sobre diferentes aspectos de la Prehistoria de la cueva. También se han realizado actividades de divulgación como exposiciones, cursos y conferencias. Los resultados de estas investigaciones han convertido al yacimiento arqueológico de la cueva de Nerja en una de las secuencias de referencia del Pleistoceno superior y Holoceno (30.000-3.600 años cal BP) del sur de Iberia y del Mediterráneo occidental. Sus ocupaciones humanas de los periodos Gravetiense, Solutrense, Magdaleniense, Epipaleolítico, Mesolítico, Neolítico y Calcolítico, han aportado datos e interpretaciones relevantes sobre la estratigrafía y cronología del Paleolítico superior del sur de Europa, los cambios paleogeográficos y paleoambientales en la costa malagueña del mar de Alborán, la utilización de los recursos vegetales y marinos, las aves, y sobre diferentes aspectos de la tecnología de las industrias líticas y óseas, la producción de adornos y los enterramientos.

Palabras clave: bibliometría, Cuaternario, historiografía, karst, prehistoria.

65 years since the discovery of the Cave of Nerja (Málaga): the archaeological excavations of Professor Francisco Jordá Cerdá and his team

ABSTRACT

The Cave of Nerja was discovered in January 1959 and, that same year, as part of the works for its tourist adaptation, archaeological excavations were carried out in several of its halls by Professor Manuel Pellicer Catalán, which were followed in 1963 those carried out in the Vestíbulo hall by the archaeologist Ana María de la Quadra Salcedo. In 1965, Professor Francisco Jordá Cerdá carried out excavations in the Vestíbulo and Mine rooms, which continued in this second room during 1966 and 1967 in co-direction with Professor Antonio Arribas Palau, the results of which were written in a report with abundant illustrations that never was published. Subsequently, between 1979 and 1987, Professor

Jordá carried out new systematic archaeological excavations in the Vestíbulo and Mine halls, within the framework of a research project developed with an interdisciplinary approach. The study of the archaeological record recovered in these excavations has been carried out by a large team led by the universities of Valencia and Salamanca and the UNED. To date, the results of the project have given rise to 143 publications in books, conference proceedings and national and international journals. In parallel, numerous research works have been defended and are being carried out, such as academic works and doctoral theses on different aspects of the Prehistory of the cave. Dissemination activities such as exhibitions, courses and conferences have also been carried out. The results of these investigations have turned the archaeological site of Cave of Nerja into one of the reference sequences of the Upper Pleistocene and Holocene (30,000-3,600 cal years BP) in southern Iberia and the western Mediterranean. Its human occupations from the Gravettian, Solutrean, Magdalenian, Epipaleolithic, Mesolithic, Neolithic and Chalcolithic periods have provided relevant data and interpretations on the stratigraphy and chronology of the Upper Paleolithic of southern Europe, the paleogeographic and paleoenvironmental changes on the Malaga coast of the sea. of Alborán, the contrasted use of marine resources, birds and plant resources, and on different aspects of the technology of stone and bone industries, the production of ornaments and burials.

Key words: bibliometry, historiography, karst, prehistory, Quaternary.

Introducción

La cueva de Nerja, situada en el extremo oriental de la provincial de Málaga (pedanía de Maro, municipio de Nerja), fue descubierta el 12 de enero de 1959¹. La noticia de su descubrimiento apareció en el diario SUR de Málaga el 22 de abril de 1959 y, al cabo de un año, se constituyó el Patronato de la Cueva de Nerja (22 de enero de 1960) con el encargo de que se abriera al público, lo que ocurrió el 12 de abril de 1960 (Giménez Reyna, 1964). La cavidad fue declarada Monumento Histórico Artístico por Decreto de 25 de mayo de 1961 (BOE 15/06/1961) y en 1968 se incluyó dentro del Paraje Pintoresco de los alrededores de Maro-Cueva de Nerja. Con la Ley 16/85 de Patrimonio Histórico Español pasó a ser considerada Bien de Interés Cultural (BIC) por contener arte prehistórico. En 2006 la Junta de Andalucía declaró la cueva BIC con categoría de Zona Arqueológica por Decreto 191/2006 de 31 de octubre de la Consejería de Cultura (BOJA 228 de 24/11/2006). Desde 2004 forma parte del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico de relevancia internacional del Instituto Geológico y Minero de España, en la unidad geológica Sistemas kársticos en carbonatos y evaporitas y en el contexto de los Yacimientos de vertebrados del Plio-Pleistoceno español (Jordá Pardo, 2008; <http://info.igme.es/ielig/>).

La primera época de excavaciones arqueológicas en la cueva de Nerja se inició con los trabajos de acondicionamiento de la cavidad, con una primera campaña dirigida por el profesor Manuel Pellicer Catalán (MPC) (1926-2018), entonces en la Universidad de Granada, entre septiembre de 1959 y mayo de 1960, que afectó a las salas del Vestíbulo, del Belén, de la Cascada, de los Fantasmas y del Cataclismo, y que permitió detectar una secuencia que comprendía desde el Epipaleolítico a la Edad del Bronce (Pellicer Catalán, 1962). La segunda campaña de excavación de esta primera época se desarrolló en el Vestíbulo en diciembre de 1962 y en abril-mayo de 1963 bajo la dirección de la arqueóloga Ana M^a de la Quadra Salcedo (1935-2012) que documentó una serie de niveles atribuidos al Solutrense. La tercera campaña (1965) fue dirigida por el profesor Francisco Jordá Cerdá (FJC) (1914-2004), catedrático de la Universidad de Salamanca, a quien se unió el profesor Antonio Arribas Palau (AAP) (1926-2002), catedrático de la Universidad de Granada, en la cuarta (1966) y quinta (1967) campañas de esta primera época, que afectaron

1 Intervinieron en el descubrimiento cinco jóvenes mareños, de entre 13 y 21 años: Francisco Navas Montesinos, José Torres Cárdenas, los hermanos Miguel y Manuel Muñoz Zorrilla y José Luis Barbero de Miguel.

a la sala de la Mina con una pequeña intervención en la del Vestíbulo. Las excavaciones se interrumpieron de forma abrupta hasta que, doce años después, en una segunda época, se reanudaron entre 1979 y 1987 bajo la doble dirección de los profesores Jordá y Pellicer, cada uno al frente de proyectos y equipos independientes, en las salas de la Mina (MPC y FJC), del Vestíbulo (FJC) y de la Torca (MPC). Todas estas campañas de excavaciones arqueológicas fueron financiadas por el Patronato de la Cueva de Nerja, antecedente de la actual Fundación Pública de Servicios Cueva de Nerja.

Este trabajo se centra en las excavaciones que el profesor FJC desarrolló en la primera y segunda épocas, haciendo especial mención a los diarios de campo, dibujos, fotografías y memorias no publicadas de la primera época (1965-1967), materiales todos ellos depositados en el Archivo Francisco Jordá Cerdá (Archivo FJC), y a los resultados de la segunda (1979-1987), que ya fueron presentados en el III congreso CUEVATUR, celebrado en Aracena (Jordá Pardo y Aura Tortosa, 2010).

Las excavaciones arqueológicas del profesor Francisco Jordá Cerdá. Primera época, 1965 - 1967

En esta primera época, la tercera campaña de excavación se llevó a cabo entre los días 12 de junio y 10 julio de 1965 en las salas del Vestíbulo y de la Mina. En ella participaron José Rodríguez Hernández y Javier Fortea Pérez, estudiantes de la Universidad de Salamanca, además de un máximo de tres obreros locales. Estas excavaciones, bajo la dirección de FJC, Delegado de Zona del Servicio de Excavaciones Arqueológicas de Salamanca, fueron autorizadas por el Servicio Nacional de Excavaciones Arqueológicas de la Dirección General de Bellas Artes del Ministerio de Educación Nacional, con fecha 12 de junio de 1965 y la firma de Gratiniano Nieto. En la autorización se indica que la financiación de la excavación corría a cargo del Patronato de la Cueva de Nerja y que los materiales recuperados se debían depositar en el Museo Arqueológico Provincial de Málaga. De esta campaña contamos con un diario manuscrito en una libreta tamaño cuartilla, con descripciones de los trabajos y dibujos de piezas a mano alzada, 20 hojas de papel milimetrado con los dibujos de las plantas de excavación y las estratigrafías de las catas realizadas en Vestíbulo y Mina, 34 hojas de inventario normalizado cumplimentadas de forma manuscrita con datos del yacimiento, número de inventario, fecha del hallazgo, número de cliché e inventario de los objetos encontrados, muchos de ellos ilustrados con dibujos a mano alzada y un informe mecanografiado, firmado por FJC el 1 de agosto de 1965.

Durante esta campaña, en la sala del Vestíbulo se abrió un nuevo cuadro de 1 m² contiguo al área excavada por Ana M^a de la Quadra, que fue denominado C-12 y en el que se documentaron estratos con abundantes restos cerámicos. En esta sala la excavación se dio por finalizada el 19 de julio. En la sala de la Mina se comenzó a excavar el 21 de junio y los trabajos duraron hasta el final de la campaña. Se abrió una cata de 2 x 1 m, cuya estratigrafía alcanzó una profundidad de 2,45 m. La secuencia estratigráfica obtenida se iniciaba con una corteza estalagmítica que fue preciso retirar, por debajo de la cual aparecieron una serie de niveles con las siguientes atribuciones culturales: nivel superficial, "Bronce I también llamado Eneolítico", "fase neolítica tardía" o "Neolítico II final", "materiales muy revueltos" del "Neolítico II", y "nivel de ocupación del "Neolítico andaluz".

La cuarta campaña tuvo lugar en diciembre de 1966 y en ella participó como codirector AAP, Delegado de Zona del Servicio de Excavaciones Arqueológicas de Granada, contando con la colaboración de Enrique Pareja López, M^a Soledad Navarrete Enciso, M^a Encarnación Serrano Ramos, Antonio de Luque Moraño y Francisco Portillo Freg, estudiantes de la Universidad de Granada, y Javier Fortea Pérez y José Rodríguez Hernández, estudiantes de la Universidad de Salamanca. De esta campaña no disponemos de los diarios de campo en el Archivo Francisco Jordá Cerdá, pues posiblemente se hizo cargo de ellos el profesor Arribas. Entre la documentación del Archivo FJC no se encuentra la correspondiente autorización de la Dirección General de Bellas Artes. De esta campaña no disponemos de diarios de campo.

De estas dos campañas, tercera (1965) y cuarta (1966), contamos con la memoria de las excavaciones en un único manuscrito, constituida por portada, 26 folios mecanografiados, 1 lámina con el corte estratigráfico de la excavación de la Mina (Fig. 1), 3 láminas con fotografías de la excavación (Fig. 1) y 16 láminas con dibujos a tinta y fotografías de materiales cerámicos y líticos y objetos de adorno, fechada en Nerja en septiembre de 1967². En la memoria, los dos investigadores describen una secuencia estratigráfica integrada por: una capa estalagmítica parcial y un nivel superficial, cuatro niveles (I, II, III y IV) con abundantes restos cerámicos, líticos, objetos de adorno y restos de fauna de mamíferos y malacológica, una capa estalagmítica y un Nivel V con una abundante industria lítica caracterizada por la presencia de raspadores, lascas buriloides, hojitas, hojitas de borde rebajado, lascas con retoque, núcleos y lascas, acompañados por guijarros pintados y escasos restos de fauna de mamíferos y malacológica (un hueso de cabra y varios de aves, un fragmento de *Pectunculus* y una valva de *Ostrea*). Sobre la atribución cultural de los cuatro niveles superiores y el superficial, todos con cerámica, ambos investigadores indican en la memoria que "Culturalmente, como podrá observarse fácilmente, no hay grandes variaciones en los cuatro niveles superiores y el superficial. Se puede decir que entre ellos existe una cierta unidad cultural. No obstante, de abajo arriba se puede observar una serie de hechos que son del mayor interés. Por ejemplo, la decoración sobre las vasijas es más frecuente en los niveles inferiores (IV y III) que en los superiores, mientras que en estos son más frecuentes los vasos o vasijas de fondo plano que en los inferiores, en los que aparecen tímidamente". Respecto al Nivel V, FJC y AAP afirman que "Los elementos que acabamos de describir nos informan acerca de la presencia de gentes del epipaleolítico en la Cueva de Nerja. El conjunto material, pobre y escaso, nos permite pensar en un núcleo de población que obtiene sus recursos alimenticios de la caza y de la pesca. La hojita de borde rebajado citada nos habla de unos hábitos de pesca semejantes a los descritos por Clark. A esta pesca con anzuelo hay que añadir la recogida de moluscos. ... La industria lítica, por su composición, nos recuerda a los conjuntos líticos epigravetienses de la región valenciana (Mallaetes, Barranc Blanc, Rates Penaes). Los microraspadores, la hojita de borde rebajado y las lascas buriloides son elementos que caracterizan a esta cultura costera de nuestro epipaleolítico mediterráneo. Por ello, aunque con las naturales reservas, proponemos considerar a esta pequeña serie industrial de la Cueva de Nerja como perteneciente a un Mallaetense final y su relación con las fases finales de los pueblos epigravetienses mediterráneos".

2 Los datos de portada de la memoria son: "EXCAVACIONES EN LA CUEVA DE NERJA. CAMPAÑAS III Y IV – 1965-1966. Autorizadas en 1965-1966. Financiadas por el PATRONATO DE LA CUEVA DE NERJA. Dirigidas: Prof. Dr. D. Antonio Arribas Palau, Prof. Dr. D. Francisco Jordá Cerdá. Colaboradores: D. Enrique Pareja López, Srta. M^a Soledad Navarrete Enciso, Srta. M^a Encarnación Serrano Ramos, D. Antonio de Luque Moraño, D. Francisco Portillo Freg, D. Javier Fortea Pérez y D. José Rodríguez Hernández. Nerja, septiembre, 1967" (Archivo FJC).

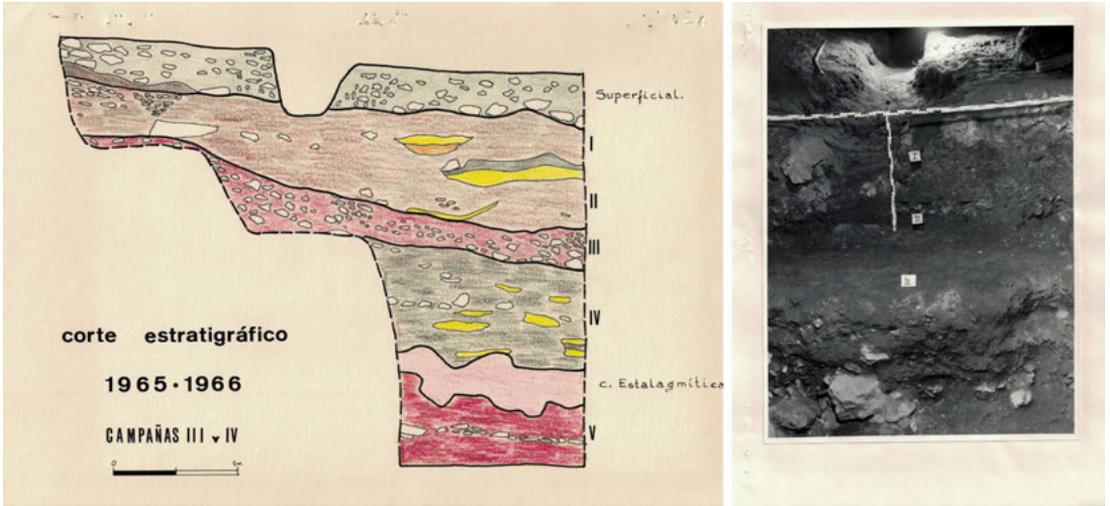


Figura 1. Dibujo (izquierda) y fotografía (derecha) de la sección estratigráfica obtenida en la sala de la Mina de la cueva de Nerja tras las campañas III y IV (1965-1966). Archivo FJC

La quinta campaña, dirigida por los profesores FJC y AAP, fue llevada a cabo en dos fases, del 19 de septiembre al 3 de octubre de 1967 y del 26 de diciembre de 1967 al 5 de enero de 1968. Durante la misma se continuaron los trabajos desarrollados en la sala de la Mina, ampliando la extensión de la cata abierta en ella. Contó con la subvención del Patronato de la Cueva de Nerja y la autorización del Servicio Nacional de Excavaciones Arqueológicas de la Dirección General de Bellas Artes del Ministerio de Educación Nacional, a nombre de los profesores FJC y AAP, firmada por Gratiniano Nieto el 19 de septiembre de 1967. En ella se indica que los materiales extraídos se deben depositar en el Museo de la Cueva de Nerja. En esta campaña participaron los licenciados Enrique Pareja López, M^a Encarnación Serrano Ramos, M^a Soledad Navarrete Enciso, Antonio de Luque Moraño y Francisco Portillo Freg, de la Universidad de Granada, y Javier Fortea Pérez y José Rodríguez Hernández, de la Universidad de Salamanca. También se contó con la colaboración de tres obreros mareños.

De esta quinta campaña (1967) disponemos de la memoria de las excavaciones, integrada por portada, 23 folios mecanografiados, 25 láminas sobre papel de la Facultad de Letras de la Universidad de Granada con fotografías de la excavación y de materiales cerámicos, líticos y óseos y objetos de adorno (Fig. 2), fechada en Nerja en septiembre de 1967³. Las fotografías de esta memoria están marcadas con el sello de Eduardo Ortega, fotógrafo de la Delegación Provincial de Excavaciones Arqueológicas de Málaga. El objetivo de esta campaña, según consta en la memoria, era la profundización en la cata de la Mina para alcanzar niveles del Paleolítico

3 Los datos de portada de la memoria son: "EXCAVACIONES EN LA CUEVA DE NERJA (MALAGA). Vª CAMPAÑA (1967). AUTORIZADAS por la DIRECCIÓN GENERAL DE BELLAS ARTES. FINANCIADAS por el PATRONATO DE LA CUEVA DE NERJA. DIRIGIDAS por: Prof. Dr. D. Antonio Arribas Palau, Prof. Dr. D. Francisco Jordá Cerdá. COLABORADORES: D. Enrique Pareja López, Srta. M^a Soledad Navarrete Enciso, Srta. M^a Encarnación Serrano Ramos, D. Antonio de Luque Moraño, D. Francisco Portillo Freg, D. Javier Fortea Pérez y D. José Rodríguez Hernández. Nerja, septiembre, 1967". La portada está sellada por la Delegación de Zona de Granada del Servicio Nacional de Excavaciones Arqueológicas de la Dirección General de Bellas Artes del Ministerio de Educación Nacional (Archivo FJC)

superior, por debajo del Nivel V, Epipaleolítico, por lo que se amplió la cata existente con objeto de obtener una superficie de trabajo más amplia que permitiera excavar los niveles infrayacentes al Nivel V, que se había alcanzado en la campaña anterior. Sin embargo, en la memoria se describe solamente el contenido de los niveles superficial, I, II y III, ricos en materiales cerámicos y líticos, pero no se mencionan los niveles inferiores. La parte gráfica de la memoria tampoco aporta información sobre la posible excavación de los niveles inferiores (Nivel V e infrayacentes), por lo que debemos suponer que no se alcanzaron los niveles paleolíticos que se esperaba encontrar.

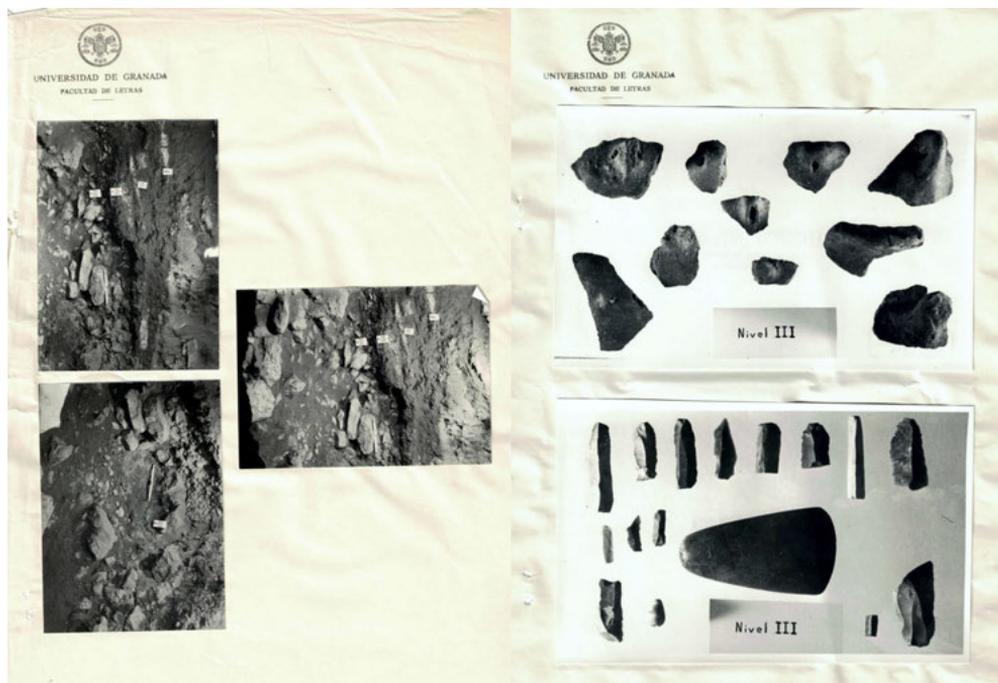


Figura 2. Fotografías de los cortes de la excavación (izquierda) y de materiales (derecha) de la sala de la Mina de la cueva de Nerja en la campaña V (1967). Archivo FJC

La potencia del registro estratigráfico de la sala de la Mina presagiaba la existencia de niveles del Paleolítico superior relacionados con las pinturas rupestres paleolíticas descubiertas en numerosas salas de la cavidad, pero las excavaciones se interrumpieron de forma abrupta e inexplicable, por lo que la localización de los niveles paleolíticos no pudo llevarse a cabo. Habrían de pasar 12 años hasta que se reanudaran.

Las excavaciones arqueológicas del profesor Francisco Jordá Cerdá. Segunda época, 1979 - 1987

Las excavaciones arqueológicas en la cueva de Nerja no se reanudaron hasta 1979, año en el que el Patronato de la Cueva de Nerja invitó a los profesores FJC (Universidad de Salamanca)

y MPC (Universidad de Sevilla) a continuar sus investigaciones en la cueva, con el compromiso de financiar dichos trabajos. Los trabajos del equipo dirigido por el profesor MPC se centraron en los depósitos holocenos (calcolíticos y neolíticos) de las salas de la Mina y de la Torca y comenzaron en el verano de 1979. Por su parte, los trabajos del equipo dirigido por el profesor FJC, centrados en los depósitos pleistocenos, comenzaron en noviembre de 1979 en la sala de la Mina, afectando a los niveles situados por debajo de los alcanzados por su colega MPC y a los del sector denominado Conducto Descubrimiento, y en diciembre de 1982 en la sala del Vestíbulo mediante la realización de un sondeo métrico adyacente al corte exterior de Ana M^a de la Quadra seguido de una excavación en extensión. Las excavaciones de ambos equipos prosiguieron en campañas anuales, con el apoyo económico del Patronato de la Cueva de Nerja, contando con los permisos de la Subdirección General de Arqueología y Etnografía del Ministerio de Cultura hasta 1983 y, a partir de 1984 y hasta 1987, de la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía. En 1988 la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía suspendió las excavaciones arqueológicas sistemáticas de ambos profesores al no concederles los preceptivos permisos al considerar la cueva de Nerja como un “yacimiento de peculiar interés, cuya excavación pondría en peligro su posterior estudio, por lo que conviene considerarlo, por el momento, como yacimiento en reserva”. A partir de ese momento, los trabajos de excavación se suspendieron, si bien las investigaciones continuaron a cargo de diferentes especialistas.

Las excavaciones del profesor FJC estuvieron enmarcadas en el proyecto interdisciplinar “Investigaciones Prehistóricas en la Cueva de Nerja” y se planificaron como una extensión de su actividad docente universitaria, pues por ellas pasaron más de 50 estudiantes y licenciados de diferentes universidades españolas y de otros centros de investigación, muchos de los cuales continuaron trabajando en el estudio de los diferentes materiales, muestras y datos recuperados durante las excavaciones. Entre los centros de investigación implicados, en el pasado y en la actualidad, se encuentran las universidades de Salamanca, Valencia, Oviedo, Granada, Barcelona, Nacional de Educación a Distancia (Madrid) y Lyon (Francia), el Museo Nacional de Ciencias Naturales (Madrid), el Instituto Geológico y Minero de España o el Servicio de Investigaciones Prehistóricas de la Diputación de Valencia, entre otros. En este marco se han realizado y se encuentran en curso de realización numerosas tesis doctorales y de licenciatura, Diplomas de Estudios Avanzados y Trabajos de Fin de Máster sobre aspectos concretos o generales de la Prehistoria de la cueva de Nerja. Entre las tesis doctorales defendidas cabe mencionar las realizadas sobre aspectos tales como las industrias líticas y óseas paleolíticas de la cueva de Nerja (Aura Tortosa, 1988), la geología de la cueva y su entorno (Jordá Pardo, 1992), la paleovegetación pleistocena y holocena a partir de los macrorrestos vegetales (Badal, 1990), la arqueozoología y tafonomía de los mamíferos (Pérez Ripoll, 1988), el Arte prehistórico (Sanchidrián Torti, 1991), o las estrategias de gestión de los recursos epipaleolíticos (Morales Pérez, 2015) y marinos así como su estacionalidad mediante la realización de análisis de isótopos estables en el tránsito Pleistoceno superior – Holoceno inferior (Aguirre Uribealago, 2024). La vocación formativa del proyecto se complementaba con la transmisión del conocimiento a la comunidad científica y a la sociedad mediante la difusión de sus resultados a través de publicaciones y congresos científicos y su divulgación mediante exposiciones, conferencias y cursos (ver Jordá Pardo y Aura Tortosa, 2010).

El total de publicaciones generadas hasta la fecha por las investigaciones derivadas de la segunda época de excavaciones arqueológicas del profesor FJC en la cueva de Nerja asciende a

143. Considerando los 45 años transcurridos desde 1979, la media de publicaciones por año es superior a 3. Desde 1981, todos los años han tenido publicaciones excepto 1997 y 1999, mientras que los años más prolíficos fueron 1986, con 14 publicaciones, 1998 con 9 trabajos y 2014 con 12 (Fig. 3). En 1986 se publicó la monografía sobre la Prehistoria de la cueva de Nerja (Jordá Pardo, ed., 1986), 1998 fue el año en el que se celebró en Nerja un congreso homenaje al profesor Francisco Jordá Cerdá, cuyas contribuciones aparecieron en el correspondiente libro de actas (Sanchidrián y Simón, eds., 1998) y 2014 fue el año en el que se celebró el XVII Word UISPP Congress (Burgos), al que se presentaron 5 comunicaciones sobre Nerja (UISPP, 2014). En general, el 25,8 % de las publicaciones son de autor único (37), mientras que el resto corresponden a trabajos de autoría múltiple, con un 70,6 % de entre 2 y 10 autores (101) y un 3,5 % de 11 a 16 firmantes (5).

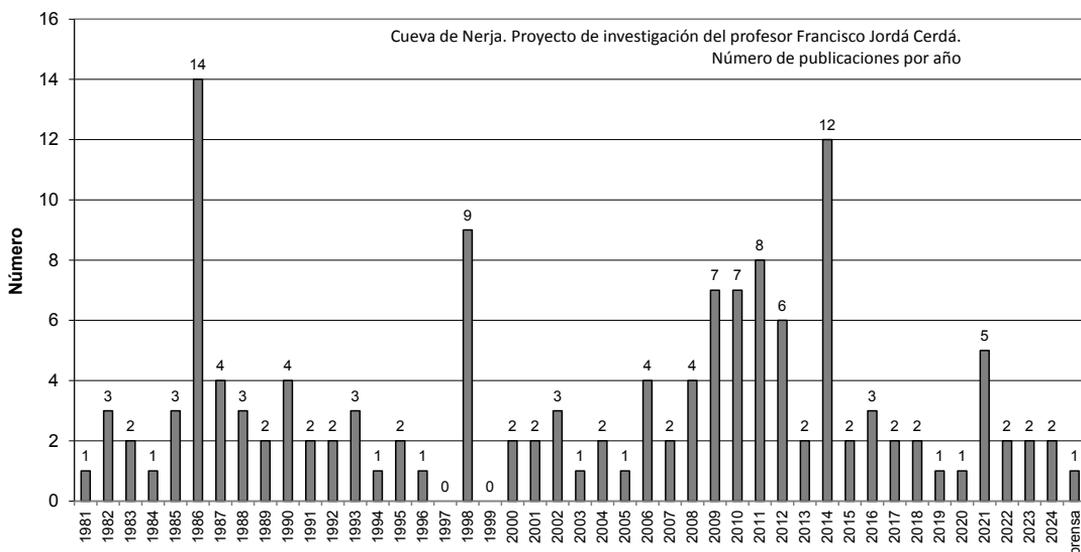


Figura 3. Número de publicaciones por año del profesor Francisco Jordá Cerdá y su equipo sobre el registro arqueológico de la cueva de Nerja

En cuanto al tipo de publicaciones (Fig. 4), la mayoría son capítulos de libros (38 %), artículos en revistas (30 %) y libros de abstracts de congresos (27 %), mientras que el resto se distribuye entre libros (4 %) e informes no publicados (1 %). Entre los capítulos de libro se encuentran contribuciones en actas de congresos (20 %), capítulos de monografías (10 %) y libros (3 %), de homenajes (2 %), de series (1 %) y de guías de excursiones (1 %), a los que hay que añadir un 1% publicado en actas de congreso-homenaje. Los artículos en revistas se distribuyen entre internacionales (9 %) y nacionales (17 %), con la salvedad de que estos últimos se incrementan (21 %) por los artículos en números de revistas que recogen contribuciones a los homenajes de diferentes investigadores (3 %) y a actas de congresos (1 %). Las revistas nacionales que recogen artículos sobre Nerja son tanto del área de Historia y Arte, con 22 trabajos publicados, como de Ciencias de la Tierra, con 8 (Fig. 4). Entre las primeras destaca Zephyrvs con 6 trabajos (13,9 % de todos los artículos), mientras que, entre las segundas, Cuaternario y Geomorfología,

BRSEHN y Geogaceta contienen 2 trabajos cada una (13,9 % las tres). Las contribuciones en revistas internacionales (Fig. 4) suponen un 48,8 % del total de artículos en revistas, con 8 trabajos publicados en Quaternary Internacional. Entre estos destaca por su número de citas el que hace referencia a la identificación indirecta de consumo de ballena en el Magdalenienese (Álvarez-Fernández et al., 2014).

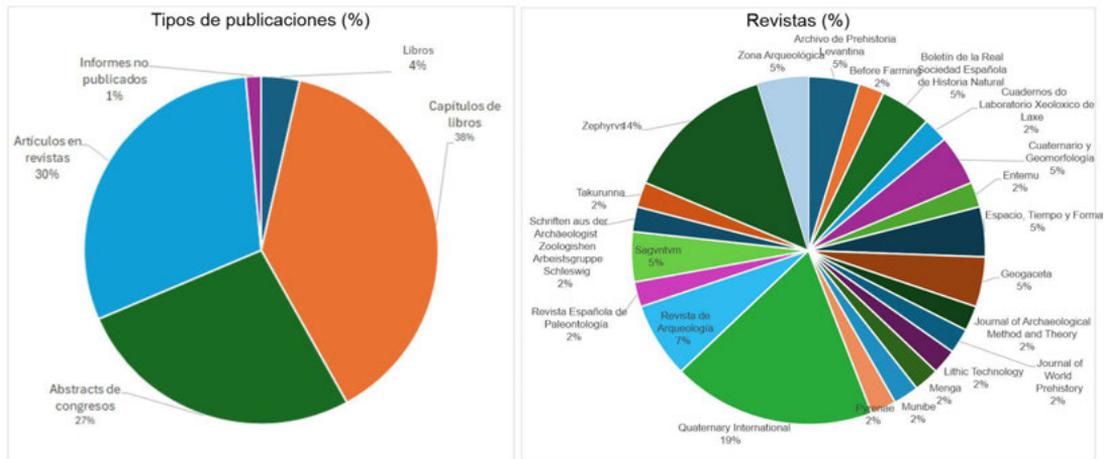


Figura 4. Publicaciones del profesor Francisco Jordá Cerdá y su equipo agrupadas por tipo de publicación (izquierda) y distribución de los artículos por revistas (derecha)

La temática y contenidos de las diferentes publicaciones son muy variados y abarcan un gran número de las disciplinas que actualmente forman parte de la investigación en Arqueología prehistórica. Así, se han publicado 5 obras de carácter general sobre la cueva de Nerja (3,5 %) mientras que el resto se distribuye entre diferentes especialidades: 31 (21,6 %) sobre su secuencia arqueológica, bien en su conjunto o bien por contextos tecnoculturales, 11 (7,7 %) sobre Geoarqueología, 60 (42 %) sobre aspectos paleobiológicos y paleoambientales, 11 (7,7 %) sobre tecnología de las industrias líticas y ósea, los adornos y la cerámica y 4 (4 %) sobre aspectos simbólicos (arte y enterramientos). Además 7 publicaciones (4,9 %) recogen aspectos metodológicos e informes de excavaciones y 13 (9,1 %) abordan el estudio de Nerja desde una perspectiva peninsular. Cabe destacar la síntesis que sobre el registro arqueológico de las salas del Vestíbulo y la Mina de la cueva de Nerja (Aura Tortosa y Jordá Pardo, 2014) se publicó en la obra recopilatoria Los cazadores recolectores del Pleistoceno y Holoceno en Iberia y el estrecho de Gibraltar (Sala Ramos, ed., 2014) editada con motivo del XVII Word UISPP Congress. Además, las producciones cerámicas del Neolítico del Vestíbulo y la Mina han sido convenientemente estudiadas y presentadas en congresos y revistas (García Borja et al., 2014).

Resultados y conclusiones

Como ya se ha puesto de manifiesto en anteriores publicaciones (Aura Tortosa et al., 2010;

Jordá Pardo y Aura Tortosa, 2010; Aura Tortosa y Jordá Pardo, 2014) la cueva de Nerja es una gran cavidad que contiene en sus salas externas (Vestíbulo, Mina y Torca) un único yacimiento arqueológico de gran extensión espacial y temporal. Además, sus paredes dan soporte a manifestaciones gráficas paleolíticas y postpaleolíticas (Sanchidrián Torti, 1994) y en ella se han documentado diversos enterramientos atribuidos a momentos solutrenses, epipaleolíticos, neolíticos y calcolíticos (Aura Tortosa et al., 1998; Simón Vallejo, 2003). Sin duda alguna, podemos afirmar que Nerja es una de las secuencias de referencia del Paleolítico superior del sur de Iberia y del Mediterráneo occidental.

Las excavaciones arqueológicas del profesor FJC en su primera época desvelaron la existencia de una importante secuencia que cubría el Holoceno y el fin del Pleistoceno. Desafortunadamente, las circunstancias a las que se vieron sometidas aquellos trabajos impidieron la continuación de las investigaciones y la publicación de sus memorias, que en este trabajo rescatamos.

Por el contrario, las excavaciones del profesor FJC en su segunda época han dado lugar a una investigación continuada en el tiempo que ha generado casi un centenar y medio de publicaciones, que han tenido gran influencia sobre la Arqueología del Paleolítico superior y Epipaleolítico de Andalucía y de la península ibérica. En nuestra anterior publicación sobre el tema (Jordá Pardo y Aura Tortosa, 2010) ofrecimos el listado de las referencias bibliográficas pertinentes y de los principales resultados obtenidos, referidos a:

1. Estratigrafía y cronología. Obtención de la primera secuencia cronoestratigráfica y arqueológica del Pleistoceno superior final y Holoceno inferior de Andalucía (30.000-3.600 cal. BP), asentada sobre bases litoestratigráficas, radiocarbónicas y tecnoculturales obtenidas en diferentes salas de la cavidad, que constituye una referencia clave para el Mediterráneo occidental. En esta secuencia se ha identificado el límite Pleistoceno-Holoceno en el techo de un conchero antrópico del Epipaleolítico.

2. Paleogeografía y paleoambiente. Reconstrucción paleogeográfica y paleoambiental del entorno de la cavidad a partir del análisis de los procesos geodinámicos y sedimentarios (cambios en la línea de costa y dinámica litoral, morfogénesis continental, análisis de facies), las evidencias paleobotánicas (antracología, carpología y palinología) y paleontológicas (macro, meso y micro-mamíferos continentales, mamíferos marinos, aves, reptiles, peces, equinodermos, moluscos y crustáceos). Obtención de un modelo evolutivo para la línea de costa. Los datos obtenidos plantean la posibilidad de que, en algunos momentos de la secuencia, las áreas continentales emergidas (procesos sedimentarios, asociaciones paleobotánicas y paleofaunísticas) y las aguas marinas (moluscos, peces y foraminíferos) registraron el deshielo finpleistoceno con ritmos diferentes.

3. Descripción de las diferentes ocupaciones humanas identificadas (Gravetiense, Solutrense, Magdalenense, Epipaleolítico, Mesolítico y Neolítico) y análisis de la tecnología, las materias primas y el uso de las industrias lítica y ósea, los adornos y la cerámica. Definición de las trayectorias culturales a partir del estudio y correlación de la tecnología de los equipos fabricados en piedra, hueso, concha y cerámica con los cambios económicos. La continuidad de las ocupaciones de la cavidad ha permitido analizar uno de los procesos de transformación tecno-económica más complejo descrito hasta ahora en el sur de Europa. En las salas externas no se han recuperado

evidencias de Paleolítico medio; las primeras ocupaciones humanas comparten en un primer momento el espacio subterráneo con hienas y corresponden al Gravetiense.

4. Análisis paleobotánico, zooarqueológico, tafonómico y estudio del uso y gestión de los recursos vegetales y animales, terrestres y marinos. La identificación del uso de los recursos vegetales durante el Paleolítico superior y Epipaleolítico convierte a Nerja en uno de los escasos ejemplos europeos. Igualmente, los signos de intensificación económica en las ocupaciones finipleistocenas, con la incorporación de recursos de pequeño tamaño y alta concentración (moluscos, peces, aves o lagomorfos), o la misma explotación de los mamíferos marinos, como el ocasional consumo de ballena en el Magdaleniense, y, muy especialmente, la foca monje y el delfín en el tránsito Pleistoceno-Holoceno, convierten a Nerja en una de las secuencias claves para analizar las trayectorias económicas de los cazadores-recolectores prehistóricos.

5. Aspectos simbólicos. Por último, cabe mencionar los resultados obtenidos sobre el uso y función de la cavidad a lo largo del segmento temporal estudiado. La presencia de santuarios de Arte paleolítico en sus salas interiores, el uso de la cavidad como espacio funerario en sucesivos momentos, o la misma intensidad de las ocupaciones, son aspectos decisivos para la comprensión de la formación del registro arqueológico conservado y para explicar, desde una perspectiva global, el yacimiento arqueológico de la cueva de Nerja en el contexto de la Prehistoria del suroeste europeo.

A la vista de lo anterior podemos concluir que el proyecto iniciado en 1979 por el profesor FJC y desarrollado por su equipo en los últimos cuarenta y cinco años ha tenido un amplio desarrollo y una sobresaliente producción, constituyendo un ejemplo de investigación interdisciplinar.

Referencias

- Aguirre Uribealago, A. 2024. *Estrategias de gestión de los recursos marinos entre 15.100 y 6.700 cal BP en la costa del Mar de Alborán, en el contexto de la Península Ibérica*. Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona, 388 pp.
- Álvarez Fernández, E., Carriol, R.P., Jordá, J.F., Aura, J.E., Avezuela, B., Badal, E., Carrión, Y., García-Guinea, J., Maestro, A., Morales, J.V., Perez, G., Perez-Ripoll, M., Rodrigo, M.J., Scarff, J.E., Villalba, M.P., Rachel Wood, R. 2014. Occurrence of whale barnacles in Nerja Cave (Málaga, southern Spain): Indirect evidence of whale consumption by humans in the Upper Palaeolithic. *Quaternary International*, 337, 163-169.
- Aura Tortosa, J.E. 1988. *La Cova del Parpalló y el Magdaleniense de facies ibérica o mediterráneo. Propuesta de sistematización de su cultura material: industria lítica y ósea*. Tesis Doctoral, Universitat de València, 706 pp.
- Aura Tortosa, J.E., González-Tablas, J. y Jiménez Brobeil, S. 1998. Los enterramientos "solutrenses" de la Sala del Vestíbulo. En: Sanchidrián Torti, J.L. y Simón Vallejo, M.D. (eds.), *Las culturas del Pleistoceno Superior en Andalucía. Homenaje al profesor Francisco Jordá Cerdá*. Patronato de la Cueva de Nerja, Málaga, 237-249.
- Aura Tortosa, J.E. y Jordá Pardo, J.F. 2014. Cueva de Nerja (Maro, Nerja, Málaga). En: Sala Ramos, R. (ed.), *Los cazadores recolectores del Pleistoceno y Holoceno en Iberia y el estrecho de Gibraltar. Estado actual del conocimiento del registro arqueológico*. Universidad de Burgos y Fundación Atapuerca, Burgos, 442-451.
- Aura Tortosa, J.E., Jordá Pardo, J.F., Pérez Ripoll, M., Badal, E., Morales, J.V., Avezuela, B., Tifagom, M. y

- Jardón, P. 2010. Treinta años de investigación sobre el Paleolítico superior de Andalucía: la Cueva de Nerja (Málaga, España). En: Mangado, X. (ed.), *El Paleolítico superior peninsular. Novedades del siglo XXI. Homenaje al Profesor Javier Fortea*. Monografíes, 8. Seminari d'Estudis i Recerques Prehistòriques, Universitat de Barcelona, Barcelona, 149-172.
- Badal, E. 1990. *Aportaciones de la antracología al estudio del paisaje vegetal y su evolución en el cuaternario reciente en la costa mediterránea del País Valenciano y Andalucía (18.000-3.000 BP)*. Tesis Doctoral, Universitat de València, 321 pp.
- García Borja, P., Aura Tortosa, J.E., Jordá Pardo, J.F. y Salazar-García, D.C. 2014. La cerámica neolítica de la Cueva de Nerja (Málaga, España): salas del Vestíbulo y la Mina. *Archivo de Prehistoria Levantina*, XXX, 81-131.
- Giménez Reyna, S. 1964. *La Cueva de Nerja*. Patronato de la Cueva de Nerja, Málaga, 120 pp.
- Jordá Pardo, J.F. (ed.) 1986. *La Prehistoria de la Cueva de Nerja (Málaga)*. Trabajos sobre la Cueva de Nerja, 1. Patronato de la Cueva de Nerja, Málaga, 456 p.
- Jordá Pardo, J.F. 1992. *Neógeno y Cuaternario del extremo oriental de la costa de Málaga*. Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca, 888 pp.
- Jordá Pardo, J.F. 2008. Yacimientos de vertebrados del Plioceno y Pleistoceno español. En: García Cortés, A., Águeda Villar, J., Palacio Suárez-Valgrande, J. y Salvador González, C. (eds.), *Contextos Geológicos Españoles. Una aproximación al patrimonio geológico español de relevancia internacional*. IGME, Madrid, 171-183.
- Jordá Pardo, J.F. y Aura Tortosa, J.E. 2010. Treinta y dos años de investigaciones prehistóricas en la Cueva de Nerja (Málaga, España): resultados de las excavaciones arqueológicas (1979-1987) del profesor Francisco Jordá Cerdá. En: Durán, J.J. y Carrasco, F. (eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*, ACTE, Madrid, 405-417.
- Morales-Pérez, J.V. 2015. *Explotació dels mamífers i economia de les darreres comunitats caçadores-recol·lectores del vessant mediterrani ibèric durant la transició Tardiglacial-Holocè*, Tesis doctoral, Universitat de València, 665 pp.
- Pellicer Catalán, M. 1962. *Estratigrafía Prehistórica de la Cueva de Nerja. Iª Campaña*. Excavaciones Arqueológicas en España, 16, Ministerio de Educación Nacional y Patronato de la Cueva de Nerja, Madrid, 84 pp.
- Pérez Ripoll, M. 1988. *Evolución de la fauna prehistórica en el Mediterráneo español: metodología, técnicas de troceado y su interpretación arqueológica*. Tesis doctoral, Universitat de València, 828 p.
- Sala Ramos, R. (ed.) 2014. *Los cazadores recolectores del Pleistoceno y Holoceno en Iberia y el estrecho de Gibraltar. Estado actual del conocimiento del registro arqueológico*. Universidad de Burgos y Fundación Atapuerca, Burgos, 766 p.
- Sanchidrián Torti, J.L. 1991. *El arte paleolítico en Andalucía: corpus y análisis topográfico, estadístico y secuencia*. Universidad de Málaga, 1571 p.
- Sanchidrián Torti, J.L. 1994. *Arte rupestre de la Cueva de Nerja*. Trabajos sobre la Cueva de Nerja, 4. Patronato de la Cueva de Nerja, Málaga, 341 p.
- Sanchidrián Torti, J.L. y Simón Vallejo, M.D. (eds.) 1998. *Las culturas del Pleistoceno Superior en Andalucía. Homenaje al profesor Francisco Jordá Cerdá*. Patronato de la Cueva de Nerja, Málaga, 205 pp.
- Simón Vallejo, M.D. 2003. Una secuencia con mucha prehistoria: la Cueva de Nerja. *Mainake*, 25, 249-274.
- UISPP. 2014. *XVII World UISPP Congress, Burgos 1-7 sept., 2014. Abstracts*. Union International de Sciences Préhistoriques et Protohistoriques, Burgos, 1049 pp.

Las cuevas turísticas en la educación superior: ejemplo de la cueva de Arrikruz y el Grado en Geología de la UPV/EHU

Arriolabengoa, M.¹, Corral, A.¹, Arriolabengoa, P.¹, Rua-Alkain, E.², Gutiérrez, C.¹, Gutiérrez, E.¹

(1) *Geología Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea, Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, Sarriena auzoa z/g, Leioa 48940, Bizkaia.*

martin.arriolabengoa@ehu.eus

(2) *Dept. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, c/Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona.*

Resumen

Las cuevas turísticas ofrecen entornos inaccesibles y únicos al alcance de cualquiera, atrayendo miles de visitas al año. Proveen un servicio ecosistémico cultural singular, que combina turismo y ocio con educación científica y ambiental. Aunque esta última se enfoca comúnmente en la educación obligatoria, no parece tener un impacto significativo en la educación superior. Desde la asignatura de Geología Ambiental y Riesgos Geológicos de 4º curso del Grado en Geología de la UPV/EHU, se llevan varios cursos realizando una salida a la cueva turística de Arrikruz (Oñati, Gipuzkoa). En ella, el alumnado realiza una cartografía de los procesos activos en la cueva de forma autónoma e individual. Identifican indicadores de distintos procesos, los cartografían y posteriormente interpretan la dinámica de la cavidad. Además, se discute en grupo el impacto humano en la cavidad y la posibilidad de restauración del medio. A través de estas tareas, los estudiantes desarrollan numerosas competencias exigidas por el grado en Geología. Entre las competencias básicas, se destaca la capacidad de aplicar conocimientos de manera autónoma, defendiendo argumentos y resolviendo problemas dentro de su área de estudio. En cuanto a las competencias generales, los estudiantes aprenden a emplear la terminología geológica y adquieren una visión espacial y temporal de los procesos geológicos. Entre las competencias específicas, los estudiantes conocen los principales procesos sedimentarios, identifican sus productos, comprenden la dinámica del relieve, integran observaciones de campo para elaborar un cuaderno de campo y evalúan los riesgos geológicos relacionados con procesos naturales y antrópicos. Finalmente, desarrollan competencias transversales como la capacidad de análisis y síntesis, la aplicación práctica de conocimientos, el aprendizaje autónomo y creativo, y la motivación por la calidad y el trabajo bien hecho. A pesar de no ser utilizadas comúnmente como tales, las cuevas turísticas son un recurso didáctico y pedagógico de primer orden en la educación superior.

Abstract

Tourist caves offer unique and inaccessible environments accessible to everyone, attracting thousands of visitors per year. They provide a unique cultural ecosystem service, combining tourism and leisure with scientific and environmental education. Although the latter is often focused on compulsory education, it does not seem to have a significant impact on higher education. From the subject of Environmental Geology and Geological Hazards in the 4th year of the Geology Degree at UPV/EHU, have been organizing field trips to the tourist cave of Arrikruz (Oñati, Gipuzkoa) for several years. In these trips, students independently and autonomously map active processes in the cave. They identify indicators of different processes, map them, and later interpret the dynamics of the cavity. Additionally, the human impact on the cavity and the possibility of environmental restoration are discussed in groups. Through these tasks, students develop numerous competencies required by the Geology degree. Among the basic competencies, the ability to apply knowledge professionally, defend arguments, and solve problems within their field of study stands out. Regarding general competencies, students learn to use geological terminology correctly and acquire a spatial and temporal vision of geological processes. In terms of specific competencies, students learn about the main sedimentary processes, identify their products, understand landform dynamics, integrate field observations and prepare a field notebook, and assess geological risks related to natural and anthropogenic processes. Finally, they develop transversal competencies such as analytical and synthesis skills, practical application of knowledge, autonomous and creative learning, and a motivation for quality and well-executed work. Despite not being commonly used as such, tourist caves are a top-tier educational and pedagogical resource in higher education.

Introducción

Las cuevas representan uno de los entornos terrestres únicos debido a su singularidad geológica, ecológica y cultural. Estas formaciones subterráneas no solo son testigos de la historia natural de la Tierra, sino que también ofrecen una variedad de servicios ecosistémicos cruciales para el ser humano. Desde la regulación del clima local y el almacenamiento de agua hasta el albergue de especies endémicas, las cuevas juegan un papel vital en la conservación de la biodiversidad (Culver y Pipan, 2019) y la estabilidad ambiental. Además, su estudio proporciona valiosa información sobre procesos geológicos y climáticos a lo largo del tiempo (Gillieson, 1996).

A pesar de su importancia, las cuevas son entornos de difícil acceso, lo que limita significativamente la cantidad de personas que pueden explorarlas y beneficiarse de los servicios que ofrecen. La naturaleza inaccesible de muchas de estas formaciones implica que su exploración y estudio estén restringidos a un reducido grupo de especialistas, entrenados en las técnicas de progresión propias de la espeleología. Esta barrera no solo afecta al disfrute y comprensión pública de las cuevas, sino que también limita la investigación científica y el aprovechamiento educativo que podrían derivarse de un acceso más amplio.

Las cuevas turísticas han desempeñado un papel crucial en la democratización del acceso a estos entornos únicos. Al acondicionar las cuevas para visitas seguras, se ha permitido que un público mucho más amplio pueda experimentar su atractivo. Esta accesibilidad ha proporcionado nuevas oportunidades para la investigación científica y la educación, al tiempo que ha fomentado el interés público en la geología y el medio ambiente. Sin embargo, es importante señalar que, aunque las cuevas turísticas se utilizan ampliamente como destinos de ocio y herramientas educativas en niveles de enseñanza obligatoria, su potencial en la educación superior sigue siendo subexplotado.

Este trabajo tiene como objetivo presentar un ejemplo concreto de cómo las cuevas turísticas pueden integrarse en la enseñanza superior, utilizando para ello la asignatura de Geología Ambiental y Riesgos Geológicos del Grado de Geología en la UPV/EHU. El estudio se centrará en la cueva turística de Arrikruz (Oñati, Gipuzkoa), destacando cómo su uso en la enseñanza superior puede enriquecer el proceso de enseñanza-aprendizaje, proporcionar experiencias prácticas enriquecedoras y fomentar una mayor comprensión de un medio geológico y el impacto humano.

Contexto

La cueva de Arrikruz:

La cueva de Arrikruz se encuentra en el municipio de Oñati, en la provincia de Gipuzkoa, País Vasco. Este sistema subterráneo forma parte del macizo de Aizkorri, conocido por su geología compuesta por rocas calcáreas del Cretácico. La cueva de Arrikruz está físicamente conectada con la cueva de Gesaltza, formando el sistema subterráneo de Gesaltza-Arrikruz, con más de 14 km de galerías topografiadas, y que hoy en día aún se sigue trabajando y explorando nuevos

conductos por el grupo Aloña Mendi Espeleología Taldea (AMET). La formación de sistema se debe en gran parte al río Arantzazu, que atraviesa el sistema de extremo a extremo, y en menor medida también a los ríos de Aldaola y Araotz.

La historia de la cueva de Arrikruz comienza con su descubrimiento en el siglo XIX. Ha sido objeto de diversas investigaciones, especialmente por el grupo de espeleología AMET de Oñati. Este grupo ha realizado estudios sobre su morfología, contribuyendo al conocimiento científico del lugar. La exploración e investigación de la cueva ha revelado datos sobre la evolución del relieve y su entorno (Ruiz de Arcaute y San Martín, 1957; Altuna, 1967; Maiztegi *et al.*, 1974; Arrizabalaga, 1992; AMET, 1994; Arrue *et al.*, 1996; Eraña *et al.*, 1999; Dorado *et al.*, 2001). Además, sus adentros guardan historias de osos, leones, descubrimientos, aventuras, y un sinfín de anécdotas (Agirre-Mauleon *et al.*, 2018).

Al margen del enorme sistema de cueva Gesaltza-Arrikruz, la parte acondicionada para la actividad turística se limita aproximadamente a unos 500 m de conducto, denominada la Galería 53 (Fig. 1). Dicha galería fue acondicionada para el turismo, después de varios informes al respecto (AMET, 1994; 1996; AMET y Aranzadi, 1997). Las obras de adaptación se realizaron para preservar las condiciones ambientales originales, incluyendo la humedad y temperatura del entorno subterráneo (Azkarate *et al.*, 2002-2003). Este acondicionamiento permitió la instalación de pasarelas y sistemas de iluminación que facilitan el acceso a los visitantes, haciendo accesibles las formaciones naturales sin comprometer su integridad.

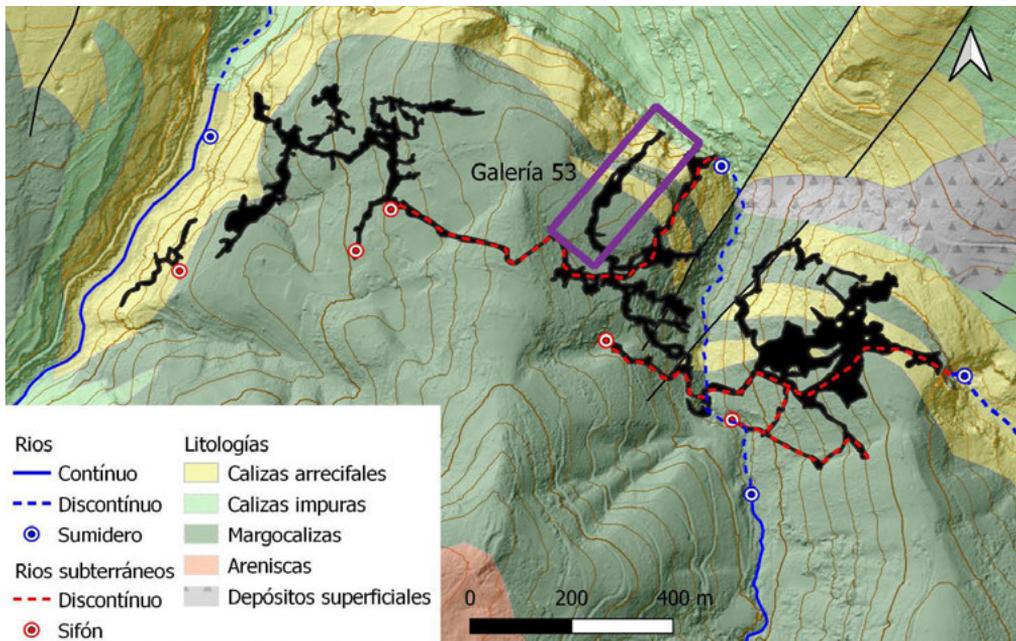


Figura 1. Localización de la Galería 53, turística, dentro del sistema de cueva Gesaltza-Arrikruz (modificado de Arriolabengoa *et al.*, 2019)

La asignatura de Geología Ambiental y Riesgos Geológicos

En el marco normativo actual de la educación superior, especialmente en el tercer ciclo, se promueven nuevas metodologías centradas en el aprendizaje activo y colaborativo. Estas metodologías buscan desarrollar competencias transversales como el pensamiento crítico, la capacidad de resolución de problemas y el trabajo en equipo, además de las competencias propias del grado. Los planes de estudio están orientados a que los estudiantes adquieran habilidades prácticas y teóricas que les permitan aplicar el conocimiento en contextos reales.

En este contexto, el Grado en Geología de la UPV/EHU, según la memoria verificada por ANECA (2013), divide sus competencias en cuatro categorías: básicas, generales, transversales y específicas. La asignatura de Geología Ambiental y Riesgos Geológicos, impartida en el segundo cuatrimestre del cuarto año, ofrece la ventaja de que muchas de estas competencias ya están bien desarrolladas.

La asignatura se estructura en cuatro ejes principales. El primero introduce la geología ambiental, enfocándose en el sistema Tierra y sus procesos, dinámicas y ciclos de distinta escala. El segundo eje se centra en la evaluación de los riesgos geológicos. El tercero se centra en la identificación y restauración de medios degradados, y el último eje se centra en el estudio de impacto ambiental. En este sentido, desde el curso 2019/2020, se realiza una visita a la cueva de Arrikruz para trabajar la teoría del primer eje de la asignatura, mediante una tarea práctica.

Tarea a realizar en la cueva de Arrikruz

Las cavidades tienen la capacidad de ofrecer una enorme variedad de procesos en un entorno muy concreto, y la Galería 53 de la cueva de Arrikruz no es exenta a esta circunstancia. A lo largo de la galería se pueden identificar un gran número de procesos tanto erosivos como sedimentarios, a partir de una gran diversidad de indicadores. En función de dichos indicadores es posible interpretar la dinámica de la cavidad y observar el impacto humano al respecto. Además, la tarea permite trabajar un caso real, llevando a la práctica la teoría del primer eje de la asignatura. Es más, debido a la acomodación de la pasarela, dicha práctica se puede realizar cómodamente y de forma accesible.

Se propone que los estudiantes realicen una cartografía individual de los procesos activos de la cueva, identificando los indicadores de cada proceso. Posteriormente, deben interpretar la evolución de la cueva y su dinámica actual, y debatir si la adaptación turística ha afectado su dinámica. Esta tarea está diseñada para enfrentar a los estudiantes a retos relacionados con las distintas competencias del grado, como identificar procesos geológicos, interpretar dinámicas del sistema y reconocer el impacto humano en ella.

Desarrollo de la tarea

Después de finalizar la teoría del primer eje de la asignatura, se ofrece a los estudiantes una

clase breve sobre indicadores sedimentológicos y geomorfológicos en cuevas, justo antes de la salida de campo, ya que el entorno kárstico suele pasar relativamente desapercibido a lo largo del grado. Una vez en el terreno, se les proporciona en formato papel una topografía en blanco y negro de la cavidad para que trabajen sobre ella.

Al comienzo de la práctica, el alumnado accede en grupo a la galería turística. La primera parte de la entrada es antrópica y ningún estudiante suele realizar ninguna anotación. Sin embargo, se están produciendo algunas filtraciones de agua a favor de las fracturas de la roca que se observan en forma de goteo formando las espeleotemas de tipo macarrón, y en forma de lámina de agua formando espeleotemas de tipo colada. Se les indica el despiste para que rectifiquen y vayan tomando contacto con la tarea. Una vez se atraviesa el pasillo antrópico y se llega al inicio de la galería natural de la cavidad, se les da un tiempo para que observen y discutan, hagan preguntas, y una vez más, se hace una observación conjunta de los indicadores y sus procesos en el sitio, donde se encuentran formaciones de estalactitas micritizadas, formaciones de coladas antiguas, formas de erosión freática, etc.

A partir de este punto, los estudiantes tienen más clara la tarea a realizar, y empiezan a trabajar de forma autónoma y en grupos pequeños a lo largo de la cueva (Fig. 2), siempre dentro de la pasarela preparada para ello. Esta tarea tiene una duración de 2-3 horas, de forma que cada uno gestiona su tiempo en cada punto del trayecto, enfocándose en la identificación y descripción de los indicadores en el mapa. A la hora fijada, el grupo se vuelve a juntar al final de la pasarela para contrastar los indicadores observados y discutir la dinámica de la cueva y el impacto humano. Una vez terminada la práctica, los estudiantes deben pasar a limpio y formato digital su cartografía y redactar un informe con los resultados.



Figura 2. A la izquierda el inicio de la cavidad natural, donde se trabaja principalmente en grupo. A la derecha, ya dentro en la cavidad, en la que se trabaja principalmente de forma autónoma

Se trata de la primera vez que el alumnado se enfrenta a una tarea de este tipo en el grado, y su experiencia previa en el trabajo de campo les ayuda a identificar unidades geológicas, describir, dibujar y cartografiar. Es interesante observar cómo, de manera autónoma o en pequeños grupos, discuten y resuelven cómo realizar el trabajo. Los resultados suelen ser consistentes entre los distintos estudiantes, aunque es interesante observar cómo varía la exposición visual de los datos en el mapa, tanto en la adquisición de los datos (Fig. 3A) como en su representación

final (Fig. 3B, C y D), evidenciando la capacidad autónoma de cada estudiante para desarrollar una tarea compleja con autonomía utilizando técnicas de autogestión y autorregulación.

Tanto los resultados de los mapas e informes como los comentarios de los estudiantes a lo largo de la práctica, reflejan un alto grado de satisfacción con esta actividad, probablemente debido al atractivo de la cavidad, la diversidad de procesos en un espacio reducido y el contacto con la práctica profesional de un geólogo. Esto se evidencia en la posterior realización de Trabajos Fin de Grado en la cueva de Arrikruz (Gutiérrez, 2021; Gutiérrez, 2022), y en que una parte de los estudiantes optan por trabajar como guías en esta cueva una vez finalizado el grado (5 estudiantes desde el curso de 2019/2020).

Adquisición de competencias

La realización de esta práctica en un entorno geológicamente tan diverso ofrece a los estudiantes del grado en Geología de la UPV/EHU la oportunidad de desarrollar numerosas competencias.

El hecho de tener que resolver el problema de cuál es la dinámica de la cueva, hace que desarrollen la competencia básica relacionada con la aplicación de sus conocimientos de forma práctica, demostrando habilidades en la elaboración y defensa de argumentos, así como en la resolución de problemas dentro de su campo de estudio.

En todo momento, deben utilizar una correcta terminología, nomenclatura y unidades, ser conscientes de la visión espacial y temporal de los procesos geológicos de la cueva, vinculados a varias competencias generales.

La cavidad es un entorno geomorfológico y sedimentario, y los estudiantes deben identificar en el campo sus procesos y productos, para establecer el contexto dinámico y evolutivo del sistema, y llevarlo todo al cuaderno de campo. Todo ello junto con tener que evaluar la implicación de los procesos antrópicos, hace que entrenen dichas competencias específicas. Por último, el hecho de que tengan que diagnosticar el estado actual de la dinámica de la cueva y los posibles cambios inducidos en su dinámica debido a la antropización, a partir de identificar indicadores y caracterizar los procesos, hace que profundicen en el desarrollo de diversas competencias transversales como, la capacidad de análisis y síntesis, la aplicación práctica de los conocimientos, la motivación por la calidad y el trabajo bien hecho, así como el aprendizaje y trabajo autónomo y creativo.

Conclusiones

El estudio y la integración de cuevas turísticas en la enseñanza superior, ejemplificado por la cueva de Arrikruz en el Grado de Geología de la UPV/EHU, demuestran un enfoque innovador para el aprendizaje activo y práctico en el campo de la geología. Las cuevas, con su singularidad geológica, ofrecen una rica fuente de información sobre los procesos naturales de un sistema, su dinámica a lo largo del tiempo, y los efectos que puede producir la acción humana en ella.

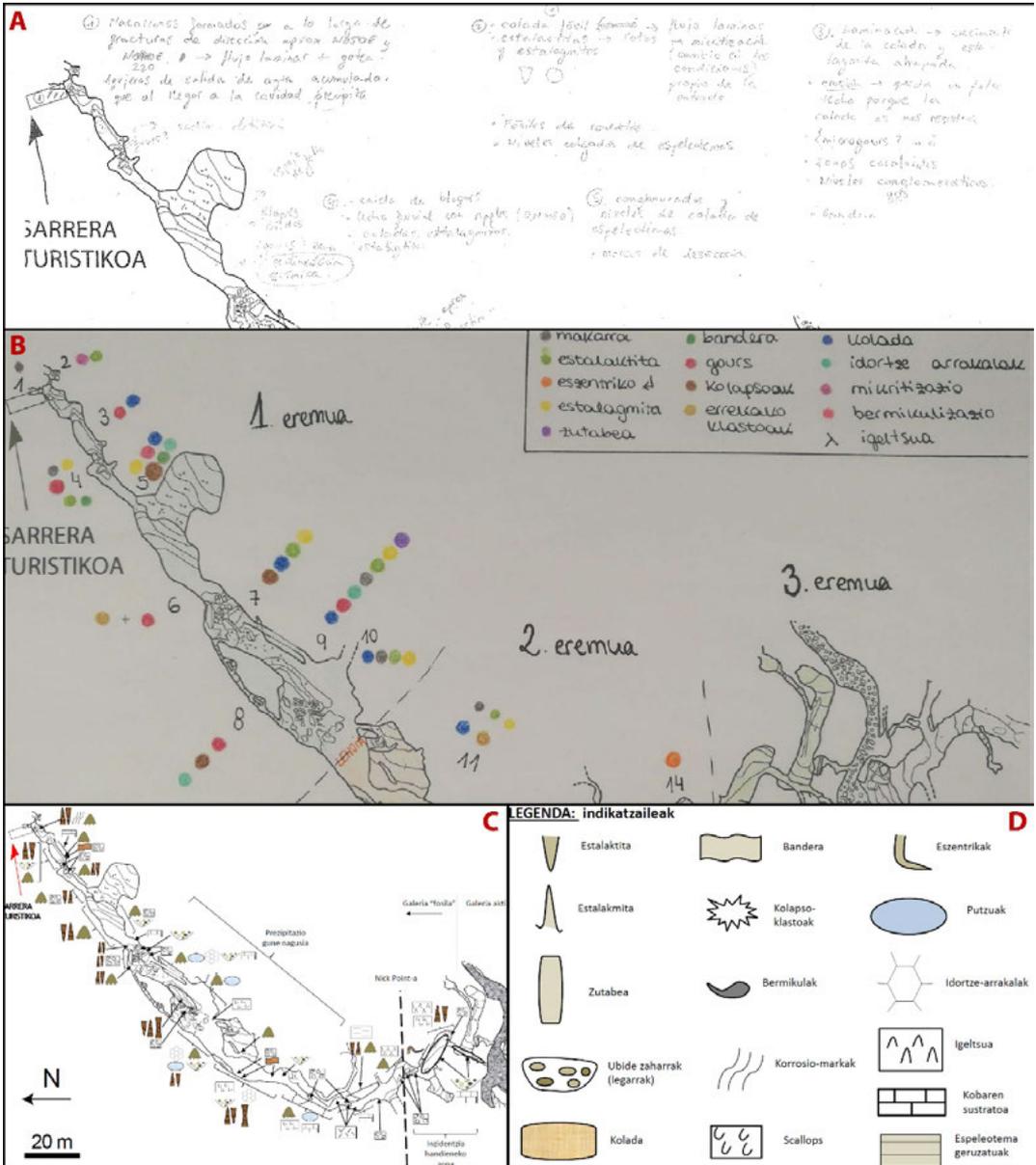


Figura 3. A) Ejemplo toma de datos sobre el mapa; B, C y D) distintos ejemplos de representación de los resultados

En este sentido, la visita a la cueva de Arrikruz permite a los estudiantes aplicar conceptos teóricos en un entorno real, desarrollando competencias esenciales como la identificación de procesos geológicos, la cartografía y la evaluación del impacto humano. Este enfoque práctico no solo enriquece el proceso de enseñanza-aprendizaje, sino que también fomenta una mayor apreciación y comprensión de un entorno geológico. Por todo ello, se sugiere promover el uso

de cuevas turísticas como recurso educativo en la enseñanza superior, particularmente en disciplinas vinculadas a las Ciencias de la Tierra.

Agradecimientos

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento a los dedicados trabajadores de Oñati Turismo, gestores de la Cueva de Arrikruz. Su inestimable colaboración es fundamental para que podamos realizar este enriquecedor proceso de enseñanza-aprendizaje. Su apoyo y compromiso son esenciales para nuestro éxito.

Referencias

- Agirre-Mauleon, J., Conde, E., Aranburu, A., Arsuaga, J.L., Arriolabengoa, M., Altube, I., Bodego, A., Gómez, A., Intxausti, J., Zubeldia, I., Aloña Mendi Espeleología Taldea, 2018. Arrikruz, Arikruzeko lehoia. Aranzadi Bilduma 3, 171 p.
- Altuna, J. 1967. Hallazgo de un esqueleto de león de las cavernas en la cueva de Arrikruz (Oñate, Guipúzcoa). *Munibe* 19, 331-332.
- AMET, 1994. Gesarribe multzo karstikoa. Oñatiko Udala, Informe sin publicar, 51 pp.
- AMET. 1996. Estudio de las cavidades de la zona de Gesaltza – Arrikruz – Jaturabe. Analisis de su aprovechamiento turístico y pedagógico. Informe sin publicar, Oñatiko Udala.
- AMET y Aranzadi, 1997. Anteproyecto para visita turística. Galería 53, Arrikruz, Oñati. Informe sin publicar, Oñatiko Udala.
- ANECA, 2013. Memoria Verificada del Grado de Geología en la UPV/EHU. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 75 p.
- Arriolabengoa, M., Dorado, J., Eraña, C., Abarrategi, B., Ugarte, S., Azkoaga, X., Olalde, A., Pereda, L., Richard, L., Expósito, J.M., 2019. Arantzazu bailarako sare hidrogeologiko-endokarstikoa. *Karaitza* 27, 58-69.
- Arrizabalaga, I. 1992. Introducción al estudio de los depósitos cuaternarios en el complejo kárstico de Arrikruz. *Eusko Ikaskuntza, Cuadernos de Sección* 20.
- Arrue, K., Azkoaga, X., Eraña, C., Eraña, R., Olalde, A., Ugarte, S., Ugarte, J. 1996. Gesaltza – Arrikruz multzo karstikoa. *Karaitza* 5, 19-33.
- Azkarate, X., Eraña, C., Olalde, A., Ugarte, S. 2002-2003. Estudio climático de la Galería 53 de la cueva de Arrikruz. Sistema Gesaltza – Arrikruz – Jaturabe. *Karaitza* 11, 4-15.
- Culver, D.C. y Pipan, T., 2019. *The Biology of caves and other subterranean habitats*. Oxford Academic.
- Dorado, J., Arrue, K., Azkarate, X., Azkoaga, X., Eraña, R., Eraña, C., Ezkibel, I., Galdos, A., Lakontxa, J., Olalde, A., Ugarte, J., Ugarte, S. 2001. El karst de Arantzazu (Gipuzkoa). *Karaitza* 10, 14-27.
- Eraña, C., Arrizabalaga, I., Arrue, K., Azkarate, X., Azkoaga, X., Dorado, J., Dulanto, D., Eraña, R., Ezkibel, I., Galdos, A., Lakontxa, J., Olalde, A., Ugarte, J., Ugarte, S. 1999. El karst de Aloña-Aizkorri-Aratz. *Karaitza* 8, 16-31.
- Gillieson, D., 1996. *Caves: Processes, Development and Management*. 2nd edition Wiley-Blackwell, 528 p.
- Gutiérrez, C., 2021. Dinámica actual de la cueva de Arrikruz (Oñati) y su estudio paleoclimático. Trabajo Fin de Grado, Grado de Geología, UPV/EHU.
- Gutiérrez, E., 2022. Arrikruz kobako (Oñati, Gipuzkoa) estalagmiten ikerketa paleoklimatikoa. Trabajo Fin de Grado, Grado de Geología, UPV/EHU.
- Maiztegi, G., Rigault, P., Ugarte, L. F., Ugarte, F. M. 1974. Trabajos sobre el karst del SW de Guipúzcoa, Ed. Biblioteca Municipal, Oñati, 101 pp.
- Ruiz de Arcaute, F., San Martín, J. 1957. Conjunto de los fenómenos espeleológicos de Gesaltza, Arrikruz, Jaturabe y Cueva de los Osos. *Munibe* IX.

Resultados preliminares de la exploración y topografía de las nuevas galerías descubiertas en el Petit Riu y de la aportación de agua subterránea mediante el estudio de la variación epifreática (Cueva de los Chorros del Río Mundo, Albacete, SE de España)

González-Ramón, A.¹, Córcoles Ballesteros, A.², Galindo Rubio, C.V.³, Calaforra Chordi, J.M.⁴, Luque Mérida, S.³, Sólvez Beneyto, J.P.³, Ronda García, J.L.³, Rodríguez Estrella, T.⁵ y Melero López, J.³

¹ IGME-CSIC. Urb. Alcázar del Genil, 4. Edf. Zulema bajo Granada.
antonio.gonzalez@igme.es

² Sierras del Mundo, Calle Olmo N°1, 02450 Riópar, Albacete, España.
zorfo156@gmail.com

³ Grupo Espeleológico Extopocien,
carlosvicentegalindorubio@gmail.com, juanleronda@gmail.com, quibass@gmail.com,
⁴ Recursos Hídricos y Geología Ambiental, Universidad de Almería, 04120, Almería, España,
jmcalforra@ual.es

⁵ Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica. Universidad Politécnica de Cartagena (España),
tomasrestrella@hotmail.com

Resumen

La Cueva de los Chorros se localiza en el Parque Natural de los Calares del Mundo y de la Sima; con sus casi 40 km explorados es una de las principales cavidades de la Península Ibérica. Da origen al Río Mundo, una surgencia kárstica que se caracteriza porque se despeña por una cascada de 80 m y por sus grandes crecidas de corta duración (reventones), con puntas de caudales capaces de superar 70 m³/s. En 2020, tras una serie de desobstrucciones en un afluente secundario al río principal, el Petit Riu, Mavil Marín Palop localizó un conjunto de nuevas galerías (Galerías Mavil). Su exploración y la nueva topografía realizada han aumentado en unos 3 km la red conocida, con 9 sifones y el descubrimiento de un nuevo aporte lateral. El acceso al Petit Riu se localiza a escasos metros de la entrada a la Cueva de los Chorros. Las galerías principales son aproximadamente rectilíneas, no muy anchas, pero si muy altas, terminando en el "sifón Mavil". Las zonas más alejadas exploradas, tras el paso del "Chocolate con Churros", se caracterizan por la presencia de grandes pozos ascendentes. La descarga del Petit Riu al río principal del sistema está controlada desde 2018. El control de la variación del nivel epifreático y la nueva topografía han permitido delimitar la cuenca vertiente a este río secundario, validada mediante un modelo de transferencia; este sencillo modelo tipo "caja negra" permite un buen ajuste de los picos de crecida y del caudal base, con una conductividad hidráulica en la zona no saturada muy elevada y un volumen de infiltración anual medio del orden del 60% de la precipitación. Los resultados sugieren que durante las crecidas la cuenca vertiente es mayor y que existe un notable volumen de agua almacenada aguas arriba del punto monitorizado.

Palabras clave: campos de dolinas, evolución epifreática, infiltración, modelo de transferencia, plataforma kárstica.

Abstract

The Cueva de los Chorros is located in the Parque Natural de los Calares del Mundo y de la Sima; with its almost 40 km explored, it is one of the main caves of the Iberian Peninsula. It gives rise to the Mundo River, a karstic upwelling that is characterized by an 80 m waterfall and by its large short-term floods (reventones), with peak flows capable of exceeding 70 m³/s. In 2020, after a series of unblockings in a secondary tributary to the main river, the Petit Riu, Mavil Marín Palop located a set of new galleries (Mavil Galleries). His exploration and the new topography carried out have increased the known network by about 3 km, with 8 siphons and the discovery of a new lateral contribution. The access to the Petit Riu

is located a few meters from the entrance to the Cueva de los Chorros. The main galleries are approximately rectilinear, not very wide, but very high, ending in the "Mavil siphon". The most distant areas explored, after the "Chocolate con Churros" passage, are characterized by large ascending shafts. The discharge of the Petit Riu to the main river of the system has been controlled since 2018. The control of the variation of the epiphreatic level and the new topography has made it possible to delimit the watershed downstream of this secondary river, which has been validated using a transfer model; this simple "black box" type model allows a good adjustment of the flood peaks and base flow rates, with a very high hydraulic conductivity in the unsaturated zone and an average annual infiltration volume of about 60% of the precipitation. The results suggest that during floods the watershed is larger and that there is a significant volume of groundwater stored upstream of the monitored point.

Key words: *doline fields, epiphreatic evolution, infiltration, transfer model, karstic platform.*

Introducción

La Cueva de los Chorros es actualmente una de las mayores cavidades de la Península Ibérica solo superada por las grandes cavidades de las cordilleras septentrionales. Su exploración e investigación hidrogeológica comenzó en la década de los años sesenta del pasado siglo (Pla Salvador, 1966; Cuenca Payá, 1976; Melero López y Martínez Cutillas, 2019; González-Ramón *et al.*, 2023). La entrada a la cavidad se produce en mitad de una pared de 300 m de altura desde donde se despeña el caudal que surge por su boca. La cueva es conocida por sus extraordinarias crecidas (reventones), ya que el caudal que surge puede pasar, en pocas horas, de unas decenas de l/s hasta puntas de más de 70 m³/s. Su exploración ha continuado ininterrumpida desde mediados del siglo XX por varias generaciones de espeleólogos que van sumando nuevos descubrimientos casi año a año hasta alcanzar, actualmente unos 40 km de galerías exploradas con grandes expectativas de continuación por los recientes descubrimientos realizados mediante técnicas de espeleobuceo.

El sector del Petit Riu es conocido desde los inicios de la exploración de la cavidad, debido a su cercanía a la boca de entrada principal. En 1964 ya casi todo el tramo accesible de este sector se había topografiado, con unos 750 m de desarrollo total. En 2019, Mavil Martín Palop, tras un laborioso trabajo de desobstrucción individual que duró varios meses, descubrió un conjunto de nuevas galerías que son descritas en este trabajo por primera vez. Los trabajos de exploración y topografía realizados hasta ahora suman unos 3 km, en los que se incluyen los 750 m ya conocidos. En esta comunicación se presenta un nuevo mapa topográfico, realizado con técnicas más precisas, si bien aún quedan nuevas zonas recientemente exploradas sin topografiar y varias incógnitas con buenas perspectivas.

Por otra parte, en 2018 se instalaron una serie de sensores en el interior de la cavidad y una estación meteorológica en la Cañada de los Mojones, un polje por cuya ladera suroriental se desarrolla la cavidad. Uno de estos sensores, que miden la evolución del nivel epifreático dentro de la cavidad, fue instalado a la salida del sector del Petit Riu, también llamado "Galerías Mavil", en honor al descubridor de los nuevos tramos aquí descritos, trágicamente fallecido en la propia cueva poco después de este descubrimiento.

Los objetivos de este trabajo son la descripción y caracterización morfológica de estas nuevas galerías, el estudio del régimen de descargas y aportes a la red principal y la definición de la posible cuenca vertiente asociada a este río secundario.

Contexto geológico e hidrogeológico

La cueva de los Chorros se localiza en el Calar del Mundo, que constituye uno de los calares asociados a una gran altiplanicie kárstica que se extiende desde la Sierra del Segura, en la provincia de Jaén, en los extensos campos de Hernán Pelea (Moral, 2008; 2019) hasta la provincia de Albacete. Esta gran superficie de abrasión kárstica está labrada sobre calizas y dolomías del Cretácico superior ligeramente plegadas en una sucesión de sinclinales y anticlinales. El Calar del Mundo aflora ampliamente desde el SO, en el límite entre las provincias de Jaén y Granada, hasta el NE en la provincia de Albacete (Fig. 1a). En esta dirección la superficie ha sido erosionada dejando un reguero de superficies aisladas (calares) que se caracterizan por presentar un relieve invertido, ya que la erosión ha actuado preferentemente en los núcleos anticlinales (Moral, 2005). La superficie está ligeramente basculada de tal forma que en su zona suroriental presenta cotas en torno a 1700-1800 que pasa a 1500-1600 hacia la zona noroccidental, en el Calar del Mundo.

El Calar del Mundo es el de mayor extensión de este conjunto de calares, con sus 85 km² de afloramientos. Se extiende entre Siles (provincia de Jaén) y Riópar (provincia de Albacete) y está estructurado, en la zona donde se localiza la cavidad, en un pliegue sinclinal afectado por fallas laterales normales y un pliegue anticlinal cuyo núcleo y flancos están extraordinariamente karstificados. La zona deprimida que marca el sinclinal está ocupada por el Polje de la Cañada de los Mojones (Fig. 1b). El conjunto de las formaciones permeables que constituyen el calar tiene un espesor de unos 440 m (Rodríguez-Estrella, 1979) constituido por dolomías y calizas del Turoniense-Senoniense (Cretácico superior) con el impermeable de base principal formado por arenas y arcillas de la formación "Utrillas" del Cretácico inferior. El tramo más karstificado tiene unos 200 m de espesor, es en el que se desarrolla la cueva y presenta en su base una ruptura de permeabilidad formada por dolomías turonienses con niveles dolomítico-arcillosos que provocan la existencia de una zona saturada semicolgada que ocupa el núcleo del sinclinal de la Cañada de los Mojones y otros poljes menores (Fuente del Espino, Media Fanega y la Celadilla) (González-Ramón *et al.*; 2023). Su superficie presenta un exokarst muy desarrollado, con abundantes campos de dolinas, uvalas, lapiares y pequeños.

Metodología

Los trabajos de topografía se han realizado con un medidor Leica Disto X310 modificado, que permite medir en un solo disparo distancia, dirección e inclinación. Los datos son enviados a un teléfono móvil rugorizado mediante Bluetooth y procesados con Topodroid (Corvi, 2020) en la misma cavidad. Estos datos son posteriormente tratados en gabinete.

El modelo *datalogger* empleado ha sido el Hobo onset® que permite medir el nivel del agua en un rango entre 0 y 30,6 m. Fue programado para medidas con periodicidad quinceminutal, si bien en este trabajo solo se han utilizado los datos de nivel transformados a diarios, pues el tratamiento de los mismos se ha realizado con el software TRASERO (Padilla y Delgado, 2013) que utiliza datos diarios. Las series analizadas abarcan desde octubre de 2018 hasta diciembre de 2023.

Este software incorpora la posibilidad de trabajar con un Modelo de Transferencia. Se trata

de un sencillo modelo de lluvia-caudal-piezometría compuesto por dos reservorios, cada uno definido por una función de transferencia. El primer reservorio representa la zona no saturada y genera un efecto de retardo en una variable de entrada (por ejemplo, precipitación). El segundo reservorio representa la zona saturada, y su función de salida caracteriza la curva de recesión del hidrograma de un manantial (Padilla y Delgado, 2013).

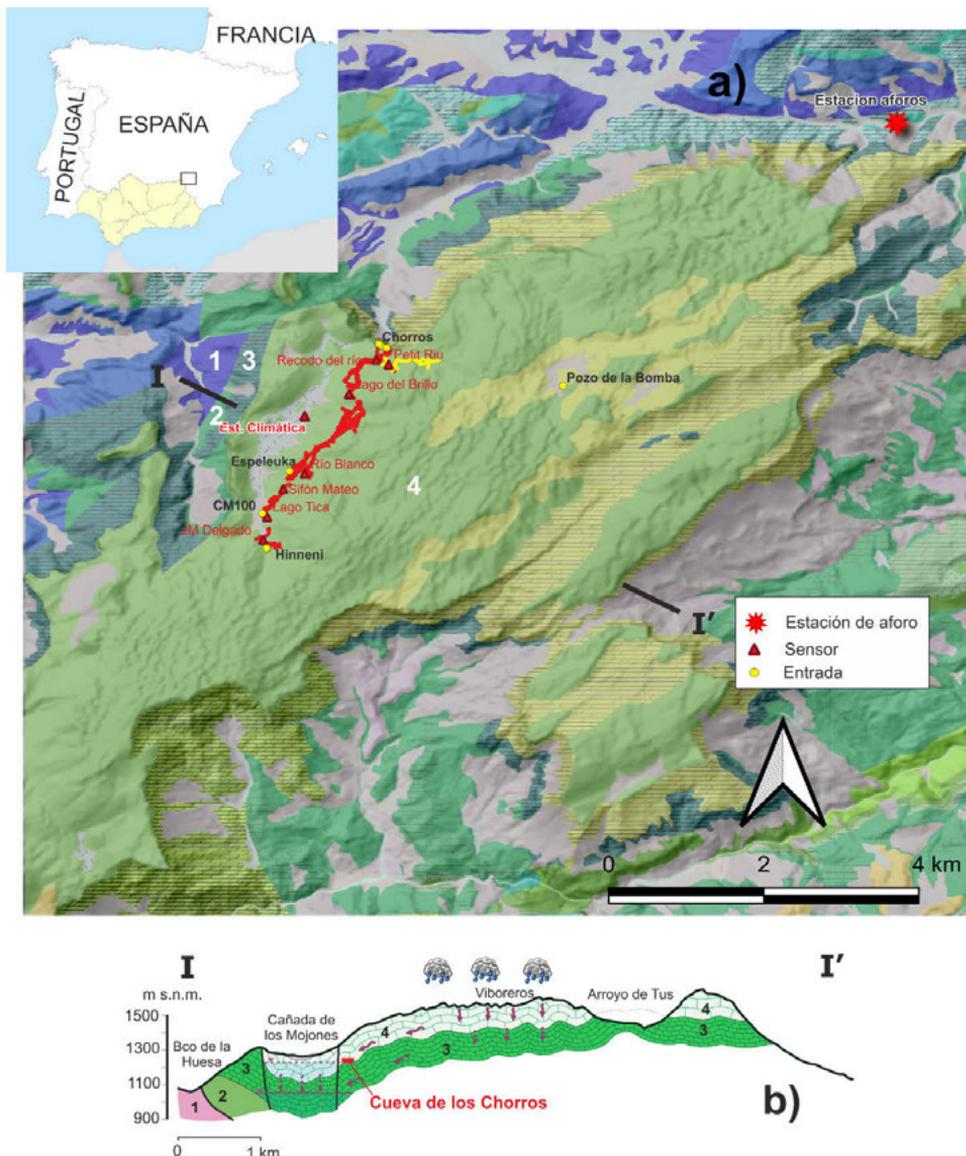


Figura 1. a) Mapa geológico del Calar del Río Mundo (www.igme.es). Se incluye la traza de las galerías de la Cueva de los Chorros (en rojo) y en amarillo la del Sector de Petit Riu. b) corte hidrogeológico. 1 arcillas, limos y areniscas. Triásico. 2 Arenas y arcillas (facies Utrillas). Cretácico inferior. 3 Dolomías microcristalinas y dolomías arcillosas. Cenomaniense (tramos 1 y 2). 4 Dolomías y calizas. Turoniense-Senonense (tramos 3, 4 y 5)

Para la modelización de la evolución del nivel, previamente ha sido necesario el cálculo de la lluvia útil mediante la utilización del citado software. Los datos utilizados proceden de la estación meteorológica situada en la Cañada de los Mojones. El cálculo de la ETP se ha realizado mediante el método de Hargreaves y Samani (1985) que utiliza valores diarios de temperaturas máximas y mínimas y datos de precipitación diaria. A partir de estos datos se ha obtenido la ETR y la Lluvia Útil (LLU) mediante el método de Thornthwaite clásico (1948) con la utilización de diferentes valores de Reserva Útil (RU) (25, 30 y 35 mm). Se ha considerado que no existe escorrentía, ya que se sabe que en la superficie del Calar del Mundo cualquier escorrentía que se produzca acaba finalmente alimentando a alguno de los múltiples sumideros existentes. Se considera, por tanto, que el 100% de LLU es infiltración.

Resultados

Descripción del Sector de Petit Riu

El conjunto de galerías que conforman este sector se inicia en una zona cercana a la boca principal de la Cueva y pertenece a una pequeña subcuenca subterránea que desemboca en el río principal cerca de su salida (Fig. 1 y 6). Las galerías discurren en dirección O-E cercanas al escarpe donde se despeña el río subterráneo. El sensor se ubica en una pequeña playa donde finaliza una galería rectilínea inundada asociada a una diaclasa vertical de unos 200 m de longitud (Galería Sense Pa, Fig. 2a) de dirección NO-SE. En esta primera parte las galerías se adaptan a un trazado reticular asociado a fracturas, en su mayoría fósiles, si bien se alcanzan sifones en distintas zonas, con el nivel del agua a cotas similares (un total de 6 sifones entre 1208 y 1210 m s.n.m.) que ponen de manifiesto la existencia de una red inundada que discurre bajo las galerías semi-fósiles por las que se accede. Tras varios giros de 90°, NO-SE, E-O, N-S y tras atravesar el "Paso del Misionero" y alcanzar la "Galería Asunción", la cavidad ya discurre decididamente en dirección E-O por un conjunto de galerías fósiles hasta alcanzar, tras un pasamanos, el "Meandro Jero", por donde discurre el río subterráneo, generalmente con escaso caudal y con una galería fósil suprayacente a unos 8-10 m.

Al final de la galería activa de forma repentina la cavidad gana en dimensiones por la presencia de grandes chimeneas. La continuación se hace subiendo un resalte de unos 10 m, que sigue la cota de las galerías fósiles anteriores, pero aquí aún activas, donde aparece el "sifón Fito", de régimen temporal que obstaculiza la exploración en épocas más húmedas. Este sifón fue puenteado mediante una escalada en una de estas grandes chimeneas, lo que ha permitido continuar la exploración fuera de los periodos de mayor estiaje. La presencia de estas grandes chimeneas, por donde hay caída de agua, el escalón en la galería principal y las mayores dimensiones de la cueva, se asocian a la existencia de una zona fallada que escalona el talud suroriental del polje de la Cañada de los Mojones. Los planos de falla, de dirección longitudinal al borde del polje, son perfectamente visibles en el interior de la cavidad.

Una vez rebasado el sifón Fito, aparece un extraño cono de grava tras el que aparece un nuevo sifón (Fig. 2) que solo ha podido ser superado en una ocasión, en noviembre de 2022 después de más de seis meses sin llover. Tras este sifón se descubrió una gran galería de 250 m de longitud también en dirección E-O y con zonas colapsadas rellenas de bloques. La galería finaliza

en un nuevo sifón denominado “Sifón Mavil” donde se observa otro de estos conos de grava de menor tamaño que el anterior.

De la zona del primer cono de grava parte otra galería en dirección N de menores dimensiones, que posteriormente gira hacia el E con el suelo relleno de gran cantidad de barro que fue denominada galería del Chocolate con Churros. La galería posteriormente gira de nuevo hacia el S. En esta zona aparecen una serie de nuevas chimeneas, de las que ocho han sido escaladas. El desnivel total topografiado desde la cota más elevada es de 123 m; si bien con las nuevas galerías escaladas supera los 140 m.

Las exploraciones siguen su curso, hay zonas pendientes de topografiar y otras sin explorar que seguirán dando resultados. Las zonas pendientes de topografía más relevantes estimadas en más de un kilómetro son el final de la Galería Bañá, el Sifón PT8, galerías fósiles por encima del Meandro Jero, un pozo cerca del primer Cono de Grava, dos largas galerías tras el Chocolate con Churros y las últimas escaladas de la zona a 1327m (mayor altitud del Petit Riu).

Control hidrológico y estimación de la infiltración

La salida del río subterráneo, asociada al sector del Petit Riu, fue monitorizada en 2018 por lo que se dispone actualmente de una secuencia de datos entre el 1 de octubre de 2018 hasta el 17 de abril de 2023 que ha sido utilizado para la simulación mediante un modelo de transferencia (TRASERO v2.5.0; Padilla y Delgado, 2013). El nivel medido muestra la variación del nivel epifreático en este sector de la cavidad.

Las series de valores de LLU obtenidas (Tabla 1) se han correlacionado con la serie de variación epifreática, ya que esta serie es dependiente de las anteriores. La mejor correlación ha sido para la serie calculada con una RU de 35 mm, que mejora ligeramente la de 30 mm (R^2 de 0,242 para 25 mm, de 0,248 para 30 mm y de 0,253 para 35 mm). La serie de LLU obtenida con esta RU es la única que reproduce todos los picos de elevación del nivel y no genera ningún otro pico no registrado por el sensor.

	ETP (mm)	ETR (mm)	LLU (mm)
	1101,9		
RU 25 mm		375,17	622,98
RU 30 mm		392,18	605,02
RU 35 mm		405,96	590,29

Tabla 1. Valores de LLU obtenidos

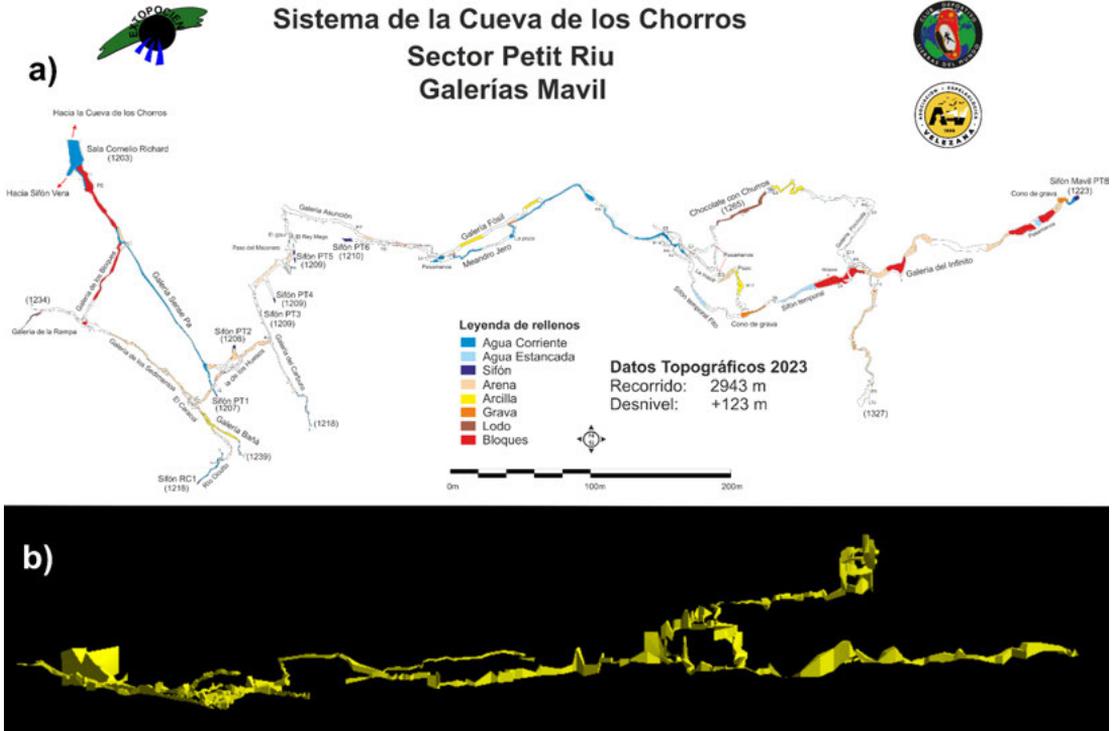


Figura 2. a) Nuevo mapa topográfico del Sector de Petit Riu. b) Modelo 3-D de la zona topografiada realizado con Visual Topo V5.18

El valor medio anual para la infiltración considerado de esta forma es de 590 mm de media anual, que responde al 59 % de la precipitación caída en el año medio (999 mm).

Resultados del modelo de transferencia

El resultado del ajuste del modelo a partir de las series de infiltración (serie independiente) y de la piezometría, en este caso de la variación epifreática (serie dependiente), permite simular el hidrograma de la surgencia por la salida de la galería donde se ubica el sensor, el volumen de agua infiltrada al acuífero profundo, tantear la bondad de la superficie de cuenca considerada y estimar el coeficiente de almacenamiento. Para ello hay que introducir el valor de la cota de descarga, para el que se ha utilizado un valor ligeramente inferior al del nivel mínimo registrado. Cuando se realiza el ajuste para los niveles base del caudal se obtiene un Error Cuadrático Medio (ECM) aceptable, de 0,46 (Tabla 2). El problema es que es necesario utilizar un coeficiente de almacenamiento (S) de 0,98 excesivamente elevado, que implicaría agua almacenada en lagos o galerías. Además, no es posible simular en absoluto los picos (Fig. 3). El ajuste de los picos se consigue también con un ECM aceptable, de 0,36 (Tabla 3), pero en este caso utilizado un valor de S es demasiado bajo, de $3,5 \times 10^{-3}$ más propio de un acuífero semiconfinado que de un acuífero

libre, como es el Calar del Mundo. En este caso solo los picos aparecen con buenos ajustes, y los caudales base se anulan (Fig. 4). La extensión de la cuenca vertiente a la cueva en el ajuste de los caudales base es de 1,2 km² que se triplica cuando se simulan los picos con 3,5 km². Por otro lado, en ambos casos es necesario introducir valores de conductancia muy elevados, como corresponde a acuíferos muy karstificados, de 1100 m²/día en el primer caso y de 10000 m²/día en el segundo.

Error de estimación (ECM) = 0,4605367

Parámetros

Coefficiente de almacenamiento = 0,98

Conductancia= 1100 m²/día

Superficie = 1,2 (km²)

Fracción de recarga = 100 (%)

Infiltración media = 0,7083 (hm³/año)

Tabla 2. Resultados del modelo de transferencia para el ajuste con caudales base

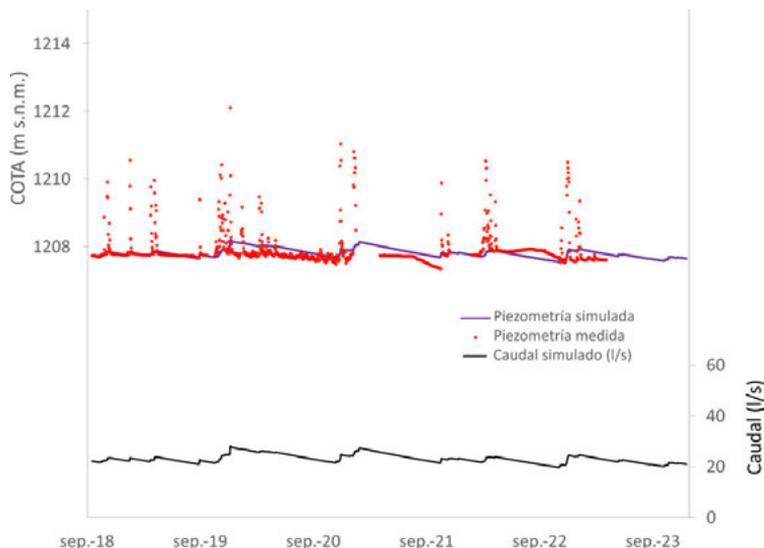


Figura 3. Curva de simulación de la variación epifreática y variación del nivel medido para el ajuste con caudales base. Se incluye también la curva simulada del caudal drenado por la galería en el periodo considerado en litros por segundo

Error de estimación (ECM) = 0,3557805

Coeficiente de almacenamiento = 0,0035

Conductancia = 10000 m²/día

Superficie = 3,5 (km²)

Fracción de recarga = 100 (%)

Infiltración media = 2,0660 (hm³/año)

Tabla 3. Resultados del modelo de transferencia para el ajuste con las crecidas

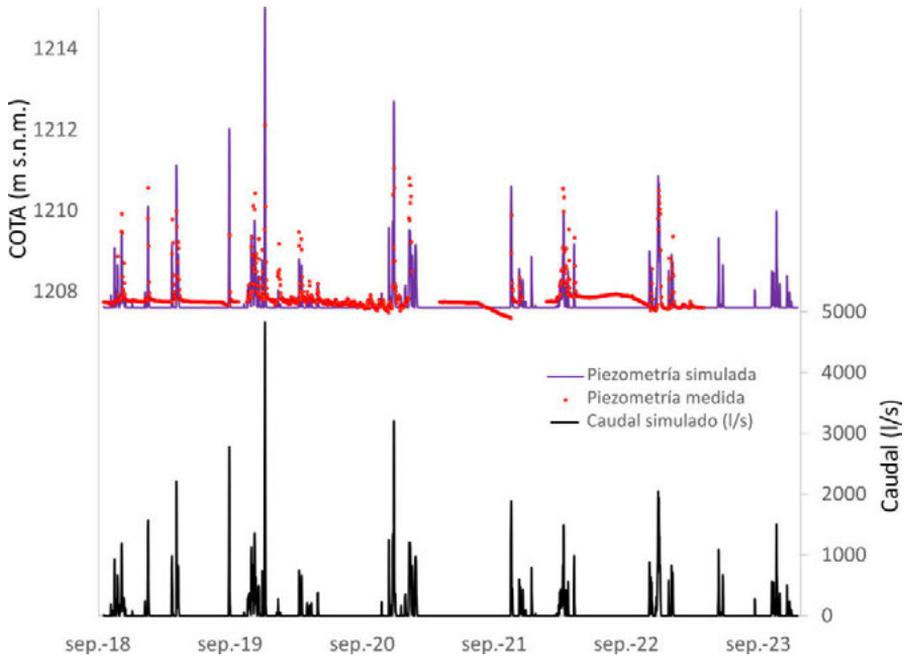


Figura 4. Curva de simulación de la variación epifreática y variación del nivel medido para el ajuste con los picos de crecidas. Se incluye también la curva simulada del caudal drenado por la galería en el periodo considerado en litros por segundo

Discusión

La nueva zona descubierta y parcialmente topografiada se adapta preferentemente a direcciones de fracturación con un trazado reticular que posteriormente se desarrolla en sentido E-O. Se observan dos niveles principales de karstificación (Fig. 2b), uno fósil y otro semiactivo en la zona más oriental y completamente inundado en la zona más occidental hacia aguas abajo, con un importante volumen de agua almacenada semicolgada. A partir del Meandro Jero, se

desarrolla un profundo cañón que comunica niveles semiactivos con fósiles y finaliza en un escalón asociado a fallas, alineadas con las que escalonan el borde septentrional del polje de la Cañada de los Mojones (González Ramón *et al.*, 2023). Relacionadas con esta zona de falla se localizan grandes chimeneas, posiblemente conectadas con sumideros, que podrían focalizar buena parte de las descargas durante las crecidas. La continuación de la cavidad por la zona con circulación de agua más o menos permanente es la Galería del Infinito (Fig. 2a), solo accesible sin tener que bucear en sequías prolongadas. Esta galería finaliza en un sifón (Sifón Mavil) aún pendiente de exploración.

Los ajustes conseguidos en el modelo de transferencia ponen de manifiesto la existencia, ya constatada por muchos autores (e.j. Atkinson, 1977; Gunn, 1986; Bonacci, 1993), de una dualidad en el flujo subterráneo entre aguas de circulación rápida por la zona no saturada y aguas de circulación lenta en la zona de almacenamiento. En ausencia de lluvias el agua almacenada en el Petit Riu circula preferentemente por conductos saturados que asoman en los sifones a cotas en torno a 1209 m, en la zona más cercana a la ubicación del sensor. Este agua almacenada circula libremente por lagos y amplios conductos, lo que explica el valor de S tan elevado que se obtiene en el ajuste. En cambio, durante las crecidas, la mayoría del agua registrada por el sensor, que penetra por sumideros y fracturas, circula a gran velocidad por la zona no saturada sin almacenamiento previo, por lo que la conductancia es máxima y el valor de S mínimo. Se ha considerado por tanto que la restitución del caudal que pasa por la zona donde se localiza el sensor sería el sumatorio de ambas simulaciones, lo que supone un volumen anual medio de 2,8 hm³ para el periodo simulado (Fig. 5). Por otra parte, los resultados de los ajustes indican que la cuenca subterránea vertiente al Petit Riu tiene una superficie variable, de 1,2 km² en aguas bajas, que se incrementa a 3,5 km² en los periodos de mayor pluviosidad. En la figura 6 se ha dibujado dos posibles cuencas vertientes que cumplirían las condiciones impuestas por el modelo.

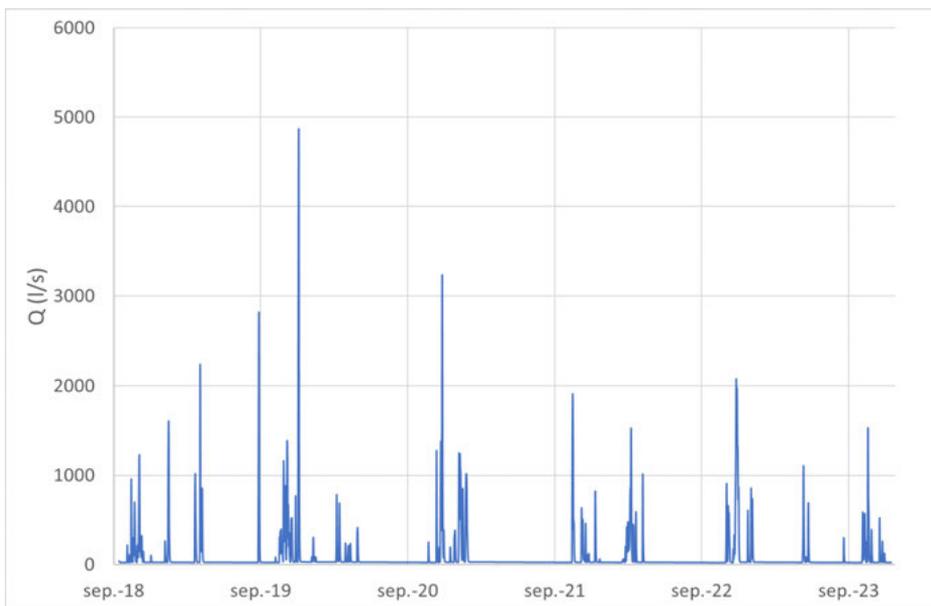


Figura 5. Hidrograma resultante del modelo de transferencia del caudal drenado por la cuenca vertiente al Petit Riu

Conclusiones

Los nuevos descubrimientos realizados en el Sector de Petit Riu han permitido realizar un nuevo mapa topográfico que incluye 3 km de desarrollo de conductos kársticos con un desnivel positivo que ya supera los 140 m con las nuevas chimeneas escaladas aún pendientes de topografía. La red kárstica presenta en su primera parte un trazado reticular adaptado a fracturas para posteriormente desarrollarse en sentido E-O.

El estudio de la variación del nivel epifreático ha puesto de manifiesto la existencia de un comportamiento binario en el flujo muy marcado, con agua que penetra por los sumideros y fracturas de la cuenca subterránea vertiente a este sector y que circula muy rápidamente debido a una elevadísima transmisividad. Por otra parte, se observa un flujo lento del agua almacenada en grandes conductos y zonas de pequeños lagos alimentados de forma continua por aguas que circulan por fisuras y poros y que drenan el epikarst.

La restitución de hidrograma y la evaluación de la LLU indica que se infiltra el 59% de precipitación media anual para el periodo considerado entre 2028 y 2023 con un valor medio de 2,8 hm³/año. A partir de la modelización realizada, se deduce también que la cuenca subterránea vertiente a este sector triplica su tamaño durante las grandes crecidas, pasando de tener una extensión superficial de 1,2 km² en aguas bajas a 3,5 km² en aguas altas.

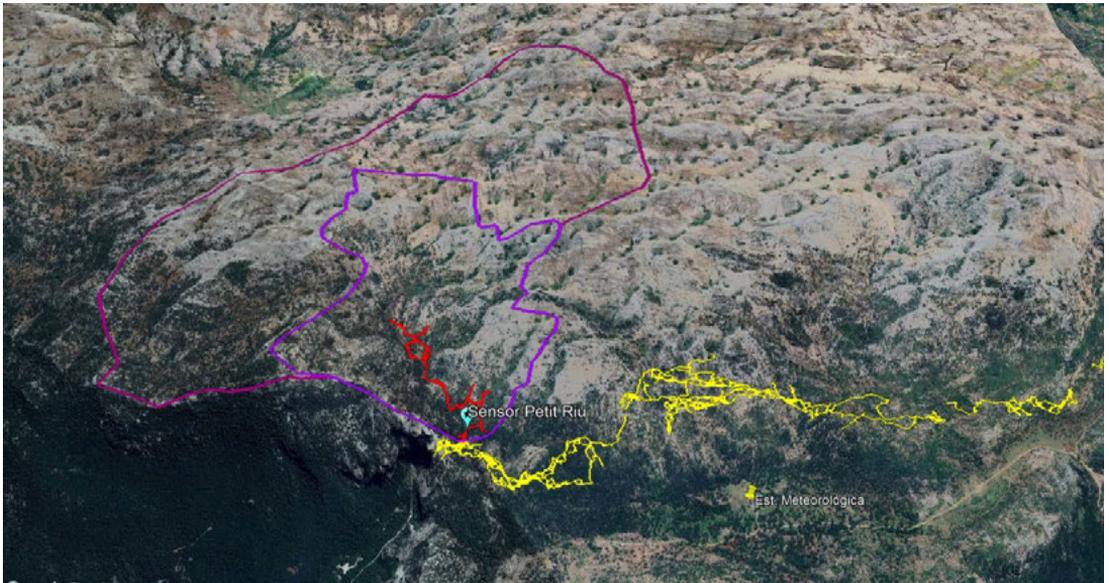


Figura 6. Cuenca vertiente en aguas bajas (línea violeta) y en aguas altas (línea morada) a las nuevas galerías exploradas en Petit Riu (líneas en rojo) y su relación con el resto de las galerías que componen la Cueva de los Chorros (líneas amarillas). Se incluye también la localización de la estación climática utilizada (Imagen 3D tomada de Google Earth)

Referencias

- Atkinson, T.C. (1977). Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in Mendip Hills, Somerset (Great Britain). *J. Hydrol.* 35, 93-100.
- Bonacci, O. (1993). Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers. *Hydrological Sciences Journal*, 38, 51-62.
- Corvi, M., (2020). TopoDroid User Manual, Version 5.0.4j - 2 Jul, 2020, 111 p.: <https://github.com/marcocorvi/topodroid/raw/master/manual.pdf>, (accessed October 23, 2020).
- Cuenca Payá, A. (1976). Influencia de los elementos morfoestructurales en la génesis del endokarst de Calar del Mundo (Prov. Albacete, España). *Cuadernos de Geología*, 18, 67-82.
- González-Ramón, A., Calaforra-Chordi, J. M., Ronda-García, J. L., Rodríguez-Estrella, T., Melero-López, J.; Morales-González, A. L. (2023). La Cueva de los Chorros del río Mundo. Estado actual de conocimiento. Homenaje a Adolfo Eraso Romero. Monografía de la Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst, 122-153.
- Gunn, J. (1986). A conceptual model for conduit flow dominated karst aquifers. In: Karst Water Resources, Giinay G, Johnson AI (Eds), Proc. Ankara Symp., July 1985, 587-596. IAHS Publ. no. 161.
- Hargreaves, G. H., y Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99.
- Melero López, J. M., y Martínez Cutillas, J. A. (2019). Anotaciones sobre los trabajos de Extopocien en la cueva de los Chorros (1993-2018). *Boletín de la SEDECK* 13, 71-80.
- Moral, F. (2005). Contribución al conocimiento de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Segura (Alto Guadalquivir y Alto Segura). Tesis Doctoral, Universidad Pablo de Olavide (Sevilla). 579 pp.
- Moral, F. (2008). La altiplanicie kárstica de la Sierra de Segura (Cordillera Bética). Factores topográficos y climáticos condicionantes del proceso de dolinización. *GeoTemas*, 10, 1573-1576.
- Moral F. (2019). La altiplanicie kárstica de la Sierra de Segura: el mayor Torcal de la Cordillera Bética. *Boletín de la SEDECK*, 13, 24-36.
- Padilla, A. y Delgado, J. (2013). Tratamiento y gestión de series temporales hidrológicas. Diputación provincial de Alicante – Aljibe consultores.
- Pla Salvador, R. (1966). Nuevas prospecciones en el Calar del Mundo. *Geo y Bio karst*, Año III num. 9. Barcelona. 21-22.
- Rodríguez Estrella, T. (1979). Geología e hidrogeología del sector Alcaráz-Lietor-Yeste (provincia de Albacete). Síntesis geológica de la Zona Prebética. Tesis doctoral. IGME, 566 pp
- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.

Aplicación de tecnología geoespacial para la recuperación y puesta en valor de recursos turísticos: el caso de la Cueva Roja de Tenerife, Islas Canarias

Xifré Balcells, R.^(1,2), Hernández Gutiérrez, L.E.^(1,3)

1 Instituto Volcanológico de Canarias, INVOLCAN. 38400 Puerto de La Cruz, Tenerife.

2 Scanland Project, SL. Barcelona / Tenerife.

contact@scanland-project.com

3 Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Movilidad. Gobierno de Canarias. 38600 Santa Cruz de Tenerife.

lhrgut@gobiernodecanarias.org

Resumen

Las islas Canarias precisan de nuevos modelos de desarrollo turístico como el ecoturismo y el geoturismo, que armonicen la convivencia de los residentes locales con los turistas y procuren un desarrollo sostenible de la actividad turística. La naturaleza de las islas y su singularidad geológica garantizan el éxito de estos nuevos modelos, pero es preciso identificar y evaluar los recursos ecoturísticos y geoturísticos existentes para su aprovechamiento. Sin duda las cavidades volcánicas presentes en las islas son uno de los recursos potencialmente más interesantes para los ecoturistas. La Cueva Roja, localizada en el T.M. de Santa Cruz de Tenerife, es una cavidad excavada en un cono volcánico de piroclastos basálticos soldados, que tiene una edad comprendida entre los 0,69 y los 0,01 m.a. (Pleistoceno Superior) y que pertenece a los episodios tardíos de las erupciones del Eje de rift NE o de la Dorsal Pedro Gil de la isla. Es una cueva de gran valor histórico ya que, además de ser utilizada por los aborígenes prehispanicos, los guanches, se sitúa en el camino histórico de Las Lecheras, que fue utilizado hace décadas para comunicar varios núcleos del noreste y este de Tenerife, usándose como lugar de descanso de los caminantes durante varios siglos. Actualmente sufre un abandono importante y presenta evidentes signos de inestabilidad que requieren de estudio. En este trabajo se presentan las técnicas geoespaciales que se aplicaron y que permitieron obtener un gemelo digital de alta precisión de la cavidad, así como un conjunto de herramientas digitales derivadas, que sirven como base para el análisis de la estabilidad estructural y la planificación de actuaciones y usos. Además, se ha podido elaborar un visor 3D para realizar visitas virtuales, que dará visibilidad a este recurso turístico y fomentará su protección.

Palabras clave: cuevas volcánicas, ecoturismo, láser escáner 3D, LiDAR, piroclastos.

Abstract

The Canary Islands need new tourism development models such as ecotourism and geotourism, which harmonize the coexistence of local residents with tourists and ensure the sustainable development of tourism. The nature of the islands and their geological uniqueness guarantee the success of these new models, but it is necessary to identify and evaluate the existing ecotourism and geotourism resources for their use. Undoubtedly, the volcanic cavities present in the islands are one of the most potentially interesting resources for ecotourists. The Red Cave ("Cueva Roja"), located in the municipality of Santa Cruz de Tenerife, is a cavity excavated in a volcanic cone of welded basaltic pyroclasts, which has an age between 0.69 and 0.01 m.a. (Upper Pleistocene) and belongs to the late episodes of the eruptions of the NE rift axis or the Pedro Gil Ridge of the island. It is a cave of great historical value since, in addition to being used by the pre-Hispanic aborigines, the Guanches, it is located on the historic path of Las Lecheras, which was used decades ago to communicate several nuclei of the northeast and east of Tenerife, being used as a resting place for walkers for several centuries. Nowadays it suffers a significant abandonment and presents evident signs of instability that require study. This paper presents the geospatial techniques that were applied and that allowed to obtain a high-precision digital twin of the cavity, as well as a set of derived digital tools, which serve as a basis for the analysis of the structural stability and the planning of actions and uses. In addition, it has been possible to develop a 3D viewer for virtual tours, which will give visibility to this tourist resource and promote its protection.

Key words: 3D laser scanner, ecotourism, LiDAR, pyroclasts, volcanic caves.

Introducción

El recurso ecoturístico de las cuevas volcánicas

Las cuevas naturales tienen un gran valor patrimonial y natural que las ha convertido en un atractivo turístico que contribuye positivamente a la diversificación de la oferta turística de un destino. En Canarias las cuevas turísticas de naturaleza volcánica son un verdadero tesoro por su calidad y belleza y, aunque están presentes en casi todas las islas del archipiélago, su número es limitado, a pesar de que existen muchas cavidades creadas durante las erupciones volcánicas.

Las cuevas volcánicas son un recurso turístico importante dentro del turismo ecológico y sostenible y concretamente dentro del geoturismo. El interés que despierta el mundo subterráneo entre los turistas no sólo atrae a geoturistas, sino también a los turistas de sol y playa del mismo destino, como es el caso de las cavidades visitables en las islas de Lanzarote, Fuerteventura y Tenerife. Esto supone que las cuevas turísticas canarias sean visitadas por un gran número de personas a lo largo del año, siendo todas ellas importantes reclamos turísticos en cada una de las islas en las que se encuentran: Cueva de Los Verdes y Jameos del Agua en Lanzarote, Cueva del Viento en Tenerife, Cueva del Llano en Fuerteventura, Caños de Fuego en La Palma y Tubo Volcánico de Guinea en El Hierro.

La gestión de los peligros naturales de las cuevas volcánicas

La gestión turística de estas cavidades conlleva ciertas peculiaridades que no se tratan en otros tipos de establecimientos turísticos. Al tratarse de recursos subterráneos naturales, esta actividad está expuesta a ciertos peligros naturales que es importante reconocer, evaluar y, en su caso, planificar y adoptar las medidas necesarias para garantizar la seguridad de visitantes y trabajadores. Los peligros naturales más importantes a los que se enfrentan los gestores, trabajadores y usuarios de las cuevas volcánicas turísticas son dos: la estabilidad de la cavidad y la exposición al gas radón (Hernández-Gutiérrez et al., 2024).

El Decálogo de las Cuevas Turísticas de España (Durán, 2006) establece que los "gestores se comprometen a establecer los adecuados mecanismos de gestión, control y vigilancia que garanticen la correcta conservación y restauración del medio subterráneo". Aunque no se hace referencia específica a la seguridad de las personas que visitan o trabajan en la cavidad, se entiende que, al velar por la correcta conservación y restauración del medio subterráneo, se está garantizando la estabilidad estructural de la cavidad (Hernández Gutiérrez, 2022).

Por otro lado, el Real Decreto Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes (Ministerio de la Presidencia, 2022), establece la obligación de que los titulares (gestores) de las cuevas turísticas realicen los estudios necesarios para determinar si existe una exposición significativa al gas radón de los trabajadores o de los miembros del público.

Los gestores de las cuevas turísticas volcánicas de Canarias han manifestado que carecen de los protocolos específicos para el control y vigilancia de estos peligros naturales (Hernán-

dez-Gutiérrez *et al.*, 2024) y, por tanto, se hace necesario facilitar a los gestores las herramientas adecuadas para actuar.

Las técnicas geoespaciales como herramientas de evaluación y divulgación

En este sentido, las técnicas geoespaciales se han configurado como herramientas de última generación para la evaluación de los peligros naturales, como son la estabilidad de la cavidad y el control de la exposición de las personas a la concentración de gases nocivos como el radón (WHO, 2009) y el CO₂ entre otros. En el presente trabajo se expondrán las técnicas aplicadas al caso particular de la Cueva Roja en Tenerife, especificando las distintas aplicaciones en el ámbito geotécnico y en el control de la concentración de gases.

Además, se expondrá cómo estas tecnologías permiten obtener productos audiovisuales que contribuyen a la difusión del recurso ecoturístico y a su puesta en valor.

Marco geológico

La geología del Archipiélago Canario está dominada prácticamente en su totalidad por una sucesión de materiales y estructuras volcánicas (Abdel-Monem *et al.*, 1972; Carracedo *et al.*, 2001). Secuencias de emisiones lávicas, así como de depósitos piroclásticos de composición muy variable, configuran un paisaje muy singular dentro del territorio insular.

En cuanto a la geoquímica de las rocas volcánicas de Canarias, pertenecen a la serie ígnea alcalina, en este caso, asociada a volcanismo de intraplaca. Esta serie ígnea está formada por una secuencia de rocas cuya composición evoluciona desde términos indiferenciados, representados por basaltos, términos intermedios, representados por traquibasaltos y términos más diferenciados o evolucionados, representados por traquitas, fonolitas e incluso riolitas (Rodríguez-Losada *et al.*, 2009).

Toda la actividad volcánica efusiva de las Islas Canarias ha llevado a la construcción y crecimiento subaéreo del archipiélago. En la actualidad, se encuentran en superficie tanto edificios volcánicos muy recientes, correspondientes a los últimos eventos volcánicos, como escudos volcánicos y materiales muy antiguos y, en general, muy alterados, de los cuales hoy queda visible una mínima parte de los que fueron en el Mioceno-Plioceno.

La Cueva Roja está enclavada en un cono de piroclastos basálticos (Fig. 1) que tienen una edad comprendida entre los 0,69 y los 0,01 m.a. (Pleistoceno Superior) y pertenecen a los episodios tardíos de las erupciones volcánicas del Eje de rift NE o de la Dorsal Pedro Gil de la isla (Barrera Morate y García Moral, 2011). Este cono volcánico está parcialmente enterrado por coladas de lavas de erupciones posteriores (Hernández Pacheco, 1985), por lo que no se aprecia exteriormente su forma original.

Se trata de una cavidad excavada en un talud, inicialmente de forma natural por desprendimiento parcial de los piroclastos basálticos de color rojo soldados (toba) que constituyen el

como volcánico y en la que, además, ha contribuido la extracción de bloques de toba durante su explotación como cantera de bloques de toba. Estos bloques se empleaban habitualmente en la construcción de edificaciones hasta la década de los 70 en las islas.



Figura 1. Vista general del exterior de la Cueva Roja, excavada en un cono de piroclastos basálticos de color rojo

Cueva Roja, patrimonio histórico

La Cueva Roja se localiza en el T.M. de Santa Cruz de Tenerife, en el macizo volcánico de Anaga, un accidente geográfico montañoso que ha limitado hacia el norte el crecimiento de la ciudad capital de la isla. Este macizo suponía un obstáculo en el pasado para la comunicación entre los dos núcleos poblacionales más importantes en el noroeste de Tenerife, como son la ciudad de San Cristóbal de La Laguna y Santa Cruz de Tenerife.

La comunicación se realizaba a través del conocido como Camino de Las Lecheras, frecuentado mayoritariamente por las mujeres de los valles (Valle Jiménez y Valle Tabares) que transportaban las lecheras metálicas para vender este producto por las calles de la capital. Las zonas de los valles eran fértiles gracias a la presencia de recursos hídricos, lo que favorecía tanto a la agricultura como a la cría de ganado. Todos los productos de estas actividades se transportaban por el camino de Las Lecheras, pero fueron estas mujeres las que dieron nombre al camino por su llamativa imagen transportando las cántaras de leche en sus cabezas.

En este contexto, el papel de la Cueva Roja fue relevante para los usuarios del camino, ya que se usó como lugar de descanso de los caminantes durante varios siglos. En el caso de los guanches, es muy posible que también fuera usada como solución habitacional. Hoy en día la cueva

se encuentra en un lamentable estado de abandono y suciedad y, requiere la atención de los responsables públicos para su recuperación y mantenimiento. Es indudable su potencial como recursos geoturístico, ya que, a pesar de su estado y la escasa visibilidad que se le ha dado, es visitada por muchos ecoturistas que transitan por el Camino de Las Lecheras.

Por otro lado, el año 1936, en la Cueva Roja, 19 miembros de la CNT celebraron una reunión para debatir cómo actuar ante el alzamiento militar (García Luis, 2007). En el año 1937, en el llamado *Proceso a la CNT*, fueron fusilados 19 militantes de este sindicato. La motivación de los mismos fue querer mejorar las condiciones de vida de la clase trabajadora isleña y, para ello, querían proponer el establecimiento de un nuevo orden social colectivizado, que redistribuyera la riqueza y el poder que, según ellos, se concentraba en manos de unos pocos: patronos, terratenientes y la alta burguesía. A este grupo de sindicalistas fusilados se les conoce como “Los 19”.

Debido al valor patrimonial histórico de la “Cueva Roja” y a su singularidad geológica, el INVOLCAN (Instituto Volcanológico de Canarias) tomó la iniciativa de incorporarla al conjunto de elementos a estudiar dentro del proyecto VOLTURMAC. De esta manera, con la participación de la empresa Scanland Project SL, se realizó un modelado digital de la cavidad mediante el empleo de técnicas geoespaciales, que contribuirá a la recuperación de este elemento patrimonial tan importante para la isla.

Metodología

Los gestores de estas instalaciones deben realizar inspecciones y estudios previos de las condiciones de estabilidad de la cavidad, identificar indicios o signos de posibles desprendimientos en el interior y así anticiparse a la ocurrencia de cualquier evento de este tipo, adoptando las soluciones pertinentes. Estos estudios, una vez iniciada la actividad o explotación turística del recurso, deben repetirse con periodicidad, al menos, anual.

El estudio previo debe contemplar lo siguiente:

1. Obtención del primer Modelo Digital del Terreno (MDT) de toda la cavidad, a partir de una nube de puntos georreferenciados, mediante la aplicación de la técnica de escáner láser 3D. Este primer modelo se considera la medida “cero” a partir de la cual se referenciarán las sucesivas campañas de medidas anuales a realizar para el control estructural.
2. Representación de la traza de la cavidad subterránea en relación con la topografía de superficie a fin de determinar qué elementos y factores externos pueden afectar a la estabilidad y salubridad de la misma.
3. Cubicación total de la cavidad y establecimiento de secciones de igual volumetría para la planificación de la campaña de medida de gases.
4. Inventario de inestabilidades que consistirá en la identificación, dimensionado y localización georreferenciada de los principales tipos de inestabilidad estructural de la cavidad volcánica.

Las técnicas geoespaciales aplicadas en la Cueva Roja de Tenerife han sido las siguientes:

Escaneo 3D con láser scanner (TLS) FARO Focus Premium

Para la toma de datos y realizar el levantamiento, se ha utilizado un láser escáner 3D, modelo *Focus Premium*, de la marca FARO (Fig. 2a), siendo los ajustes empleados de ¾ x3, con las precisiones indicadas en la Fig. 2b. Durante el proceso se ha utilizado *Stream*, una aplicación móvil diseñada para integrar de manera efectiva los datos captados por los sensores láser, Lo cuales se integran posteriormente en servidores de postprocesado con utilización de IA ubicados en la nube.

Clase de láser	Láser de clase I	
Precisión en distancia	1 mm	
Rango: Blanco (80 % de reflectividad) Gris oscuro (10 % de reflectividad) Negro (2 % de reflectividad)	0.5 hasta 350 m 0.5 hasta 150 m 0.5 hasta 50 m	
Velocidad de medición (pts/seg)	Hasta 2 millones	
Error de rango	±1 mm	
Precisión 3D	2.0 mm hasta 10 m 3.5 mm hasta 25 m	
Rango de ruido:	a 10 m	a 25 m
Blanco	0.1 mm	0.2 mm
Gris oscuro	0.3 mm	0.4 mm
Negro	0.7 mm	1.2 mm
Resolución	Hasta 166 megapíxeles en color Resolución de color sin procesar: 807 megapíxeles	

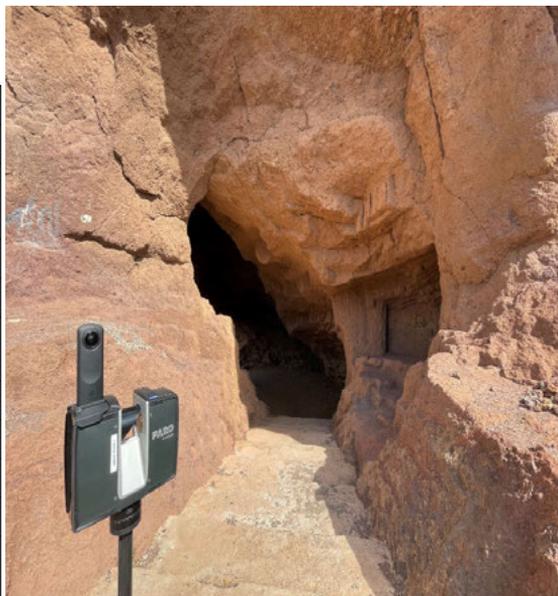


Figura 2. (a) Láser scanner Faro Focus Premium. (b) Características del escaneo

Esta aplicación ha facilitado el seguimiento en tiempo real de la recopilación de datos el día de la visita a la “Cueva Roja”. Gracias a esto, se ha podido verificar *in situ* la precisión de los datos obtenidos, evitando cualquier posibilidad de faltas o errores en la información recopilada.

Toma de datos con Lidar/SLAM Faro ORBIS

Para la obtención de datos LiDAR (*Light Detection and Ranging*) se ha utilizado un equipo Lidar FARO Orbis que, debido a su versatilidad y fácil manejo, ya que se puede utilizar manualmente o aerotransportado, en este estudio se ha utilizado en un monopie para facilitar los escaneos de alta resolución y la máxima precisión en la toma de datos. Por otro lado, la elección de este equipo se debe a la dificultad que supone el acceso a ciertos espacios, debido a su versatilidad y ligereza. El *FARO Orbis* es un láser escáner de alta precisión diseñado para capturar datos tridimensionales de entornos complejos que utiliza tecnología LiDAR para medir distancias mediante pulsos de luz láser, creando nubes de puntos detalladas que representan la superficie

escaneada. De esta manera, se obtienen datos brutos que nos indican la posición exacta del punto obtenido con capacidad para operar en diversas condiciones ambientales. Una vez completados los escaneos individuales, los datos deben ser registrados (alineados y unificados) en un sistema de coordenadas común utilizando algoritmos de ajuste. Los datos brutos obtenidos se procesan para eliminar el ruido y las anomalías, mediante técnicas de filtrado, submuestreo y segmentación.

Toma de datos fotogramétricos Dron DJI Mavic 3 multiespectral

Para apoyar la toma de datos exteriores o aquellos acceso complicado, se ha utilizado un dron multiespectral. Este dron aporta datos multiespectrales de los materiales que componen la cueva y complementan los espacios no accesibles para el escáner.

Resultados

Con la unión de los datos obtenidos entre ambos sensores (*FARO Focus Premium* y *Lídar/SLAM FARO Orbis*) se han realizado alrededor de 20 escaneos, con un recorrido de aproximadamente 5 km de barrido de datos.

Al utilizar la aplicación *Stream*, se ha aprovechado al máximo la tecnología disponible para garantizar la integridad y calidad de los datos recopilados. Esta integración entre el hardware y las herramientas basadas en la nube ha permitido una sincronización fluida y en tiempo real de la información capturada, lo que ha brindado mayor confianza en los resultados obtenidos y ha agilizado el proceso de recolección de datos.

Una vez obtenidos todos los datos brutos de los sensores, se han procesado con diferentes softwares y filtrados mediante algoritmos geoespaciales para registrarlos y unirlos en un solo conjunto de datos coherentes. Posteriormente, se ha generado una única nube de puntos en formato E57. El archivo resultante se compone de 763 millones de puntos, con un error medio de cierre de entre 2 y 4 mm.

A partir de la nube de puntos se generó un modelo de realidad virtual al que se puede acceder a través de aplicación móvil o con un ordenador personal, pudiéndose realizar una experiencia inmersiva en 3 dimensiones con la utilización de gafas de realidad virtual. Este producto contribuye a la puesta en valor del recurso ecoturístico y a dar visibilidad al mismo para sensibilizar a la población local, visitantes y autoridades públicas, sobre la necesidad de proteger y conservar esta cueva que forma parte del patrimonio histórico de la isla de Tenerife.

Información gráfica geoespacial obtenida

A partir del procesado de datos se ha obtenido la siguiente información gráfica geoespacial de la Cueva Roja, que permite el análisis estructural de la misma representada en las Figuras 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9.



Figura 3. Datos finales (vista superior) de la Cueva Roja y su entorno. Conjunto datos LiDAR



Figura 4. Datos finales (vista superior) de la Cueva Roja y su entorno. Tecnología de nube de puntos (pointcloud) transparente, en ella se reflejan todas las formas de la cueva sin restricciones materiales, pudiéndose analizar las interacciones entre las mismas

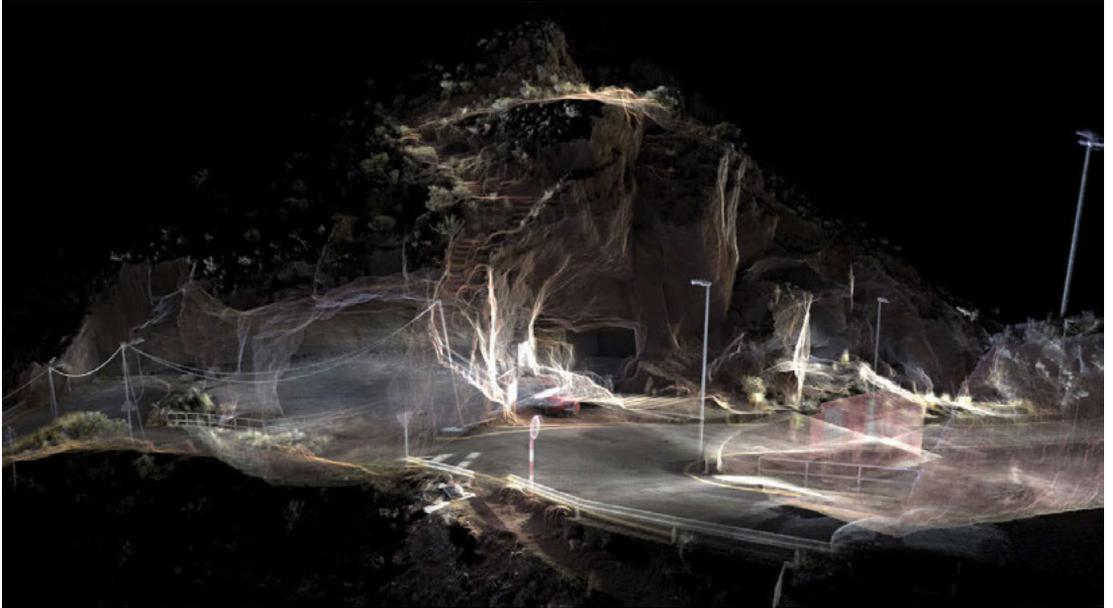


Figura 5. Datos finales (vista 3D) de parte delantera de la entrada a la Cueva Roja, interacciones transparentes

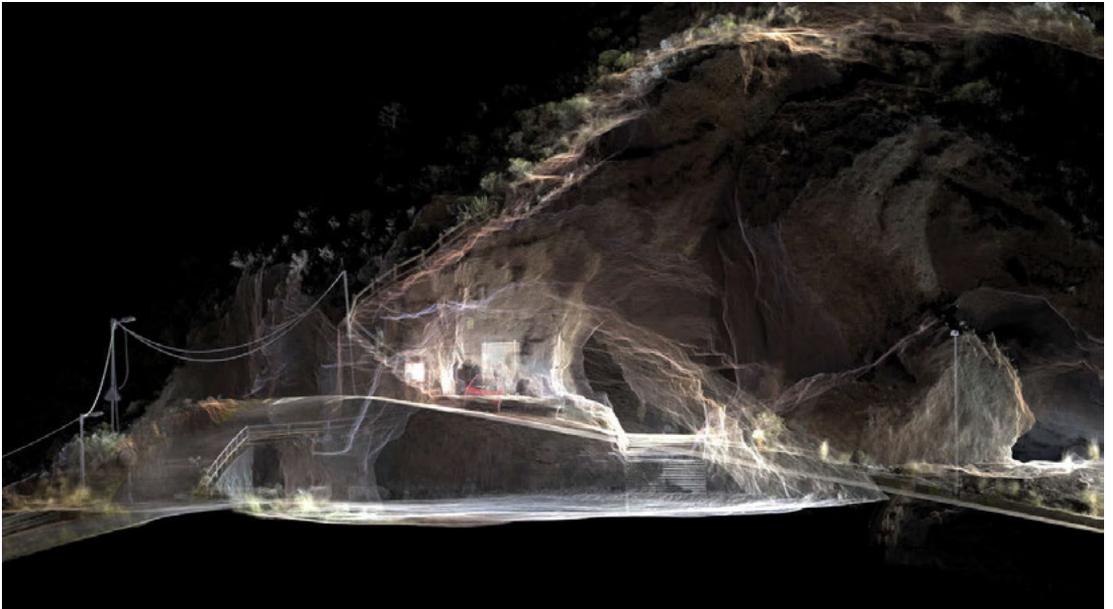


Figura 6. Datos finales (vista lateral) de parte lateral donde se ve el pilar intermedio de la Cueva Roja, interacciones transparentes

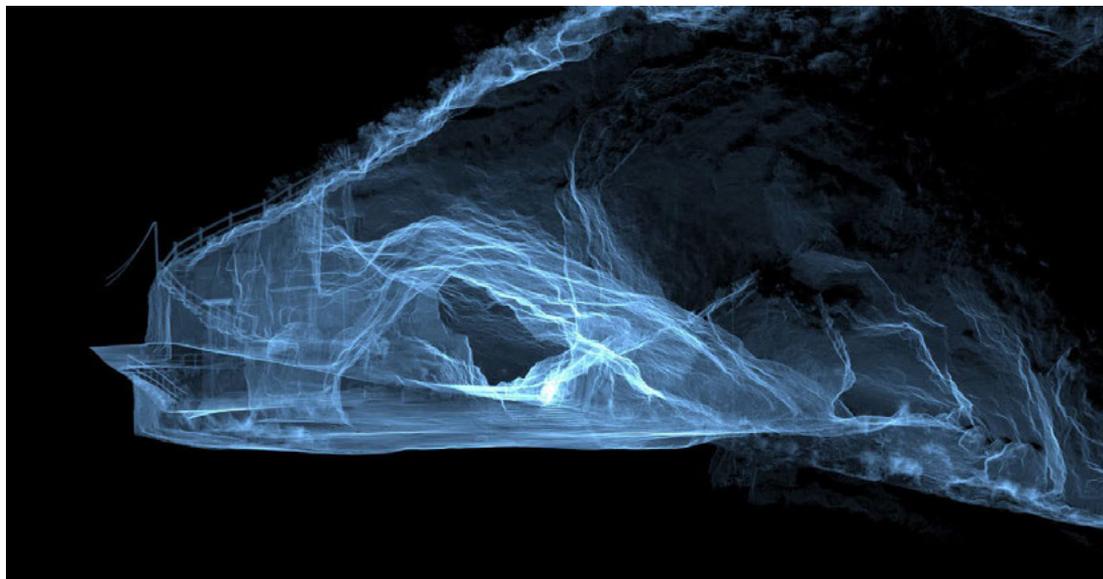


Figura 7. Datos finales (cista lateral) vista con mata de colores de alturas de la parte lateral de la cueva

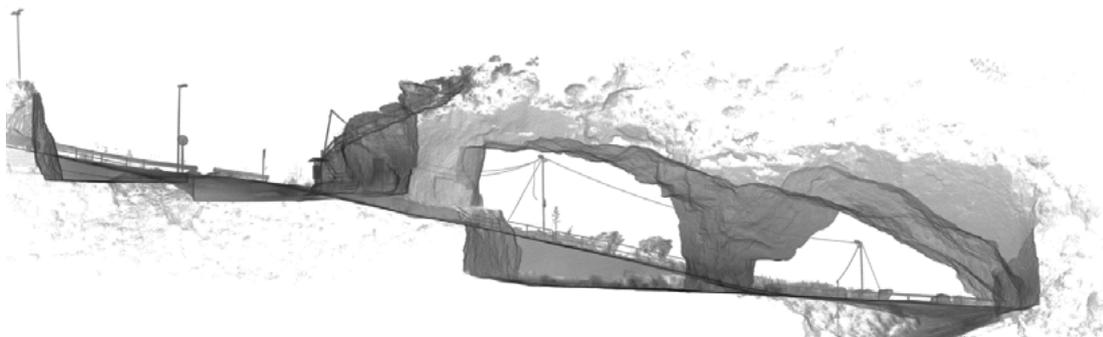


Figura 8. Sección 1 de la Cueva Roja, datos extraídos de la nube de puntos del escaneo

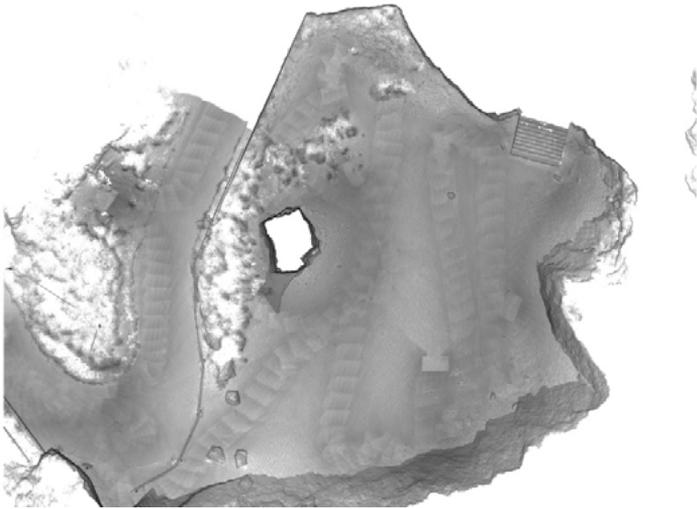


Figura 9. Planta interior, base interior de la Cueva Roja, datos extraídos de la nube de puntos

Conclusiones

La Cueva Roja de Tenerife es una cavidad excavada en un cono de piroclastos basálticos soldados, de gran valor como patrimonio histórico, pero que sufre un importante estado de abandono y que presenta signos de inestabilidad.

La realización de una campaña de escaneo láser 3D, acompañada de datos LiDAR y apoyada con datos fotogramétricos de un dron, permitieron obtener un modelo digital de la cueva de alta precisión y calidad.

Las técnicas geoespaciales demuestran ser unas herramientas de gran utilidad, no solo para el análisis morfológico y estructural de los elementos analizados, sino también para la puesta en valor del patrimonio natural o cultural a partir de los productos gráficos generados. La existencia en el mercado de equipos de última generación, de altas prestaciones y precisión, no solo son de aplicación en el mundo de la ingeniería y la arquitectura, sino que también son de una gran utilidad en el campo del patrimonio natural.

Con toda la información obtenida, se podrán establecer los protocolos de seguridad y control de inestabilidades y concentración de gases en la cavidad volcánica, para ser aplicados por el gestor de la instalación turística.

Es importante la divulgación de las técnicas geoespaciales en el ámbito del ecoturismo y geoturismo, por su rapidez en la ejecución, la nula invasión del elemento a estudiar y la riqueza de la información obtenida, con múltiples aplicaciones. Para la obtención de modelos digitales útiles y precisos, es fundamental contar con empresas expertas y de alta cualificación para que el producto final sea realmente fiable y representativo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto “VOLTURMAC – Fortalecimiento del volcano turismo en la Macaronesia (MAC2/4.6c/298)”, cofinanciado por el Programa de Cooperación INTERREG 20 V-A España-Portugal MAC (Madeira-Azores-Canarias) 2014-2020 y ejecutado por el Instituto Volcanológico de Canarias, INVOLCAN.

Referencias

- Abdel-Monem, A., Watkins, N. D., & Gast, P. W. (1972). Potassium-argon ages, volcanic stratigraphy, and geomagnetic polarity history of the Canary Islands; Tenerife, La Palma and Hierro. *American Journal of Science*, 272(9), 805–825. <https://doi.org/10.2475/ajs.272.9.805>
- Barrera Morate, J., & García Moral, R. (2011). Mapa Geológico de Canarias. Santa Cruz de Tenerife: GRAFCAN.
- Cano Delgado, José Juan (2018). Repercusiones en la recuperación de caminos tradicionales: avances en un estudio comparado entre Baja California Sur (México) y Tenerife (España). Cuadernos del Qhapaq Ñan. Año 5, número 5, 2017. Ed. Giancarlo Marcone Flores y Sergio Barraza Lescano. Ministerio de Cultura del Perú.
- Carracedo, J.C.; Badiola, E.R.; Guillou, H.; de la Nuez, J.; Pérez Torrado, F. J. (2001). Geology and Volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries. *Estudios Geológicos*, 57, 175–273.
- Durán, J.J. (2006). Guía de las Cuevas Turísticas de España. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España & Asociación Española de Cuevas Turísticas. Obtenido de http://www.igme.es/igme/publica/libros1_HR/GUIA_CUEVAS/GUIA%20CUEVAS.BAJA.pdf
- García Luis, R. (2007). La justicia de los rebeldes. Los fusilados en Santa Cruz de Tenerife (1936-1940), Tegueste, Baile del Sol, 1994; ÍD.: Proceso a la CNT. 19 fusilados el 23 de enero de 1937, Santa Cruz de Tenerife: Lágrimas y Rabia, 2007; ÍD.: “Los fusilados: las últimas letras ¿Temor a la muerte?”, en Cuadernos del Ateneo, 23 (2007), pp.41-52
- Hernández Gutiérrez, L. E. (2022). Gestión de cuevas volcánicas turísticas frente a peligros naturales. Trabajo Fin de Máster. Universidad Politécnica de Madrid.
- Hernández-Gutiérrez, L. E., Calderón-Guerrero, C., Martín-Rosales, W., Rodríguez-Martín, J., Cruz-Pérez, N., Hernández-Martín, H., et al. (2024). Guidelines for managing radon hazards in tourist volcanic caves in Spain. *GeoHealth*, 8, e2024GH001067. <https://doi.org/10.1029/2024GH001067>
- Hernández-Pacheco, A. (1985). “El vulcanismo histórico en las Islas Canarias”, en Síntesis de la actividad volcánica de las Islas Canarias. Santa Cruz de Tenerife: Instituto de Estudios Canarios, pp. 28-38.
- Haley, M. R., & McGee, M. K. (2023). A flexible functional method for jointly valuing journal visibility and author citation count. *Scientometrics*, 128(6), 3337-3346. <https://doi.org/10.1007/s11192-023-04727-0>
- Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática. (2022). Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes. BOE núm, 305 de 21 de diciembre de 2022.
- Rodríguez-Losada, J.A., Hernández-Gutiérrez, L.E., Olalla, C., Perucho, A., Serrano, A., Eff-Darwich, A. (2009). Geomechanical parameters of intact rocks and rock masses from the Canary Islands: Implications on their flank stability. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 182, Issues 1–2, 2009, Pages 67-75, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.032>.
- WHO. (2009). H. Zeeb, & F. Shannoun (Eds.). WHO handbook on indoor radon: A public health perspective. World Health Organization. Obtenido de <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673>