

Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad

P.A. Robledo y J.J. Durán (Editores)

La Vall d'Uixó (Castellón), 2018

Trabajos del Séptimo Congreso Español
y Segundo Congreso Iberoamericano
sobre Cuevas Turísticas,
celebrado en La Vall d'Uixó (Castellón), en junio de 2018.

Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad / P.A. Robledo y J.J. Durán, eds. - La Vall d'Uixó (Castellón): Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), 2018.

462 pags.; 24 cm.

ISBN: 978-84-09-03068-2

Portada: Visita a bordo de una barca tradicional en una de las galería inundadas. Foto: Coves de Sant Josep.

Contraportada: Conjunto de coladas estalagmitas desarrolladas a favor de una fractura vertical en la galería seca. Foto: Coves de Sant Josep

Portadilla de patrimonio geológico: Foto: Roberto F. García (Espelofoto).

Portadilla de geoarqueología: Foto: Maria Luisa Rovira.

Resto de portadillas. Fotos: Coves de Sant Josep.

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

ISBN: 978-84-09-03068-2

Depósito Legal: M-20634-2018

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

Comité Organizador

Coordinador

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

Vocales

- Juan José Durán Valsero, *Presidente de actiba y Vicepresidente de ACTE.*
- Rafael Pagés Rodríguez, *Vicepresidente de ACTE.*
- Ovidio Altable Argüelles, *Secretario de ACTE.*
- Jorge García Fernández, *Consejero Delegado de Emsevall y Concejal de Ciutat Activa del Ayuntamiento de La Vall d'Uixó.*
- Higi Daniel Garcés, *Concejal de Turismo del Ayuntamiento de La Vall d'Uixó.*
- Pedro A. Robledo Ardila, *Instituto Geológico y Minero de España y Delegado de Relaciones Institucionales de ACTE y actiba.*
- Alba Fas Botías, *Promotora de Coves de Sant Josep, del Ayuntamiento de La Vall d'Uixó.*

Comité Científico

Presidente

- Dr. Pedro A. Robledo Ardila, Instituto Geológico y Minero de España.

Vocales

- Dra. Ana M^a Alonso Zarza, *Universidad Complutense de Madrid.*
- Dr. Bartolomé Andreu Navarro, *Universidad de Málaga.*
- Dr. José Miguel Andreu Rodes, *Universidad de Alicante.*
- Dra. Arantza Aramburu Artano, *Universidad del País Vasco.*
- Dr. José Benavente Herrera, *Universidad de Granada.*
- Dr. Francisco López Bermúdez, *Universidad de Murcia.*
- Dr. José María Calaforra Chordi, *Universidad de Almería.*
- Dr. Juan Carlos Cañaveras Jimenez, *Universidad de Alicante-CSIC.*
- Dr. Luis Carcavilla Urquí, *Instituto Geológico y Minero de España.*
- Dr. Francisco Carrasco Cantos, *Universidad de Málaga.*
- Dr. José Antonio Cuchí Oterino, *Universidad de Zaragoza.*
- Dr. Juan José Durán Valsero, *Instituto Geológico y Minero de España.*
- Dr. Ángel Fernández Cortés, *Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC).*
- D. Esteban Faci Aparicio, *Gobierno de Navarra.*
- Dr. Policarp Garay Martín, *Generalitat Valenciana.*
- Dr. Alfonso Hortelano Mínguez, *Universidad de Salamanca.*
- Dra. Montserrat Jiménez Sánchez, *Universidad de Oviedo.*
- Dr. Jesús Francisco Jordá Pardo, *Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).*
- Dra. Valme Jurado Lobo, *CSIC-IRNA, Sevilla.*
- Dr. Jerónimo López Martínez, *Universidad Autónoma de Madrid.*
- Dr. Wenceslao Martín Rosales, *Universidad de Granada.*
- Dr. Roberto Ontañón Peredo, *Gobierno de Cantabria.*
- Dr. Enrique Orche García, *Universidad de Vigo.*
- Dr. Eulogio Pardo-Igúzquiza, *Instituto Geológico y Minero de España.*
- Dr. Félix Pérez Lorente, *Universidad de La Rioja.*
- Dr. Antonio Pulido Bosch, *Universidad de Almería.*
- Dr. José Ramos Muñoz, *Universidad de Cádiz.*
- Dr. Joaquín Rodríguez Vidal, *Universidad de Huelva.*
- Dr. José Luis Sanchidrián Torti, *Universidad de Córdoba.*
- Dr. Enrique Serrano Cañadas, *Universidad de Valladolid.*
- D. Juan Sergio Socorro Hernández, *Museo de Ciencias Naturales, Tenerife.*
- Dr. Juan Ramón Vidal Romaní, *Universidad de A Coruña.*
- Dra. Cristina Liñán, *Fundación Cueva de Nerja.*
- Dr. Iñaki Vadillo Pérez, *Universidad de Málaga.*

- Dr. Jesús Miguel Soria Mingorance, *Universidad de Alicante*.
- Dr. Ramón Roselló Mora, *CSIC-IMEDEA*.
- D. Manuel Francesc Navarro del Alar, *Centre d'Estudis Vallers*.
- D^a María Luisa Rovira Gomar, *Museo Arqueológico de La Vall d'Uixó*.
- Dr. Josep A. Casabó Bernad, *Consejería de Educación y Cultura de la Generalitat Valenciana*.
- Dr. Ignacio Morell Evangelista, *Universitat Jaume I*.
- Dña. Raquel Morales García, *IGME*.
- Dra. Flor Árcega Cabrera, *UNAM, México*.
- Dr. Eduardo Adolfo Batllori Sampedro, *SEDUMA*.
- D. Jorge Romero Herrera, *SEFOTUR*.
- Dra. Pilar Orche Amaré, *Junta de Andalucía y SEDPGYM*.
- Dr. Sergio Martos Rosillo, *IGME*.
- D. Roberto Martínez Orio, *IGME*.
- Dr. Luis Moreno Merino, *IGME*.
- Dr. Antonio González Ramón, *IGME*.

Geomorfología, paleoclima e hidrogeología kárstica

A. González Ramón, A. Pedrera Parias, S. Martos Rosillo, C. Jiménez de Cisneros Vencelá y A. Ruíz Constán. Espeleogénesis de las cavidades de la Sierra de Mollina (Málaga, sur de España). Implicaciones hidrogeológicas y geomorfológicas.	15
C. Jiménez de Cisneros Vencelá, C. Liñán Baena, A. Peña Heras y E. Caballero Mesa. Dinámica espeleotémica actual en la cueva de Nerja (Málaga, España).	29
C. Jiménez de Cisneros Vencelá, A. Peña Heras, E. Caballero Mesa y C. Liñán Baena. Caracterización físico-química y mineralógica del suelo externo de la cueva de Nerja (Málaga, España).	43
R. Morales García, J.J. Durán Valsero y P.A. Robledo Ardila. Estudio hidroquímico de las aguas endokársticas de la cueva de s'Aigo, Ciutadella (Menorca).	55
F. Gázquez, J.M. Calaforra, W. Martín-Rosales y M. López-Chicano. Hidrotermalismo de baja temperatura durante la formación de espeleotemas subacuáticos en la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva).	69
P.A. Robledo Ardila, J.J. Durán Valsero y R. Morales García. Geomorfología de la cueva de s'Aigo, Cala Blanca, Menorca.	79
I. Álvarez, A. Aranburu, A. Bodego, M. Arriolabengoa, E. Iriarte, P. Bilbao, M. del Val, V. Abendaño, J.I. Calvo, D. Garate Maidagan, A. Hermoso de Mendoza, F. Ibarra, J. Legarrea, J. Tapia Sagarna, J. Agirre Mauleon. Metodología para la definición del perímetro de protección en los sistemas kársticos con arte rupestre: el caso de las cuevas de Alkerdi (Navarra, España).	95
O. García Menéndez, I. Morell Evangelista, B.J. Ballesteros Navarro y A. Renau Pruñonosa. Aprovechamiento de las aguas de crecida del sistema kárstico de San José para recarga artificial de acuíferos, Vall d'Uixó, Castellón.	111
E. Pardo-Igúzquiza, J.J. Durán Valsero y P.A. Robledo Ardila. Las cuevas como fractales: un valor añadido de las cuevas turísticas para la difusión de la investigación y la educación.	123

Patrimonio geológico y minero en cuevas y minas turísticas

E. Martín-Pinto, P.A. Robledo Ardila, J. Moreno García, F. Denguir Bujanow e I. Vadillo Pérez. Geoparques y cuevas. Propuesta para el desarrollo de espacios naturales protegidos en el subsuelo en el marco de la UNESCO.	131
---	-----

F. Fernández Amo, R. Pagés Rodríguez y M. Dorado Martínez. Ruta geominera entre los lugares de interés científico minas de Santa Marta y minas de Burguillos del Cerro (Badajoz, Extremadura).	141
M.P. Dorado Martínez, F.J. Fernández Amo y R. Pagés Rodríguez. Los museos geomineros asociados a cavidades en Extremadura (España).	153
P. Orche Amaré, J. Millán Naranjo y J.M. Román Rodríguez. Las minas de agua de Carmona (Sevilla): un valioso recurso patrimonial oculto en la campiña sevillana.	161
P. Orche Amaré y F. Cornello Mancha. Visitas guiadas a la mina de hierro La Lima: una aproximación a la minería de El Pedroso (Sevilla) entre finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX.	179
R. Jordá Bordehore, L. Jordá Bordehore y M. Arlandi Rodríguez. Propuesta de alternativas de recorridos mineros para su uso turístico en las minas de La Florida, Cantabria.	197
 Biología y cuevas	
A. de la Losa Román, C. Baquedano Estévez, P.A. Robledo Ardila, J.J. Durán Valsero y L. Moreno Merino. Estudio de la agresividad del peróxido de hidrógeno usado en el tratamiento del mal verde en cuevas turísticas.	211
C. Baquedano Estévez, A. de la Losa Román, J.J. Durán Valsero, P.A. Robledo Ardila y L. Moreno Merino. La lucha contra el mal verde en las cuevas turísticas españolas.	223
T. Viver, J. Amengual-Villarino, J. Gago-Vega, S. Díaz, M. Urdiain, J.J. Durán Valsero, P.A. Robledo-Ardila y R. Rosselló-Móra. Caracterización de la comunidad microbiana en la Cova des Pas de Vallgornera, Mallorca (España).	235
I. Fuente Merino, S. Celaya González, L. Quindós López, C. Sainz Fernández, L.S. Quindós Poncela y P.A. Robledo Ardila. Las cuevas y minas turísticas, el radón y la nueva Directiva Europea.	245
 Condiciones ambientales en cuevas y minas turísticas	
L. Ojeda Rodríguez, I. Vadillo Pérez, C. Liñán Baena, S. Foster, F. Carrasco Cantos, F.M. Villodres Montes, D. Jimena Fernández, A. Atencia Prieto y J. Benavente Herrera. Acondicionamiento e instalación de un equipo de espectroscopía láser (CO_2 , CH_4 , $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ y $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$) en la cueva de Nerja (Málaga).	253
R. Giménez Portero, M. Bartolomé Úcar, L. Ezquerro Ruíz, A. Moreno Caballud y C. Sancho Marcén. Primeros resultados de la monitorización ambiental en la Cueva de las Güixas (Villanúa, Pirineo central).	265

R. Jordá Bordehore, G. Umpiérrez Navarro, M. Arlandi Rodríguez, P. Muñoz Barco, E. Rebollada Casado y C. Crisóstomo Miranda. Estudio de estabilidad del Monumento Natural "Mina de la Jayona", Fuente del Arco, Badajoz.	279
---	-----

Gestión y desarrollo del turismo subterráneo

A.M. Fas Botias. La gestión de las Coves de Sant Josep: hacia una nueva cultura del turismo subterráneo.	293
---	-----

A. Torres Asensio, E. Romero Bomba, C. Moya Díaz, L. Hacha Bernal, M. Guerra González y W. Martín Rosales. La Gruta de las Maravillas y el modelo de gestión en el desarrollo turístico del destino Arcena.	305
--	-----

H. Rodrigues de Araujo y H.A. Santos Lobo. Gestão ambiental de grutas turísticas: caracterização de casos no Brasil, Portugal e Espanha.	315
---	-----

H.A. Santos Lobo, G.E. de Oliveira Santos, L.E. Panisset Travassos, J.V. Ibanes Alves, R. Fontes Masutti y M. Menezes Giusti. Contribuições da percepção de lotação para a capacidade de carga social em cavernas turísticas brasileiras: primeiros resultados.	327
--	-----

N.A. Jorge. Renovación de los destinos turísticos. Las cuevas como centro de complejos turísticos.	335
---	-----

Y. Palomo Arrabal. Turismo Villanúa: evolución e innovación de la cueva de las Güixas.	345
---	-----

M. Dr. El Kadiri, M. El Ahamadi, A. Ros, J.L. Llamusí, J.M. Calaforra, A. Sánchez y J. Amoros. La Grotte du Chameau, Valle de Zegzel, Marruecos. Proyecto de apertura turística.	353
---	-----

M.P. García Fidalgo y O.M. Altable Argüelles. Evolución de la visita turística en la cueva de Valporquero (1966-2017).	363
---	-----

H.A. Santos Lobo. La gestión em las cuevas turísticas iberoamericanas.	377
---	-----

A. Espín de Gea, A. Gil Abellán, M. Reyes Urquiza y L. Arévalo Lomas. Apertura del nuevo acceso a la cueva del Puerto de Calasparra (Murcia), un reto tecnológico desde la investigación geofísica inicial hasta el método de excavación del túnel de acceso.	389
--	-----

Geoarqueología e historia en cavidades

J.A. Casabó Bernad y M.L. Rovira Gomar. Los primeros asentamientos humanos en les Coves de Sant Josep (La Vall d'Uixó, Castelló).	407
--	-----

S. Machause López. Las cuevas en torno al poblado ibérico de Sant Josep (La Vall d'Uixó): ¿Espacios rituales o auxiliares?.	421
--	-----

Aplicación de nuevas tecnologías en cuevas turísticas

E. Navarrete-Martín, W. Martín-Rosales, O. Rabaza-Castillo, E. Romero-Bomba, M. López-Chicano, R. Moya-Díaz, A.B. Torres-Asensio y M. Guerra-González. Eficiencia energética del sistema de iluminación de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva): un paso más hacia un turismo sostenible.	435
A. Ros, J.L. Llamusí y A. Sánchez. Punto de Información Técnica PIT_NFC con tecnología NFC aplicado en cavidades y nuevas marcas para la topografía.	445
Y. Palomo Arrabal. Visita virtual a la cueva de las Güixas.	457

Presentación

"Cuevas: la flecha del tiempo, de la Prehistoria a la actualidad" es un libro donde se recogen los resultados de los trabajos de investigación básica y aplicada, innovación y desarrollo, evolución tecnológica, patrimonio geológico y minero, así como avances en la gestión y planificación en cuevas turísticas que se han realizado o se están llevando a cabo en un amplio abanico de cuevas de España e Iberoamérica, además de Francia y Portugal. Esta publicación está constituida por las contribuciones presentadas en el VII Congreso Español y II Congreso Iberoamericano de Cuevas Turísticas, celebrados en La Vall d'Uixó, (Castellón) entre el 21 y el 23 de junio de 2018. Se trata de la séptima edición de CUEVATUR, coincidente con la segunda convocatoria iberoamericana, en la que se recogen en torno a 40 trabajos, lo cual pone de manifiesto, la continuidad de una trayectoria muy amplia de participación en los eventos convocados por ACTE y actiba, con el respaldo y siendo la sede en este caso, del Ayuntamiento de La Vall d'Uixó que organiza el congreso.

Los trabajos presentados y que recopila esta obra abarcan estudios en todos los ámbitos importantes que son característicos de cuevas o minas de uso turístico. Además, el manuscrito conforma en cuanto a la procedencia de los trabajos y conferencias presentadas un puzle geográfico que abarca desde España, incluidos ambos archipiélagos, el canario y el balear, pasando por Portugal, Francia e Italia y Marruecos por primera vez. En su vertiente latinoamericana destacan las aportaciones de México y Brasil. La distribución de los trabajos en el conjunto del estado español es muy homogénea, con una decena de comunidades autónomas representadas. Algunas regiones como Andalucía, Aragón, Cantabria, o la anfitriona, Comunidad Valenciana, con especial énfasis en Castellón, son protagonistas de honor, ya que suponen más de la mitad de las contribuciones totales de la obra. Pero además, esta monografía cuenta también con algunos trabajos importantes que abren al conocimiento el estudio de cuevas en general y que no se ubican específicamente en una región en concreto.

Esta libro es sobre todo el fruto del duro, dilatado y riguroso trabajo realizado por prestigiosos investigadores de distintos Organismos Públicos de Investigación, universidades, nacionales e internacionales, corporaciones locales, otras Administraciones Públicas y empresas privadas, todos ellos, aunando esfuerzos de cara a ampliar el conocimiento de las cuevas y minas turísticas y de sus entornos.

Las contribuciones que aquí se presentan pueden agruparse en siete grandes bloques: 1) geomorfología, paleoclima e hidrogeología kárstica; 2) patrimonio geológico y minero; 3) biología y cuevas; 4) condiciones ambientales en cuevas; 5) gestión y desarrollo del turismo subterráneo; 6) geoarqueología e historia en cavidades; 7) aplicación de nuevas tecnologías en cuevas turísticas. En cada uno de estos apartados, definidos en el índice y la propia distribución de trabajos en el libro, se tratan aspectos muy diversos que se han abordado con un alto grado de rigurosidad. El primero de los bloques aborda por un lado, el estudio hidrogeológico del agua en acuíferos en los que se ubican cuevas turísticas, junto con estudios ligados al análisis paleoclimático o la aplicación de las geomatemáticas como técnica para su estudio y difusión. También, destaca

el estudio geomorfológico y su posterior cartografía como herramienta para el conocimiento del endokarst y la gestión de cavidades habilitadas al turismo, algunas de ellas con arte rupestre. En el segundo bloque se atiende al patrimonio en general de las cuevas, pasando por propuestas de habilitación de rutas, itinerarios en cuevas y minas, museos o se promueve que algunas regiones del planeta con un alto valor patrimonial en el subsuelo puedan estar al auspicio de figuras de protección al amparo de la UNESCO. El tercer apartado aborda un tema puntero y dos vertientes pero con un mismo núcleo, la microbiología. Por un lado se presentan avances en técnicas para mejorar la lucha o mitigación contra el mal verde; y por otro lado, el estudio de microorganismos extremófilos en el agua de las cuevas. El cuarto capítulo destaca por desarrollar un tema tan sensible como son las condiciones ambientales en cuevas turísticas, esencialmente, en esa interrelación entre volumen de vistas y alteración de parámetros climáticos de las cuevas como la temperatura, humedad o concentración de CO₂. También acerca al lector al nuevo marco legal europeo en relación a las concentraciones de gas Radón en cuevas habilitadas al turismo. El quinto bloque desarrolla ampliamente nuevos métodos de gestión y desarrollo del turismo subterráneo, en el que se pone de manifiesto que el turismo, la investigación y la innovación deben ir siempre de la mano para conseguir el uso sostenible de las cuevas y que ese aprovechamiento supone un activo económico muy importante, local y regional. El sexto apartado introduce un tema siempre de gran interés, como el estudio de yacimientos arqueológicos en cuevas turísticas, destacando como ejemplo las pinturas rupestres y el arte parietal de las Caves de Sant Josep y otras del entorno de Castellón. Por último, el sexto apartado gestiona una línea puntera y necesaria en el avance de la mejora en la calidad de las vistas a cuevas turísticas. Y lo hace desde la aplicación de nuevos sistemas de iluminación, la vista virtual como una alternativa a la visita convencional, que además abre la puerta a que personas con movilidad reducida puedan disfrutar de estos enclaves. Y, por último, la implementación de sistemas de telecomunicaciones avanzados o marcas de topografía para la exploración de nuevos sistemas endokársticos.

Durante el proceso de revisión de los trabajos que se presentan en este libro, han participado un amplio y generoso equipo de investigadores y técnicos expertos en todos los temas relacionados con el karst y las cuevas turísticas que han colaborado desinteresadamente. Entre todos ellos, representan a más de 30 instituciones públicas, entre universidades, organismos públicos de investigación y privados y otras administraciones. Sin su colaboración y el gran rigor de sus observaciones, no hubiera sido posible obtener un libro con la calidad como el que aquí se presenta, por lo que expresamos publicamente el más profundo agradecimiento de los editores.

Por último, dejar constancia que esta publicación ha sido posible gracias al Ayuntamiento de la Vall d'Uixó.

Pedro A. Robledo Ardila
Juan José Durán Valsero

Editores



**Geomorfología, paleoclima
e hidrogeología kárstica**

A. González Ramón, *et al.*, 2018. Espeleogénesis de las cavidades de la Sierra de Mollina (Málaga, sur de España). Implicaciones hidrogeológicas y geomorfológicas. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 15-28.

Espeleogénesis de las cavidades de la Sierra de Mollina (Málaga, sur de España). Implicaciones hidrogeológicas y geomorfológicas

A. González Ramón⁽¹⁾, A. Pedrera Parias⁽²⁾, S. Martos Rosillo⁽¹⁾, C. Jiménez de Cisneros Vencelá⁽³⁾ y A. Ruíz Constán⁽¹⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. Urb. Alcázar del Genil, 4. Edf. Zulema bajo. 18006 Granada.
antonio.gonzalez@igme.es, a.ruiz@igme.es, s.martos@igme.es

(2) Instituto Geológico y Minero de España. Subdelegación de Gobierno. Pza. de España - Torre Norte 41013 Sevilla.
a.pedrera@igme.es

(3) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-UGR, Avda. de las Palmeras nº4, 18100 Armilla (Granada, España)
concepcion.cisneros@iact.ugr-csic.es

RESUMEN

La Sierra de Mollina se localiza al N de la provincia de Málaga, en la cuenca vertiente a la laguna de Fuente de Piedra. En su ladera sudoriental se conocen varias cavidades asociadas a dolinas de colapso. A partir de datos geológicos y geofísicos, se ha caracterizado la estructura de la sierra, se han analizado los aspectos hidrogeológicos que condicionan la formación de las cavidades y se han estudiado los rasgos exo y endokársticos más sobresalientes. Las dos cavidades más importantes (Cueva de los Órganos y la Sima del Soldado) se desarrollan preferentemente a favor de la estratificación, que en este sector presenta buzamientos superiores a 40°SE. Sus desniveles superan los 100 m y presentan amplias salas con gran desarrollo de espeleotemas vadosos y caos de bloques, consecuencia del colapso gravitacional de algunas zonas. Juegos de diaclasas N-S y NE-SO facilitan la circulación de agua. El principal aspecto que caracteriza estas cavidades es la presencia de abundantes cortezas de yeso recubriendo los carbonatos que constituyen la roca de caja en las zonas profundas. Este rasgo apunta a un proceso de espeleogénesis por ácido sulfúrico, debido a la emisión de gas sulfhídrico (H₂S) procedente de la reducción del sulfato disuelto en el agua subterránea. Estos procesos debieron producirse con el nivel freático ~100 m más elevado que el actual y como consecuencia de la mezcla de aguas de infiltración local y aguas procedentes de materiales triásicos y posiblemente miocenos. El estudio previo de espeleotemas pone de manifiesto también la existencia de termalismo durante el Pleistoceno medio, por lo que en esa edad el proceso espeleogenético podría haber estado activo.

Palabras clave: colapsos kársticos, dolinas, espeleogénesis por ácido sulfúrico, paleotermalismo, yesos.

Speleogenesis of the Sierra de Mollina caves (Málaga, southern Spain). Hydrogeological and geomorphological implications

ABSTRACT

Mollina Range is located in the northern part of the Málaga province, in the endorheic watershed of Fuente de Piedra. In its southeastern slope, some caves associated with collapse dolines are known. Geological and geophysical data allow us to characterize the structure of the range, to analyze the hydrogeological aspects that condition the formation of the caves and to study their most outstanding exo and endokarstic characteristics. The two most important caves (Órganos Cave and Soldado Shaft) are preferably developed along the bedding surfaces, dipping 40°SE in this sector. Both cavities are more than 100 m deep, with spacious chambers and great development of vadose speleothems and chaos of blocks, consequence of the gravitational collapse of some areas. N-S and NE-SW joint sets facilitate water flow. The main aspect

that characterize these caves is the presence of gypsum crusts replacing the carbonates that constitute the host rock in the deepest zones. This evidence points to sulphuric acid speleogenesis due to the emission of H₂S from the reduction of the sulfate dissolved in groundwater. These processes may have occurred with the water table ~100 m higher than nowadays and as a consequence of mixing processes local infiltration waters and groundwater arising from Triassic and possibly Miocene materials. Previous studies of speleothems also reveal the existence of thermalism during the Middle Pleistocene, so at that period the speleogenetic process could have been active.

Keywords: Karstic collapses, doline, sulphuric acid speleogenesis, paleo-thermalism, gypsum.

Introducción

La Sierra de Mollina se localiza al N de la provincia de Málaga y se incluye, en gran parte, en la cuenca endorreica de la Laguna de Fuente de Piedra. Está formada por carbonatos jurásicos y presenta una serie de morfologías kársticas singulares que la hacen diferente al resto de afloramientos jurásicos de la zona (figura 1). Por un lado, las características del exokarst difieren de las que presentan el resto de sierras vecinas con estructuras, litologías y cotas similares. En la Sierra de Mollina aparecen un conjunto de dolinas agrupadas sin un claro control estructural, cuyos diámetros mayores alcanzan los 350 m. Las dolinas se concentran en un sector muy concreto de la sierra, una zona de ruptura de pendiente situada en la ladera suroriental. Además, se relacionan con los afloramientos dolomíticos, en lugar de hacerlo con las calizas que se superponen a techo de estos. En ninguna de las sierras vecinas se observan dolinas similares, a pesar de que algunas de ellas alcanzan cotas superiores, mayor extensión de afloramientos e incluso litologías más favorables (*ej.* Sierra de Estepa; Martos Rosillo, 2008).

El endokarst es aún más singular pues, en primer lugar, hay una concentración de cavidades muy superior a la de las demás sierras del entorno. Se ha citado la existencia de más de 30 cavidades (Wallace y Berrocal, 2002) en un afloramiento de tan solo 8 km². La Federación Andaluza de Espeleología incluye en su catálogo (CATFAE) una veintena de cavidades en esta zona, incluyendo algunos abrigos. En la vecina Sierra de Estepa, ya mencionada, tan solo hay referencias a una cavidad de interés espeleológico detectada mediante técnicas de prospección geofísica (Martínez-Moreno *et al.*, 2015), mientras que en las sierras de Humilladero y de los Caballos no existe ninguna referencia.

Pero la singularidad de mayor interés es la aparición, en dos de las cavidades, de yesos microcristalinos en sus zonas más profundas. Su presencia fue interpretada como consecuencia de la existencia de conductos kársticos o fracturas abiertas que atravesarían toda la formación jurásica y alcanzarían el sustrato arcilloso Triásico, donde los yesos son abundantes (Durán Valsero, 1996; Ferrer Martín, 2003). Sin embargo, tras un estudio más detallado se ha observado que el yeso aparece en forma de costras recubriendo la roca de caja, formada por carbonatos jurásicos, y como bloques y acumulaciones en el suelo, sin que se observen sedimentos triásicos en ninguna de las dos cavidades. La textura de estos yesos y el ambiente en el que aparecen es el característico de espeleogénesis por ácido sulfúrico (EAS) (Egemeier, 1981; Hill, 1987; Galdenzi y Mauoka, 2003; Temovski *et al.*, 2013, entre otros). En España se han descrito yesos de origen similar en las simas de Peñas Blancas, del Puerto y del Pulpo, en la provincia de Murcia (González Ramón *et al.*, 2016; Gazquez *et al.*, 2017).

El objetivo de este trabajo es hacer un estudio preliminar de estas singularidades kársticas, en

relación con la geología e hidrogeología del entorno, y proponer un mecanismo espeleogenético que explique su existencia.

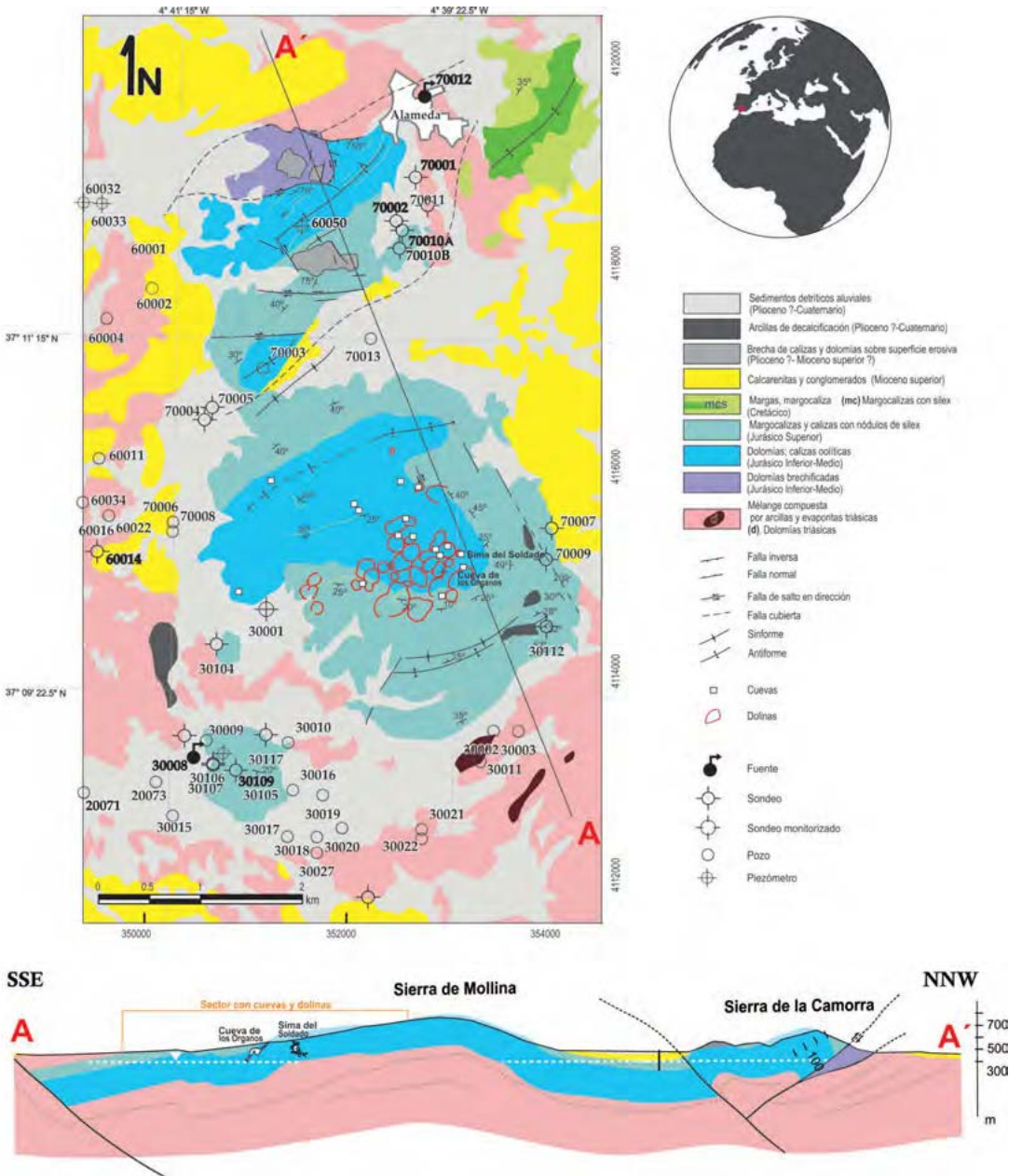


Figura 1. Mapa geológico-hidrogeológico de las sierras de Molina y la Camorra con la situación de dolinas y cavidades. Abajo, corte geológico que ilustra sobre la estructura del acuífero.

Contexto geológico

La Sierra de Mollina se localiza en la Zona Externa de la Cordillera Bética, en su parte occidental. Estas rocas se encuadran en el Dominio Subbético, caracterizado por secuencias pelágicas depositadas en sectores poco subsidentes desde el final del Jurásico inferior, cuando comenzó a desarrollarse el *rifting* intracontinental que fragmentó las plataformas de carbonatos marinos poco profundos (Vera, 2004). De muro a techo se distinguen dos unidades principales, dolomías y brechas dolomíticas del Jurásico inferior, que afloran a la base y constituyen la mayoría de los afloramientos de la sierra, y calizas tableadas con nódulos de sílex del Jurásico medio-superior. Estas unidades carbonatadas tienen una potencia máxima de unos 400 metros y se depositaron sobre arcillas y evaporitas del Triásico con varios kilómetros de potencia.

La Sierra de Mollina, junto con la Sierra de la Camorra, situada inmediatamente al Norte, pertenece a un conjunto de afloramientos aislados de rocas subbéticas jurásicas (ej. Sierra de Humilladero, Sierra de los Caballos y Sierra de Estepa) rodeados por arcillas y evaporitas triásicas que también constituyen su base. Las arcillas y evaporitas tienen tendencia a movilizarse estimulando procesos de tectónica salina en todo este sector. Las secuencias carbonáticas estuvieron presumiblemente unidas durante todo el Jurásico. La presencia de margas del Cretácico inferior sobre rocas plásticas triásicas permite datar el momento en el que los diapiros alcanzaron el lecho marino. Este proceso de movilización de las arcillas y las evaporitas afectó al margen Sudibérico durante las fases de *rift* y *post-rift* pero también durante la inversión de la cuenca mesozoica, con la formación de un prisma de acreción en la parte frontal de la Cordillera Bética durante el Mioceno. Calizas margosas del Mioceno medio y calcarenitas del Mioceno superior se depositaron directamente sobre las sales y arcillas triásicas. Algunos de los diapiros, como el que separa la Sierra de Humilladero de la Sierra de Mollina, avanzaron sobre las secuencias carbonatadas que quedaron parcialmente cubiertas por las rocas triásicas. Las calizas que forman la ladera sur de la Sierra de Mollina, donde se concentran las cavidades objeto del presente estudio, estuvieron por tanto parcialmente confinadas por los materiales arcilloso-evaporíticos.

Contexto hidrogeológico

Las unidades carbonatadas jurásicas que dan lugar a las sierras de Mollina y de la Camorra forman el acuífero del mismo nombre, en el que la superficie de afloramientos carbonatados permeables es de 11,8 km². Está constituido por unos 300-400 m de dolomías y calizas jurásicas, muy permeables, debido a los procesos de fracturación y karstificación que las afectan. La transmisividad determinada mediante ensayos de bombeo está comprendida entre 1.900 y 15.000 m²/día. Recientes trabajos de investigación cartográfica, hidrogeológica y de prospección geofísica señalan la posible conexión geológica e hidrogeológica entre las sierras de Mollina y de la Camorra (Pedrera et al., 2016). Además, en los trabajos citados se ha podido delimitar la extensión lateral de los materiales jurásicos bajo el recubrimiento terciario y de la melange triásica en el entorno de la Sierra, siendo esta más manifiesta en su terminación meridional. En régimen natural, este acuífero presentaba dos puntos principales de drenaje situados a la misma cota (447 m s.n.m.): el manantial de Alameda al N, que descargaba hacia la cuenca del Guadalquivir y el manantial de Santillán al S, que descargaba en el arroyo del mismo nombre, en la cuenca endorreica de la laguna de Fuente de Piedra (Rodríguez-Rodríguez et al., 2016). La recarga media de este acuífero ha sido evaluada en 2,3 hm³/año, resultando unas tasas de recarga próximas a

200 mm/año, coherentes con las del resto de acuíferos carbonáticos de esta región de la Cordillera Bética (Martos-Rosillo *et al.*, 2015). De la recarga media del acuífero, al menos 1,2 hm³/año se descargaban por el manantial de Santillán hacia la laguna de Fuente de Piedra. La intensa explotación a la que se encuentra sometido el acuífero ha provocado la desaparición de los manantiales que lo drenaban, desde los años ochenta del siglo XX. El descenso acumulado del nivel piezométrico en el sector del manantial de Santillán es del orden de 40 m en el periodo comprendido entre 1997 y 2017. El agua explotada en la actualidad proviene de las reservas del sistema, fundamentalmente de la parte confinada en el límite meridional del acuífero, de la capturada de los materiales acuitardos triásicos, que afloran en la base y en los límites laterales del acuífero. El primer sector afectado por un deterioro de la calidad del agua es el situado al NE del acuífero. Los antiguos pozos de abastecimiento a la localidad de Alameda debieron ser abandonados en la década de los noventa del siglo pasado al empezar a explotar aguas muy mineralizadas, con facies clorurada sódica, conductividades eléctricas (CE) del 4 mS/cm y concentraciones de cloruro y de sulfato de 1 g/l y 400 mg/l, respectivamente. El sector S y SE del acuífero presenta un agua de mejor calidad, dado que los sondeos de abastecimiento a la pedanía de Los Carvajales y a Mollina, este último ubicado junto al manantial agotado, presentan aguas con una CE de 323 y 378 S/cm y temperatura de 20,2 y 20,9°C, respectivamente. En el sondeo de Santillán las concentraciones de cloruro, sulfato y nitrato son mayores que las de anteriores analíticas y presentan en la actualidad valores de 63, 75 y 23 mg/l, respectivamente. El agua del acuífero mioceno en los sectores próximos al acuífero de Mollina-La Camorra es sulfatada-clorurada cálcico magnésica, con CE comprendida entre 2 y 4 mS/cm, temperatura del orden de los 20°C y altos contenidos en nitrato.

Características espeleogenéticas de las cavidades

Se dispone de información en 16 cavidades (figura 1), procedente en su mayoría de los trabajos del Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga (Molina-Muñoz *et al.*, 1982; Ferrer-Martín, 2003). En el entorno donde aparecen los grupos de dolinas se encuentran 12 de ellas y en la mitad, las bocas de acceso están en el interior de dolinas con morfologías de hundimiento.

Las entradas a las dos más importantes, la cueva de los Órganos y la Sima del Soldado, están a 140 m de distancia entre sí, en la ladera oriental de la sierra, y en ambas se alcanzan profundidades de más de 100 m. El resto de cavidades son más modestas, si bien en su mayoría se caracterizan por un gran relleno espeleotémico y por la presencia de notables morfologías de colapso.

La aparición de yesos solo se ha registrado en las dos cavidades más profundas, aproximadamente a partir de la cota 580 m. En las zonas que no han sido modificadas por los colapsos se observan morfologías corrosivas de tipo hipogénico (Klimchouk, 2009). Los yesos tienen una textura microcristalina y se encuentran como cortezas de reemplazamiento recubriendo la roca de caja y en bloques y restos aislados en el suelo de las cavidades.

La cueva de los Órganos

El acceso principal a la cavidad es una boca amplia que se abre en el fondo de una dolina alar-

gada en dirección NO-SE de 20x15 m (figura 2 y figura 4a). Tanto la dolina como la boca de acceso a la cavidad parecen adaptarse a las superficies de estratificación, que siguen una dirección NE-SO y un buzamiento de 40° hacia el SE. La entrada es un resalte en el que puede observarse un relleno formado por brechas soportadas por una matriz de *terra rosa* que delata una génesis por hundimiento. En general, toda la cavidad se desarrolla hacia el E, con suelos y techos fuertemente inclinados condicionados por el buzamiento de los estratos. La primera galería, muy espaciosa (figura 4c), está débilmente iluminada por la presencia de una segunda entrada (figura 4b), denominada *el Resolladero*, que alcanza la galería por una zona elevada en su pared derecha. Se continúa hacia el E, donde, tras un resalte, se accede a una sala caracterizada por un gran caos de bloques (figura 4e). Al fondo de la sala y en dirección S se encuentra el paso por donde se llega a la zona principal de la cavidad.

La zona principal se inicia en una repisa formada por una gruesa colada estalagmítica donde un escarpe marca un espectacular colapso del suelo (figura 4f). A partir de esta zona la cueva se desarrolla en una amplia rampa entre grandes bloques. Los yesos se localizan en el fondo de la cavidad en forma de bloques, rellenos y restos de recubrimientos afectados por posterior disolución en la pared frontal (figura 5d). Hacia el N se observa un canal de alimentación (*feeder* según la terminología de Klimchouk, 2009) desde donde se desarrolla una costra yesífera de reemplazamiento que afecta una extensa área de la pared e incluso afecta a bloques de carbonatos encajados (figura 5a y 5b).

La Sima del Soldado

Su entrada es de pequeñas dimensiones y se localiza en una explanada con rellenos de *terra*

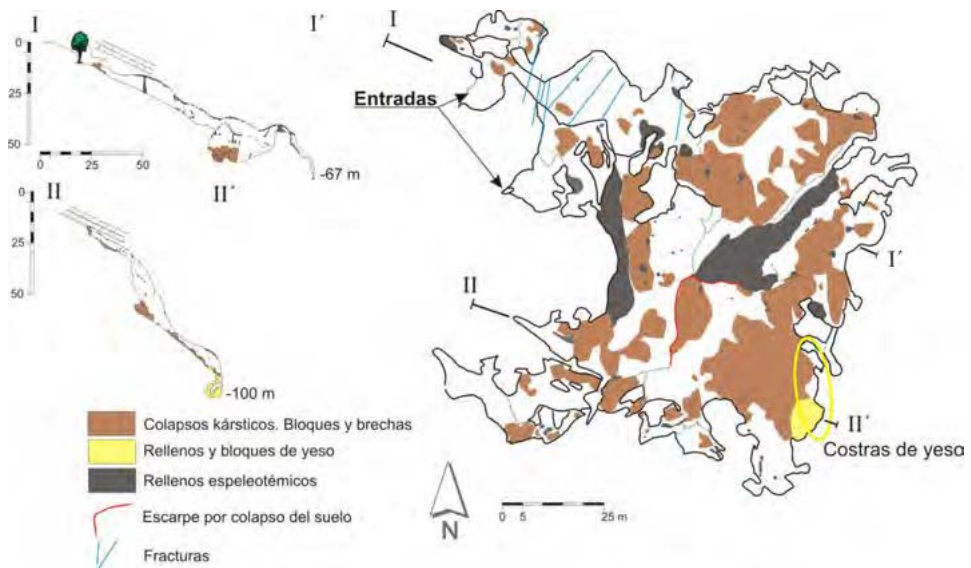


Figura 2. Esquema geológico de la Cueva de los Órganos. Base topográfica del Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga (1981). Archivo de la Federación Andaluza de Espeleología.

rosa recubriendo los carbonatos. Aparece justo en el contacto entre las calizas del Jurásico medio y las dolomías del Jurásico inferior.

Los primeros pozos se abren entre bloques que ponen de manifiesto estructuras de colapso. A unos 60 m de profundidad se encuentra una sala con gran reconstrucción espeleotémica que recubre los bloques consecuencia del colapso de la zona superior de la cavidad (figura 4d). En la base de esta sala se localiza un paso por el que se accede a la parte profunda de la cavidad, la de mayor interés. A partir de los 90 m de desnivel, aproximadamente, empiezan a observarse yesos como costras de reemplazamiento en las paredes (figura 3 y 5c), recubriendo parcialmente los carbonatos, y como acumulaciones de yeso microcristalino en los suelos. En las paredes del P18, situado en la zona más profunda, se observa como los carbonatos han sido reemplazados por yesos conservando aún su textura original (figura 5e). En esta última parte de la cavidad se encuentran morfologías hipogénicas de disolución en las paredes, si bien enmascaradas por la gran reconstrucción litoquímica que decora algunas salas.

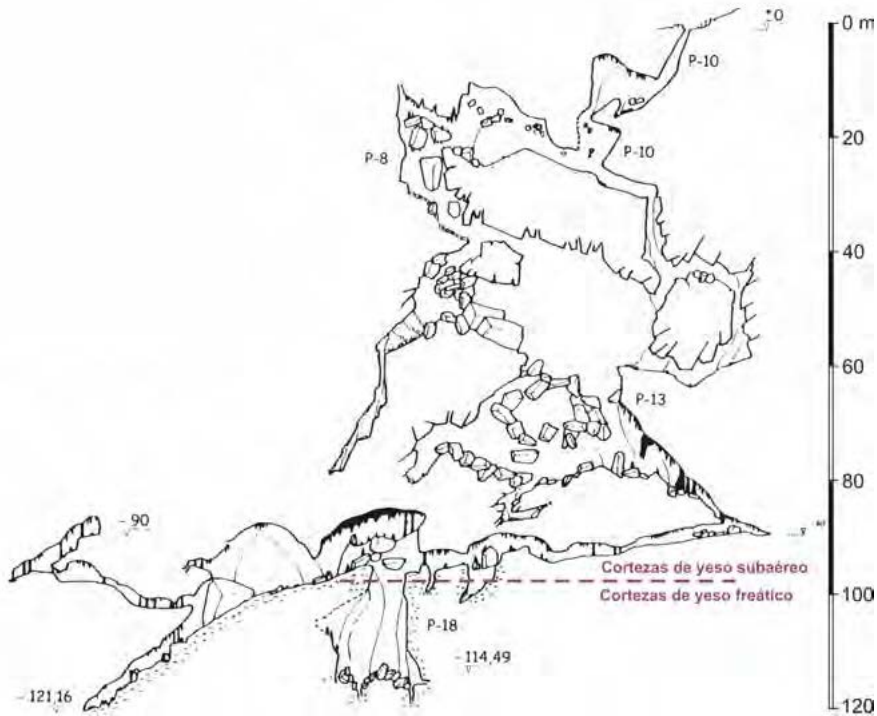


Figura 3. Perfil desarrollado de la Sima del Soldado (modificado de Ferrer Martín, 2003).

Discusión

Las cavidades y las dolinas se concentran en una misma zona y se relacionan, en su mayoría, con la formación dolomitizada de la serie jurásica. La presencia de dolinas por disolución no es

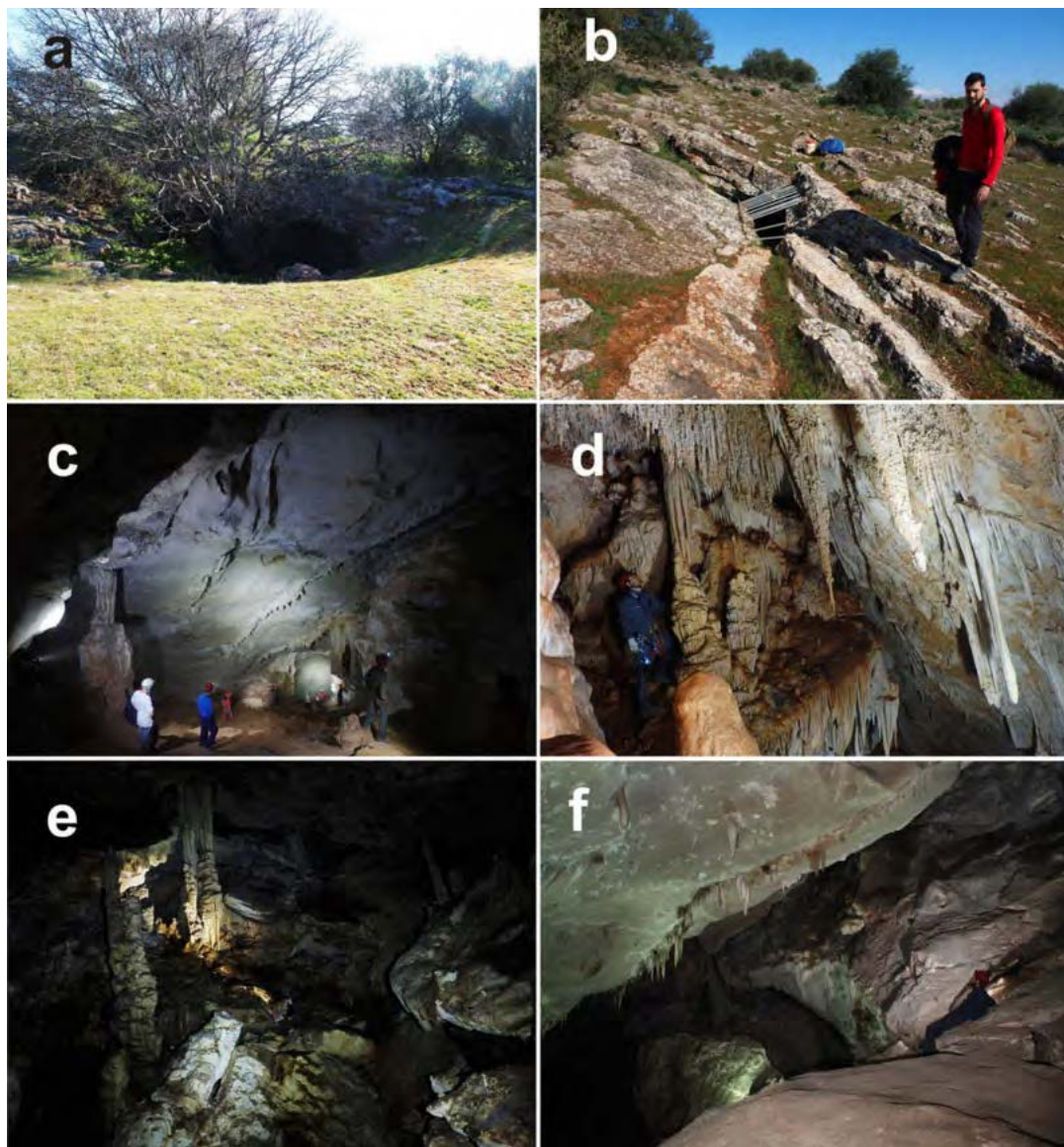


Figura 4. a) Dolina donde se encuentra la entrada a la Cueva de los Órganos. b) El Resolladero, entrada secundaria a la cueva de los Órganos, su boca se abre a favor de las superficies de estratificación. c) Primera galería de la cueva de los Órganos, en el techo se observan cúpulas de disolución y juegos de fracturas N-S y NE-SO. d) Sima del Soldado, zona media, formaciones espeleotémicas recubriendo caos de bloques. e) Cueva de los Órganos, primera sala con morfologías de colapso que afectan a las formaciones espeleotémicas más antiguas. f) Repisa que muestra un colapso del suelo que afecta a coladas estalagmíticas en la Cueva de los Órganos.

normal en rocas dolomíticas, pues la dolomita se disuelve con mayor dificultad que la calcita. Las concentraciones de dolinas en la Cordillera Bética están relacionadas, por lo general, con calizas situadas en zonas de elevada altitud y pluviometría, normalmente por encima de 1.200 m

s.n.m. (Sierras de Grazalema, de las Nieves, Gorda, Arana, Mágina o del Segura, por citar las más importantes del S de España). La aparición de dolinas en dolomías, en situaciones climáticas y cotas similares a las de la zona de estudio, es mucho menos frecuente (Alonso Otero, 1998). Las morfologías de las dolinas de la Sierra de Mollina responden por lo general a estructuras de

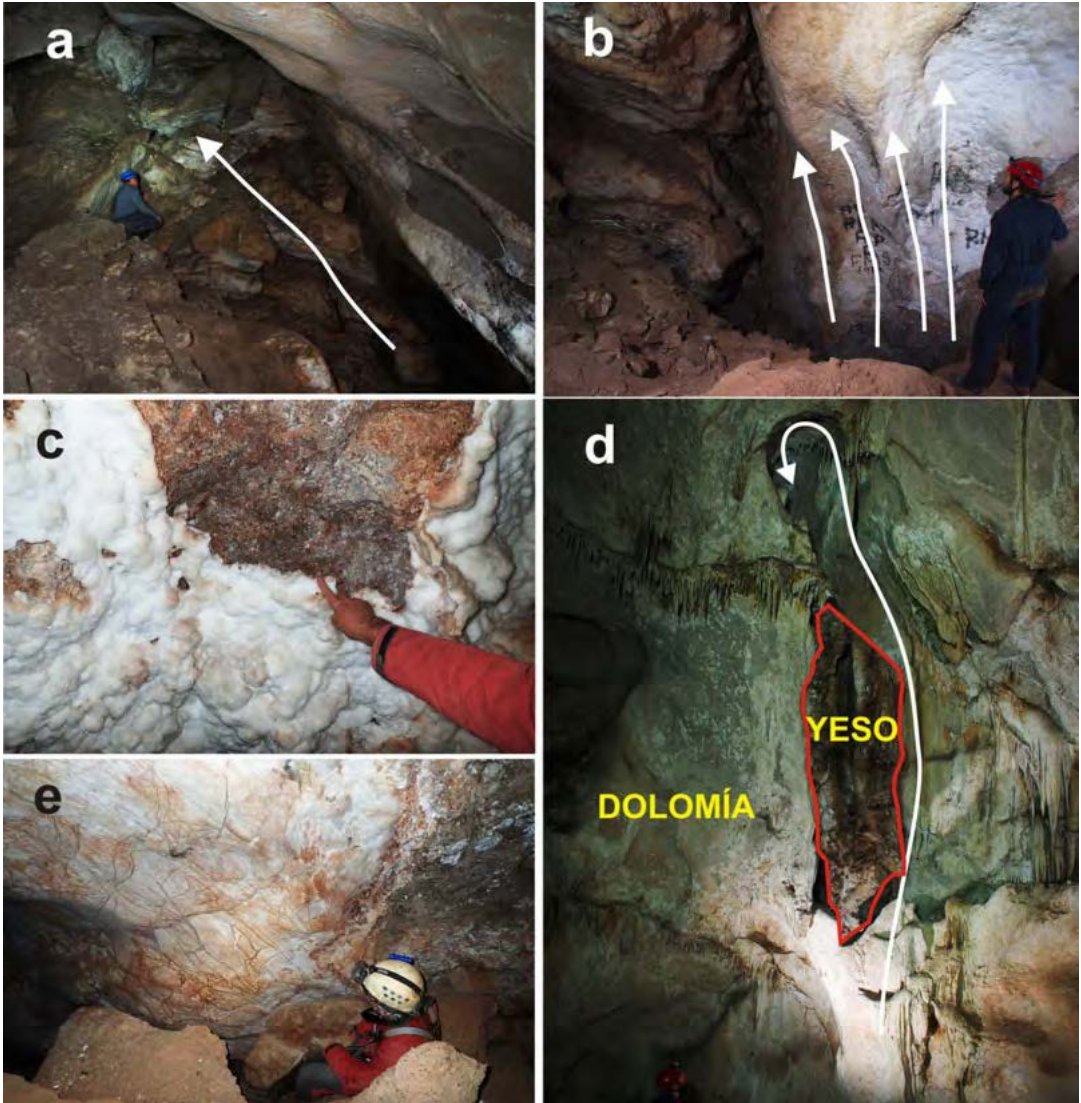


Figura 5. a) cueva de los Órganos. Cortezas de reemplazamiento de yeso formadas por condensación-corrosión a partir de emanaciones de H_2S procedentes del canal de alimentación (feeder) que se observa en la foto. b) El reemplazamiento afecta a la pared derecha y a los bloques que rellenan la cavidad. c) Cortezas de reemplazamiento generadas en medio subaéreo en la Sima del Soldado. d) Canal y cúpula formada por condensación-corrosión a partir de emanaciones de H_2S ; conserva aún restos de yesos de reemplazamiento afectados por disolución a partir de agua de infiltración autogénica. e) Cortezas de reemplazamiento de yeso formadas bajo nivel freático donde se observa la textura original del carbonato en la sima del Soldado.

colapso, asociadas muchas de ellas a cavidades. Las estructuras de colapso, como ya se ha descrito, están en todas las cavidades conocidas en la sierra y ambos rasgos, cavidades y dolinas, aparecen íntimamente ligados. La explicación más lógica para la génesis de este grupo de dolinas es, por tanto, una sucesión de colapsos de cavidades previamente generadas bajo su superficie, de las que actualmente solo algunas son penetrables.

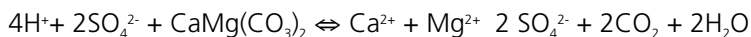
Las observaciones realizadas en la cueva de los Órganos y la Sima del Soldado ponen de manifiesto que en la zona han existido procesos de EAS. Estos procesos se producen cuando aguas ricas en H₂S ascienden desde zonas profundas y se acercan a la capa freática donde el H₂S reacciona con el oxígeno para producir ácido sulfúrico, el principal agente formador del cavernamiento (Palmer y Palmer, 2000; entre otros).

La disolución de los carbonatos en este tipo de procesos es rápida y el ataque ocurre tanto si se trata de calizas como de dolomías. Según Palmer y Palmer (2000), los mayores volúmenes de cavernamiento se producen en la zona saturada, en las áreas donde emerge el H₂S y cerca del nivel freático, donde la oxidación del gas es más rápida. En estas condiciones, volumen por volumen de reemplazamiento de calcita (o dolomita) por yeso puede producirse con un pH moderado preservando la textura original de la roca de caja.

Cuando el pH es menor de 6,4 el reemplazamiento tiene lugar sobre base molar, con un aumento aproximadamente del doble de volumen, formando costras deformadas donde la textura original desaparece y se despegan fácilmente de la pared. Sin embargo, Palmer y Palmer (2000) indican que pHs más bajos son muy raros pues el incremento de acidez es compensado por una mayor disolución de los carbonatos.

La karstificación también se produce en medio subaéreo: la condensación del agua en las paredes de las cavidades que incorporan gas sulfhídrico procedente de la zona freática genera igualmente ácido sulfúrico, que ataca al carbonato provocando la sustitución de calcita o de dolomita por yeso, con la consiguiente generación de costras de yeso (Audra et al., 2007). En este caso el reemplazamiento se produce con un incremento de volumen y las costras están deformadas, desaparece la textura original y se despegan fácilmente de la pared. La progresiva caída de las costras al suelo produce acumulaciones de yeso microcristalino que pueden quedar preservadas en zonas donde el agua de infiltración autogénica no las disuelve de nuevo.

El proceso en dolomías es el siguiente:



Para la aparición de gas sulfhídrico son necesarias condiciones anóxicas con presencia de materia orgánica y sulfato disuelto en el agua, también la oxidación de pirita en la roca de caja puede generar estas condiciones, aunque no hay evidencias de su presencia. El sulfato pudo tener su origen en las evaporitas que conforman el sustrato triásico, sin embargo, no hay materia orgánica en esta formación. La materia orgánica pudo proceder de aguas previamente infiltradas en los materiales detríticos marinos miocenos que se depositaron en los bordes del afloramiento de carbonatos y que, sobre todo en la ladera oriental, se superponen a ellos (figura 6). La entrada

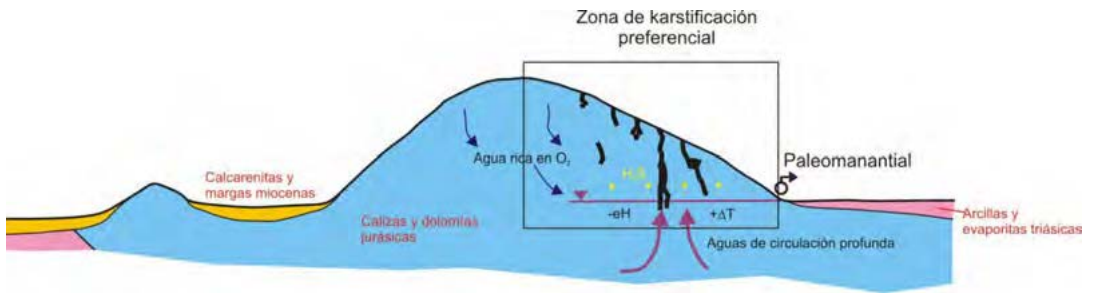


Figura 6. Esquema idealizado de los patrones de flujo que han podido dar lugar a la karstificación por EAS en la Sierra de Mollina. Explicación en el texto.

de aguas miocenas también pudo producirse en el pequeño afloramiento situado al N, pues los datos geofísicos, geológicos e hidrogeológicos han demostrado la conexión hidrogeológica entre ambos (Pedrera *et al.*, 2016).

Actualmente, el nivel de base en la zona está impuesto por la laguna de Fuente de Piedra, pero, previo a la formación de la laguna o en una fase incipiente, la descarga del acuífero jurásico y de parte de los sedimentos miocenos pudo producirse en las laderas de la Sierra de Mollina, a una cota más elevada. En las sierras vecinas de Mingo, Hacho, Pleites y en la de Humilladero se ha detectado la influencia, en el acuífero jurásico, de aguas infiltradas en el acuífero mioceno, provocada por la intensa explotación del agua subterránea (Martos-Rosillo y Moral, 2015; Martos-Rosillo *et al.*, 2017) por lo que la transferencia de aguas entre las formaciones permeables jurásicas y miocenas es posible. Por otra parte, los materiales miocenos también podrían haber aportado sulfato.

En la zona más profunda de la Sima del Soldado se observan yesos de reemplazamiento donde se preserva la textura original de la roca de caja (figura 3 y 5e). Según Palmer y Palmer (2000) se habrían formado bajo el nivel saturado con un pH moderado y cerca de la superficie freática. Sin embargo, a mayor cota tanto en la Cueva de los Órganos como en la Sima del Soldado aparecen cortezas de reemplazamiento características de zonas subaéreas (figuras 5a, b, c y d). La superficie del nivel freático en condiciones naturales, se situaría actualmente a cota en torno a 450 m condicionada por la situación de los puntos de descarga natural, el manantial de Santillán y el manantial de Alameda (figura 1). La cota piezométrica a final de 2017 era de 410 m debido a la intensa explotación que soporta el acuífero.

La información suministrada por los yesos en la Sima del Soldado indica una fase de cavernamiento con el nivel freático situado en torno a la cota 565 m. La situación del paleo-manantial a esa cota, en la ladera suroccidental de la Sierra de la Camorra, explicaría que la karstificación hubiese progresado intensamente en esa zona, con una importante generación de huecos que provocarían posteriormente colapsos, favorecidos por la gran fracturación que se observa en la formación dolomítica (Martín Serrano, 1986a y b). Estos colapsos se encuentran en las cavidades, pero también serían la causa de la existencia de numerosas dolinas concentradas precisamente en esta área.

En la Cueva de los Órganos y también en la Sima del Soldado se observan colapsos que han afectado a los gruesos conjuntos de espeleotemas vadosos que son muy abundantes en todas las cavidades de la Sierra de Mollina (figuras 4d y f). En la primera cavidad se dató una gran estalagmita (Jiménez de Cisneros *et al.*, 2015) con una edad entre 340-370 ka. No se han estudiado a fondo estas reconstrucciones y posiblemente existen superpuestas varias generaciones de espeleotemas vadosos. En todo caso esta datación muestra la posibilidad de que los últimos colapsos importantes pudiesen haberse producido durante el Pleistoceno medio.

A partir de la curva de variación del $\delta^{18}\text{O}$ obtenida en la estalagmita (Jiménez de Cisneros *et al.*, 2015) se deduce que en el periodo de su crecimiento la temperatura del aire en la cavidad estaba en torno a 18°C con variaciones entre 15 y 21°C. En la actualidad la temperatura en la cueva es de 15°C (Menjíbar Silva y Quirós Sánchez, 1976). El periodo registrado se corresponde al estadio isotópico marino 10, en la etapa más fría de este periodo glacial, donde las temperaturas del agua del mar en el Atlántico norte eran del orden de 10°C inferiores a las actuales (MacManus *et al.*, 1999). Estos datos indican condiciones termales (aunque de baja temperatura) en la cueva durante ese periodo, lo que sugiere que la EAS se encontraba aún activa y el nivel piezométrico notablemente más elevado que en la actualidad. De esto último puede deducirse que el nivel de base actual en la zona (condicionado por la laguna de Fuente de Piedra), podría aún no haberse establecido.

Finalmente, la mezcla de aguas dulces de infiltración local con aguas con mayor salinidad recargadas en el acuífero mioceno o que han adquirido salinidad por su contacto con evaporitas triásicas ha podido ser otro mecanismo espeleogenético que incrementó aún más la karstificación. Este mecanismo podría coincidir con el que ha dado lugar a dos grandes dolinas de colapso en la Sierra de Pleites (Martos-Rosillo, 2008, Martínez-Moreno *et al.*, 2013).

Posiblemente el progresivo hundimiento de la cubeta donde se encuentra la Laguna de Fuente de Piedra, que constituye actualmente el nivel de base del sistema, habría modificado el esquema hidrogeológico de la Sierra de Mollina con el cambio de posición del manantial, descenso del nivel freático y cambios también en la relación entre los carbonatos jurásicos y el acuífero detrítico mioceno, lo que habría provocado el cese de los mecanismos espeleogenéticos descritos. Esto, según indica la información que aporta la curva paleoclimática de la estalagmita de la cueva de los Órganos, habría ocurrido en un periodo posterior a los 340 ka.

Conclusiones

La Sierra de Mollina presenta unos rasgos exo y endokársticos notables que la diferencian del resto de sierras situadas en la zona. La presencia de numerosas dolinas asociadas a cavidades es algo excepcional que solo ocurre en este afloramiento jurásico y, además, tanto las dolinas como las cavidades se concentran especialmente en una zona concreta del afloramiento, la parte suoriental.

En las dos cavidades más profundas se ha reconocido la existencia de yesos que ponen de manifiesto un cavernamiento ocasionado por EAS. Este proceso pudo haberse producido con el nivel freático unos 100 m por encima de su posición actual (en condiciones no influenciadas por

bombeos) lo que puede deducirse por la presencia de yesos de reemplazamiento en la Sima del Soldado, generados en condiciones freáticas. La pale-posición del nivel freático pudo estar condicionada por la presencia de recubrimientos de materiales triásicos sobre los carbonatos en el borde sur del afloramiento, que posteriormente fueron erosionados.

El mecanismo de cavernamiento que se propone sería ocasionado por la presencia en el agua subterránea de sulfatos procedentes de los materiales triásicos, materia orgánica procedente de aguas previamente infiltradas en materiales marinos miocenos suprayacentes y adosados al acuífero jurásico en otras zonas, y aguas ascendentes con condiciones termales.

El avance del cavernamiento sería el causante de la aparición de dolinas de colapso en superficie. A partir de curvas paleoclimáticas estudiadas en una estalagmita procedente de la Cueva de los Órganos se deduce la existencia de termalismo durante el Pleistoceno medio, por lo que, en esta edad, el nivel de base actual constituido por la laguna de Fuente de Piedra no estaría aún establecido. El hundimiento progresivo del terreno en la zona de la laguna y la erosión en los bordes del acuífero provocaron el descenso del nivel freático hasta su posición actual, con cambios en las relaciones entre las formaciones acuíferas, lo que ocasionó el fin de los procesos de EAS.

Agradecimientos

Este trabajo es una contribución al proyecto CGL 2015-65858-R (Ministerio de Economía, Industria y Competitividad). Agradecemos a Manuel González Ríos y a Rogelio Ferrer la información aportada sobre las cavidades de la Sierra de Mollina y a Fernando Gázquez por la revisión del trabajo.

Referencias

- Alonso Otero, F. 1998. Historia y desarrollo de las investigaciones sobre el modelado kárstico en Andalucía. *Karst en Andalucía*. En Durán, J. J. y López Martínez, J. (Eds.), Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid. 21-29.
- Audra, Ph., Hoblea, F., Bigot, J.Y. y Nobécourt, J.C., 2007. The role of condensation in thermal speleogenesis: Study of a hypogenic sulfidic cave in Aix-les-Bains, France. *Acta Carsologica* 36, 185-194.
- Durán Valsero, J.J. 1996. *Los sistemas kársticos de la provincia de Málaga. Contribución al conocimiento paleoclimático del Cuaternario en el Mediterráneo occidental*. Tesis doctoral. Dep. de Geodinámica. Fac. de Ciencias Geológicas. Univ. Complutense de Madrid.
- Egemeier, S.J., 1981. Cavern development by thermal waters. *NSS Bull.* 43, 31-51.
- Ferrer Martín, R. 2003. Sima del Soldado o de la Capuchina (MN-31) Sierra de la Camorra (Mollina, Málaga). GES de la SEM. Málaga. *Rev. Monografías Espeleológicas*, 5, 51-54.
- Galdenzi S. y Maruoka T. 2003. Gypsum deposits in the Frasassi Caves, central Italy. *Journal of Cave and Karst Studies* 65(2), 111-125.
- Gázquez, F., Calaforra, J. M., Rull, F., Rodríguez-Estrella, R., Ros, A., Llamusi, J. L., y Sánchez, J. 2016. Evidence for regional hypogenic mechanisms in caves of the Murcia Region (SE Spain). In: Klimchouk, A., Palmer, A., de Waele J., Auler, A. y Audra Ph. (Eds). *Selected Hypogene Karst Regions and Caves of the World*. 85-99.
- González Ramón, A. Fernández Leiva, C., Segura Herrero, A., Sánchez Díaz, T., Ignatenko, A., García Benzal, V., Pérez Martínez, P., Gea López D.R., Llamas Sánchez, J. y Quesada, I. 2016. Espeleogénesis por ácido

- sulfúrico en el SE de España. Caracterización preliminar de la sima de Peñas Blancas (Lorca-Murcia). En: Andreo B. y Durán J.J. (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, 267-282.
- Hill, C.A. 1987. *Geology of Carlsbad cavern and other caves in the Guadalupe Mountains, New Mexico and Texas*. New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, 117, 150.
- Jiménez de Cisneros, C., Caballero, E., Andreo B. y Durán J.J. 2015. Climate variability during the middle-late Pleistocene based on stalagmite from Órganos Cave (Sierra de Camorra, Southern Spain). B. Andreo et al. (Eds.), *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems, Environmental Earth Sciences* 1, 559-567.
- Klimchouk, A. 2009. Morphogenesis of hypogenic caves. *Geomorphology*, 106 (1), 100-117.
- McManus, J.F., Oppo, D. W. y Cullen, J.L. 1999. A 0.5-million-year record of millennial-scale climate variability in the North Atlantic. *Science*, 283(5404), 971-975.
- Martín Serrano, A. 1986a. *Memoria del Mapa Hidrogeológico de España, E 1:50.000. Hoja 1006 Benamejí*.
- Martín Serrano, A. 1986b. *Memoria del Mapa Hidrogeológico de España, E 1:50.000. Hoja 1023 Antequera*.
- Martínez-Moreno, F.J., Pedrera, A., Ruano, P., Galindo-Zaldívar, J., Martos-Rosillo, S., González-Castillo, L., Sánchez-Úbeda, J.P. y Marín-Lechado, C. 2013. Combined microgravity, electrical resistivity tomography and induced polarization to detect deeply buried caves: Algaidilla cave (Southern Spain). *Engineering Geology*, 162, 67-78.
- Martos Rosillo, S. 2008. *Investigación hidrogeológica orientada a la gestión racional de acuíferos carbonáticos sometidos a un uso intensivo del agua subterránea. El caso de la Sierra de Estepa (Sevilla)*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- Martos-Rosillo, S., González-Ramón, A., Gustavo-Heredia, J., Pedrera, A. y Rodríguez-Rodríguez, M., 2017. Cambios en la calidad del agua subterránea debidos a la explotación intensiva del acuífero carbonático de la Sierra de Humilladero (Málaga, España). *Geogaceta*, 62, 91-94.
- Martos-Rosillo, S., González-Ramón, A., Jiménez-Gavilán, P., Andreo, B., Durán, J.J. y Mancera, E. 2015. Review on groundwater recharge in carbonate aquifers from SW Mediterranean (Betic Cordillera, S. Spain). *Environmental Earth Science*, 74 (12), 7571-7581.
- Martos-Rosillo, S. y Moral, F. 2015. Hydrochemical changes due to intensive use of groundwater in the carbonate aquifers of Sierra de Estepa (Seville, Southern Spain). *Journal of Hydrology*, 528, 249-263.
- Menjíbar Silva, J.L. y Quirós Sánchez, R. 1976. Cueva de los Órganos. *Revista de la Diputación Provincial de Málaga. Jábea*, 16, 7-12.
- Molina Muñoz, J.A., Corcelles Santiago, J., Durán Valsero, J.J. 1982. El complejo kárstico de la Sierra de la Camorra. *Sociedad Excursionista de Málaga, 75 aniversario 1906-1981*, 77-88.
- Palmer, A. N. y Palmer, M. V. 2000. Hydrochemical interpretation of cave patterns in the Guadalupe Mountains, New Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 62(2), 91-108.
- Pedrera, A., Martos-Rosillo, S., Galindo-Zaldívar, J., Rodríguez-Rodríguez, M., Benavente, J., Martín-Rodríguez, J.F.L. y Zúñiga-López, M. I. 2016. Unravelling aquifer-wetland interaction using CSAMT and gravity methods: the Mollina-Camorra aquifer and the Fuente de Piedra playa-lake, southern Spain. *Journal of Applied Geophysics*, 129, 17-27.
- Rodríguez-Rodríguez, M., Martos-Rosillo, S. y Pedrera, A. 2016. Hydrogeological behaviour of the Fuente de Piedra playa lake and tectonic origin of its basin (Málaga, southern Spain). *Journal of Hydrology*, 543, 462, 476.
- Temovski, M., Audra, P., Mihevc, A., Spangenberg, J.E., Polyak, V., McIntosh, W. y Bigot, J.Y. 2013. Hypogenic origin of Provalata Cave, Republic of Macedonia: a distinct case of successive thermal carbonic and sulfuric acid speleogenesis. *International Journal of Speleology*, 42(3), 7.
- Vera, J. A. (Ed.). 2004. *Geología de España*. IGME.
- Wallace Moreno, L. y Berrocal Pérez, J.A. 2002. *Guía de las cuevas de Málaga*. Biblioteca popular malagueña nº 90. Centro de Ediciones de la Diputación Provincial de Málaga.

C. Jiménez de Cisneros Vencelá, *et al.*, 2018. Dinámica espeleotémica actual en la Cueva de Nerja (Málaga, España). En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 29-42.

Dinámica espeleotémica actual en la cueva de Nerja (Málaga, España)

C. Jiménez de Cisneros Vencelá⁽¹⁾, C. Liñán Baena^(2,3), A. Peña Heras⁽¹⁾ y E. Caballero Mesa⁽¹⁾

(1) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR), Avda. de las Palmeras 4, 18100 Armilla (Granada).
concepcion.cisneros@iact-ugr.csic.es, aranchaph@iact-ugr.csic.es, emilia.caballero@iact-ugr.csic.es

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

(3) Departamento de Ecología y Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga. Campus de Teatinos s/n, 29071 Málaga.

RESUMEN

La monitorización o el seguimiento instrumental de las cavidades, es fundamental para entender el sistema kárstico y poder evaluar cómo ocurre hoy en día la transferencia de la señal isotópica desde el agua de lluvia hasta el carbonato precipitado en los espeleotemas de las cuevas. En la cueva de Nerja (Málaga, España) se ha diseñado un plan de seguimiento, para establecer relaciones entre la composición isotópica del agua de lluvia, la del agua de goteo y la del carbonato precipitado en la actualidad. Para ello se han programado experimentos de precipitación "in situ" mediante soportes artificiales en áreas estratégicas de la cavidad, combinados con un seguimiento instrumental de variables ambientales (temperatura, humedad relativa y CO₂ del aire). La medida de estas variables, junto con los datos isotópicos, permitirá establecer la dinámica de crecimiento de los espeleotemas actuales, y al mismo tiempo evaluar qué fases cristalinas y texturas son las predominantes.

Palabras clave: aguas, espeleotemas, hábitos cristalinos, isótopos estables, precipitación.

Current speleothem dynamics in the Nerja cave (Málaga, Spain)

ABSTRACT

The monitoring of caves is essential to understand the karstic system and to evaluate how occurs the transfer of the isotopic signal from rainwater to the carbonate currently precipitated in the speleothems of the caves. A monitoring plan has been designed in Nerja cave (Málaga, Spain) to establish relationships among the isotopic composition of rainwater, drip water and current carbonate precipitated. To do so, "in situ" precipitation experiments have been programmed using artificial supports placed in strategic areas of the cave, combined with a monitoring of environmental variables (temperature, humidity and CO₂ of the air). The measurement of these variables together with the isotopic data will allow establishing the growth dynamics of the current speleothems and evaluating at the same time which are the prevailing textures and crystal fabrics.

Keywords: crystal fabrics, precipitations, speleothems, stable isotopes, waters.

Introducción

El agua que se infiltra en el suelo y atraviesa el epikarst acaba en el interior de los conductos kársticos en forma de goteos, más o menos saturados en carbonato, que pueden dar lugar a la formación de espeleotemas. Los factores que controlan la tasa de crecimiento de los espeleote-

mas, así como la naturaleza de su estructura interna y su composición química, responden fundamentalmente, a cambios en el clima. El contenido de isótopos de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) en los espeleotemas es un indicador muy útil para reconstruir cambios en la dinámica climática puesto que la composición isotópica del espeleotema depende de la temperatura de la cueva y de la composición isotópica del agua de goteo.

La temperatura del ambiente exterior es el factor principal que controla la variabilidad de los valores isotópicos del carbonato que precipita actualmente en las cuevas. Pero también variaciones en la precipitación, vegetación y en la actividad biológica del suelo situado sobre la cueva originan variaciones en la composición isotópica que pueden ser, a su vez, reflejo de los cambios climáticos (Bar-Matthews *et al.*, 1997; Hellstrom *et al.*, 1998).

Dependiendo de las condiciones fisicoquímicas del sistema (temperatura, presión, pH o determinados aditivos), una misma sustancia química (carbonato cálcico) puede cristalizar con diferentes estructuras y dar lugar por tanto a diferentes fases cristalinas (polimorfismo). En concreto, el carbonato cálcico al cristalizar puede adoptar seis estructuras diferentes: calcita, aragonito, vaterita, monohidrocalcita ($\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$), $\text{CaCO}_3\text{-6H}_2\text{O}$ y $\text{CaCO}_3\text{-amorfo}$ (Morse y Mackenzie, 1990). De todas estas, la calcita y el aragonito son los polimorfos termodinámicamente más estables y más frecuentes en el ámbito subterráneo kárstico. Por otra parte, la orientación preferencial de los cristales es el resultado de un proceso de crecimiento. Debido a que los cristales crecen simultáneamente y compiten con los adyacentes por el espacio disponible, el crecimiento está restringido lateralmente y los cristales crecen solo hacia arriba, desarrollándose una estructura columnar (Morse y Casey, 1988).

La formación de cristales se lleva a cabo en dos etapas: la nucleación y el crecimiento cristalino. Durante la primera etapa aparecen cuerpos sólidos diminutos (núcleos o semillas) que servirán como gérmenes para la formación del futuro cristal. En la segunda etapa, una vez que se ha formado un núcleo estable, este comienza a crecer a medida que incorpora unidades de crecimiento, adquiriendo un tamaño observable. Para que el proceso de cristalización tenga lugar se requiere una cierta sobresaturación en la disolución la cual se alcanza mediante diferentes mecanismos: por evaporación del disolvente, por variación de la temperatura, por desgasificación del agua o por cambios del pH (Jiménez-López *et al.*, 2001).

La monitorización de los parámetros ambientales (temperatura, humedad relativa y CO_2 del aire, tasa y variaciones químicas e isotópicas del agua de goteo, etc.) es imprescindible para conocer los factores que controlan el desarrollo de los diferentes cristales. Las diversas fábricas o texturas de cada lámina en un espeleotema están relacionadas con los mecanismos de crecimiento y con la disponibilidad y composición química e isotópica de las aguas kársticas y, por tanto, con la dinámica ambiental imperante en la cavidad. El análisis de las texturas y tipologías de los espeleotemas y su composición mineralógica puede dar una idea general de la espeleogénesis reciente, constituyendo un análogo natural actual de los espeleotemas antiguos.

El objetivo principal del estudio ha sido establecer la dinámica de crecimiento de los espeleotemas actuales, a partir del seguimiento instrumental de los factores ambientales de la cueva y de la señal isotópica del agua de goteo y de los precipitados.

Localización geográfica y geológica

La cueva de Nerja se encuentra ubicada en el extremo suroriental de la provincia de Málaga (España), a 3 km al Este de la ciudad de Nerja, junto a la localidad de Maro. La región está situada en la Zona Interna de la Cordillera Bética. En ella afloran materiales metamórficos pertenecientes al Complejo Alpujárride y sedimentos detríticos postorogénicos continentales y marinos (Avidad y García Dueñas, 1980; Elorza y García Dueñas, 1980). Concretamente, está situada en la estribación meridional de la Sierra Almijara, que pertenece al Parque Natural de las Sierras Tejeda-Almijara-Alhama, en los mármoles dolomíticos alpujárrides (Trías medio) del manto de Almijara (Sanz de Galdeano, 1986 y 1990; Andreo *et al.*, 1993), y presenta un desarrollo topográfico de casi 5 km (SEM, 1985), una superficie de 35.000 m² y un volumen de aproximadamente 350.000 m³.

Metodología

En cada una de las principales salas de la cueva de Nerja se seleccionaron áreas estratégicas (figura 1) donde se situaron dispositivos artificiales (Placas de Petri de plástico) al objeto de recoger la precipitación carbonatada actual (figura 2).

En total se ubicaron 12 dispositivos localizados en las Galerías Turísticas (salas expuestas al público: sala de Vestíbulo en el sector del Oso NP-OSO, sala Belén NP-BE, sala Cascada con dos dispositivos NP-CAS1 y NP-CAS2, y sala Cataclismo con dos dispositivos NP-CAT1 y NP-CAT2) y en las Galerías Altas y Nuevas (salas no expuestas al público: sala Columnas de Hércules NP-HE, en las Galerías Altas y Nueva Montaña NP-MO).

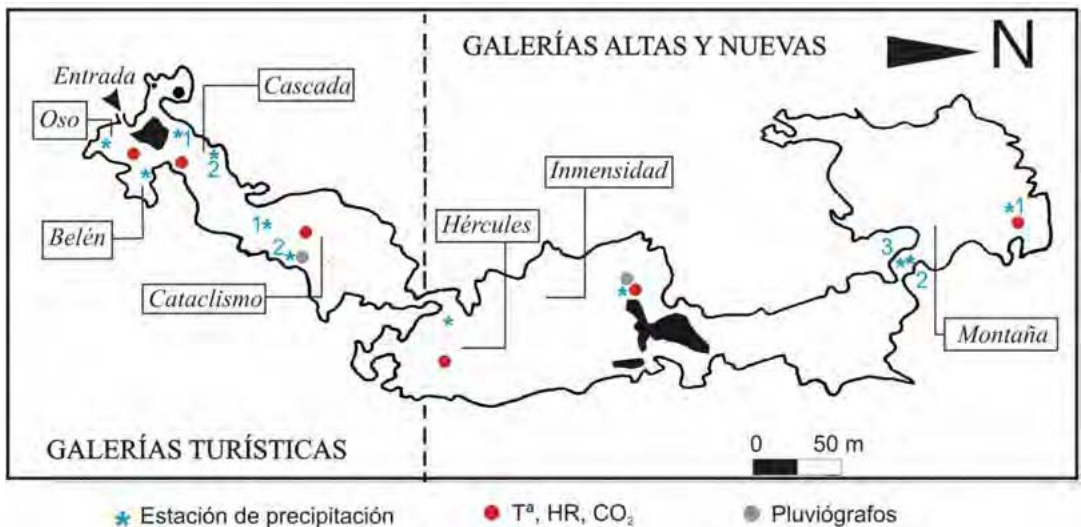


Figura 1. Mapa de situación de las estaciones de precipitación (NP) controlada de carbonatos y de los equipos de monitorización ambiental en la Cueva de Nerja. Leyenda: Tª- temperatura del aire, HR- humedad relativa del aire y CO₂- concentración de CO₂ en el aire. Los números hacen referencia a las distintas estaciones de precipitado, cuando en la sala existe más de un dispositivo.

sala Inmensidad NP-INM y sala Montaña con tres dispositivos NP-MO1, NP-MO2 y NP-MO3). En las tres primeras salas (Oso, Belén y Cascada), el agua de goteo procede de la infiltración de las precipitaciones, pero también del agua de riego de los jardines situados sobre ellas. En el resto de la cavidad, el agua de goteo tiene, exclusivamente, origen meteórico. Por último, se instaló un dispositivo bajo uno de los principales puntos de goteo de una pequeña cavidad próxima a la cueva de Nerja, denominada cueva Pintada (NP-CP).

Tras cierto tiempo de exposición al agua de goteo (desde finales de marzo a principios de diciembre), los precipitados fueron retirados para su análisis mineralógico, isotópico y observación microscópica. Se identificaron las especies minerales por difracción de Rayos X (Panalytical X-Pert Prodiffractometer) con radiación Cu K α (45 kV, 40 mA), usando el software XPOWDER®. El análisis isotópico se ha realizado usando espectrometría de masas (Delta Plus XL Finnigan Mat). En el Centro de Instrumentación Científica (Universidad de Granada) se llevaron a cabo los análisis de microscopía de HRSEM (AURIGA de Carl Zeiss SMT).

En paralelo, se han registrado con periodicidad horaria las principales variables ambientales en la Cueva de Nerja, como son la temperatura, la humedad relativa, la concentración de CO₂ del aire (Liñán *et al.*, 2018) y el caudal de goteo. Este último parámetro se mide, en continuo, en dos puntos muy próximos a los goteros de control ubicados en las salas de Cataclismo e Inmensidad (figura 1), mediante pluviómetros de cazoletas (modelo 52203, Campbell Scientific) conectados a sendos *data-logger* (modelos CR800 y CR1000, Campbell Scientific). En el exterior

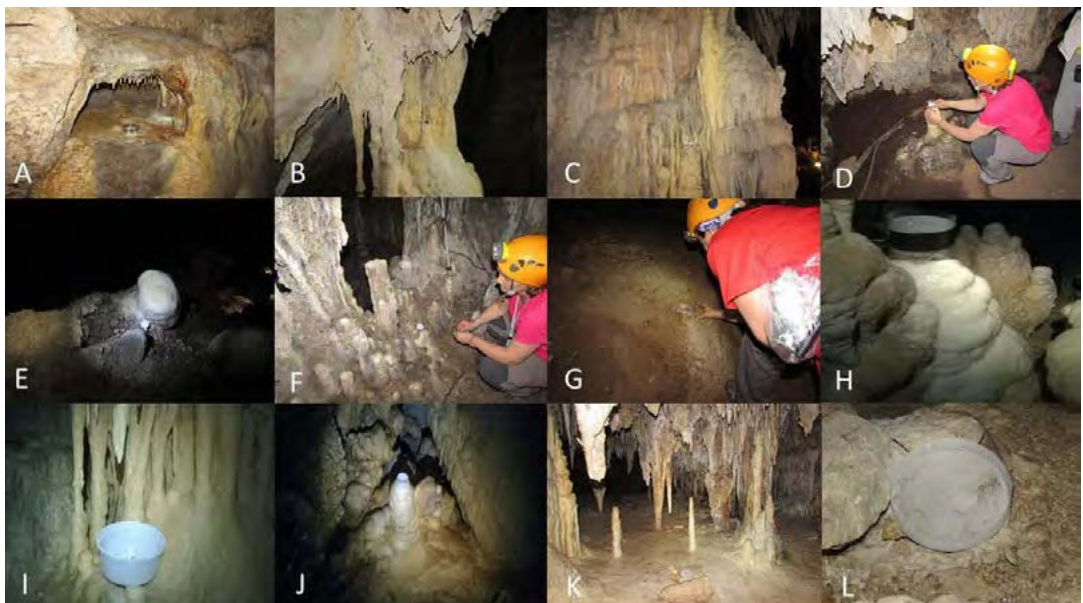


Figura 2. Ubicación de las placas de precipitación. A) Sala Oso NP-OSO, B) Sala Belén NP-BE, C) Sala Cascada NP-CAS1, D) Sala Cascada NP-CAS2, E) Sala Cataclismo NP-CAT1, F) Sala Cataclismo NP-CAT2, G) Sala Hércules NP-HE, H) Sala Inmensidad NP-INM, I) Sala Montaña NP-MO1, J) Sala Montaña NP-MO2, K) Sala Montaña NP-MO3 y L) Cueva Pintada NP-CP.

de la cueva existe una estación meteorológica que registra, entre otros parámetros, la temperatura del aire y la cantidad de precipitación.

Se dispone, además, de medidas puntuales históricas de la conductividad eléctrica del agua y de caudal de goteo en algunos de los puntos de goteo seleccionados (tabla 1).

Resultados y discusión

Los datos suministrados por los equipos instrumentales situados en las diferentes salas de la cueva y en la estación meteorológica se muestran en la figura 3. Son datos que incluyen el periodo considerado de precipitación controlada de carbonatos en los soportes artificiales durante el año 2017.

Conductividad eléctrica							
	NP-CAS1	NP-CAS2	NP-CAT2 (*)	NP-HE	NP-INM (*)	NP-MO2	NP-MO3
n	242	15	465	7	85	23	52
max	2330	1340	690	720	649	1024	901
min	538	847	307	530	463	440	560
promed	1201	973	462	627	549	594	639
s	233	140	50	67	35	144	69
v (%)	19	14	11	11	6	24	11

Caudal de goteo							
	NP-CAS1	NP-CAS2	NP-CAT2 (*)	NP-HE	NP-INM (*)	NP-MO2	NP-MO3
n	188	11	1362	2	86	21	51
max	14,0	2	59	25	81	30	1145
min	0,9	0	32	3	1	0	7
promed	10,4	1	32	14	24	5	194
s	2,3	1	8	16	18	8	258
v (%)	22,2	102	27	111	75	155	133

pH							
	NP-CAS1	NP-CAS2	NP-CAT2 (*)	NP-HE	NP-INM (*)	NP-MO2	NP-MO3
n	229	6	463	3	66	18	41
max	8,26	8,08	8,82	8,00	7,91	8,40	7,85
min	6,39	7,79	7,00	7,10	7,05	7,47	7,10
promed	7,33	7,97	8,21	7,47	7,38	7,80	7,39
s	0,39	0,11	0,24	0,47	0,18	0,26	0,19
v (%)	5,34	1,32	2,91	6,33	2,44	3,34	2,59

Tabla 1. Tabla resumen de datos de conductividad eléctrica (en $\mu\text{S/cm}$), caudal de goteo (en ml/día en NP-CAT2; en ml/min en el resto de puntos de goteo) y pH del agua en distintos goteros de la Cueva de Nerja. (*) Indica que el gotero está muy próximo a la placa de precipitación referenciada (< 3 m de distancia), pero no sobre esta, (n) número de medidas, (máx) valor máximo, (min) valor mínimo, (promed) valor medio, (s) la desviación estándar y (v) el coeficiente de variación (en %).

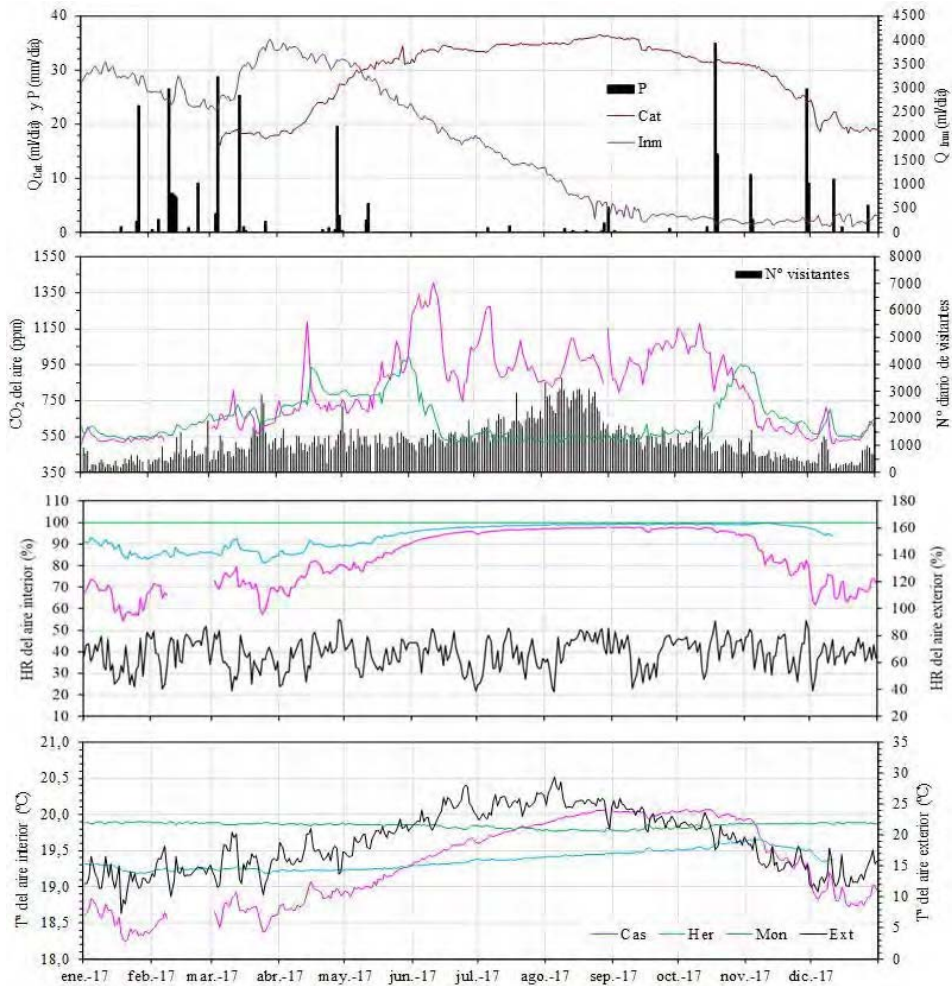


Figura 3. Evolución a lo largo del ciclo anual de los diferentes parámetros ambientales registrados en el exterior (Ext) e interior de la Cueva de Nerja (Cascada.- Cas; Hércules.- He; Montaña.- Mon; Cataclismo.- Cat; Inmensidad.- Inm). Leyenda: HR- humedad relativa, P- precipitación, Q- caudal de goteo medido en las salas de Cataclismo (Q_{cat}) e Inmensidad (Q_{inm}). Datos medios diarios.

La temperatura de la cueva refleja la temperatura media del aire exterior. Este parámetro es de gran importancia a la hora de obtener información sobre las condiciones climáticas. De hecho, el carbonato que precipita a partir del agua de goteo presenta una composición isotópica determinada por la temperatura de la cueva. En la figura 3 se representan los valores medios diarios de temperatura del aire medidos en las diferentes salas de la cueva. En las Galerías Turísticas, la temperatura del aire varía entre 14 y 20,1 °C, con un valor medio de 18,8 °C. En las Galerías Altas y Nuevas, la temperatura del aire oscila menos, entre 19,2 y 20 °C, con un valor medio anual de 19,7 °C. Así, existe una diferencia de casi 1 °C entre ambos sectores, presentando la zona más interna de la cavidad una mayor estabilidad térmica, especialmente las salas más pro-

fundas, donde mayor es el espesor de roca encajante. La presencia de cobertera vegetal sobre la cueva ocasiona cambios en la temperatura interna (Domínguez-Villar *et al.*, 2013). El aumento de la temperatura en las Galerías Altas y Nuevas puede relacionarse también con la deforestación que existe en el exterior de la cueva sobre estas salas, de tal forma que podría reflejarse en un aumento de la temperatura del suelo y transferirse a través del epikarst (Ferguson y Beltrami, 2006).

La temperatura del aire exterior se mantiene permanentemente por encima de la temperatura de la cueva durante los meses de mayo a octubre. El resto del año, la temperatura exterior es, en general, inferior a la de la cavidad (figura 3). Esta diferencia de temperaturas se traduce en una diferencia de densidades entre el aire exterior e interior, que condiciona los flujos de aire y la ventilación dentro de la cavidad (Liñán *et al.*, 2018).

Los valores de humedad medidos en las Galerías Turísticas durante el periodo de control oscilan entre el 34% y el 98%, con un valor medio del 80%. En las Galerías Altas y Nuevas la variación es menor, entre el 81% y el 100%, con un valor medio del 97% (figura 3). En la sala más interna de la cueva (Montaña) el aire permanece saturado durante todo el ciclo anual. En el resto de galerías, los elevados valores medios de humedad relativa, especialmente de junio a octubre, con valores próximos a la saturación, minimizan en principio los posibles procesos de evaporación en la cueva.

El proceso de ventilación, relacionado con los cambios en la densidad del aire, es un aspecto de gran interés ya que la concentración de CO₂ en el aire y su variabilidad estacional pueden condicionar la precipitación del carbonato. Los valores medidos de concentración de CO₂ varían entre 440 y 1406 ppm en las Galerías Turísticas (valor medio de 718 ppm) y entre 492 y 1170 ppm en las Galerías Altas y Nuevas (654 ppm de valor medio). El periodo *de invierno* (meses de noviembre a abril) corresponde al de mayor ventilación de la cavidad. Los contenidos en CO₂ del aire son, por lo general, los más bajos del ciclo anual y la variación temporal del CO₂ en las Galerías Altas y Nuevas es, por lo general, idéntica a la del sector turístico (figura 3). Este periodo corresponde, además, al de menor actividad vegetal sobre la cueva.

Durante los meses de *verano* (mediados de junio a mediados de octubre), el contenido en CO₂ del aire en las Galerías Altas y Nuevas se mantiene constante y en valores bajos (unos 550 ppm), mientras que en las Galerías Turísticas los contenidos son los más altos del ciclo anual y muestran variaciones que se relacionan con el régimen de ventilación de la cavidad (Liñán *et al.*, 2018). Esta mayor concentración de CO₂ en el aire determina una mayor P_{CO₂} del agua y por tanto una menor precipitación de carbonato en el sector visitable. Por otra parte, Andreo *et al.* (2005) registraron aumentos de la conductividad eléctrica del agua de goteo en el punto NP-CAT2 durante los meses de verano y disminuciones en invierno, relacionados con un menor/mayor grado de sobresaturación en calcita y dolomita y menor/mayor precipitación de carbonato cálcico.

Los datos de caudal de goteo registrados en el sector turístico muestran un desfase del orden de 6-8 meses, entre la caída de las lluvias y la salida por el gotero con caudales máximos en primavera-verano y mínimos en otoño-invierno (Carrasco *et al.*, 1996; Liñán *et al.*, 2008). Sin embargo, en las Galerías Altas y Nuevas, la evolución temporal del caudal de goteo es claramente diferente (figura 3). Los caudales más elevados se registran durante los primeros meses del año,

en respuesta a los episodios lluviosos registrados en noviembre-diciembre de 2016 (205 mm en total) y en enero-marzo de 2017 (144 mm), siendo el desfase entre la caída de lluvias y la salida por gotero del orden de 1-2 meses.

Todos los puntos de goteo asociados a cada dispositivo de precipitación de carbonato han per-

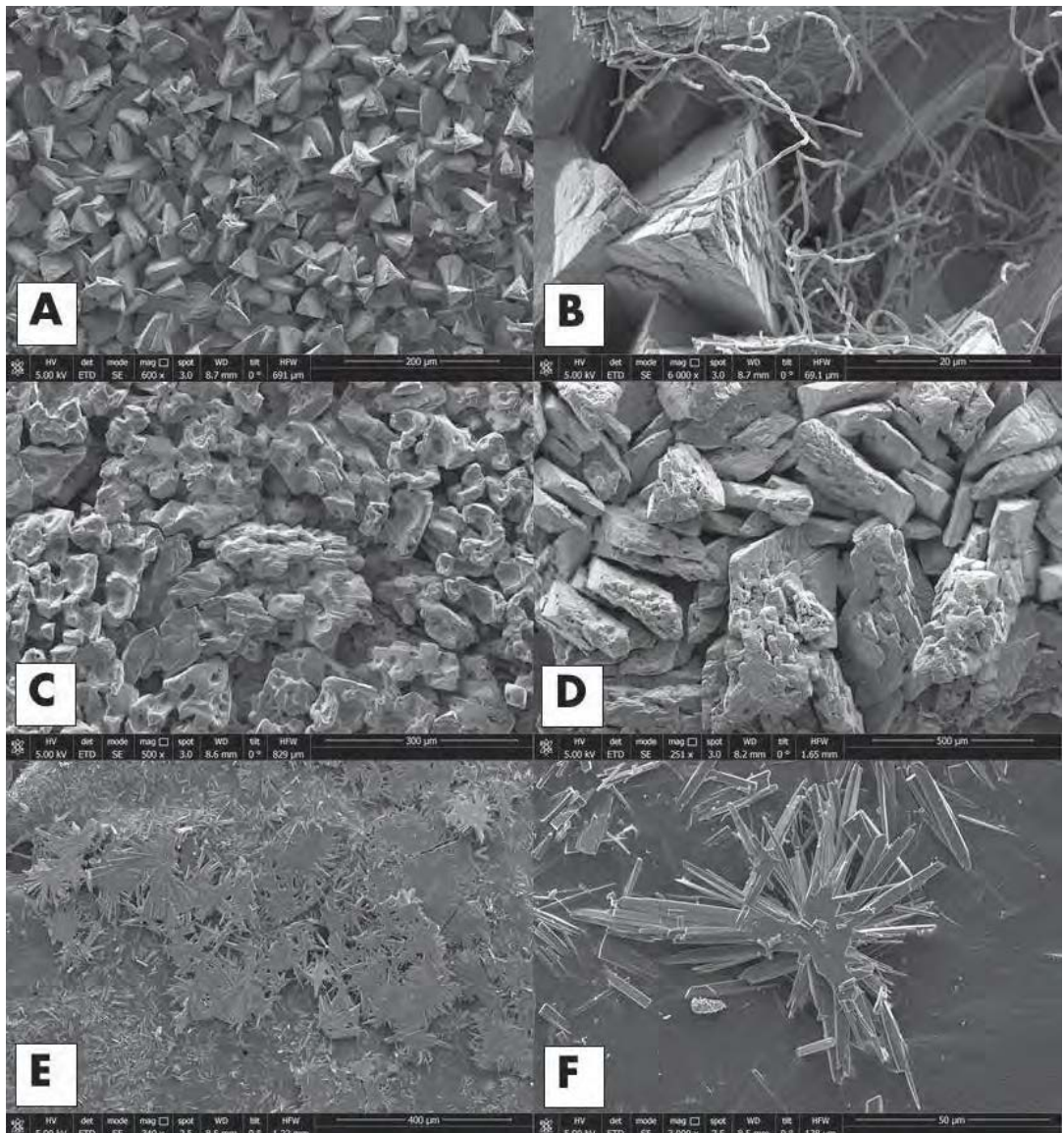


Figura 4. Fotografías mediante SEM de los precipitados calcínicos obtenidos A) Sala Belén, cristales de calcita hábito trigonal, B) Presencia de microorganismos en Sala Belén, C) Cristales de calcita con formas redondeadas y signos de alteración en Sala Cascada D) Detalle de los procesos de alteración, E) Cristales de aragonito con hábito fibroso en la Sala Cataclismo y F) Detalle de los cristales aciculares de aragonito.

manecido activos durante el período de control, salvo los goteros de la Sala Oso, Belén y Pintada. En los dos primeros puntos, no se observó goteo hasta noviembre. En Cueva Pintada, el gotero ha permanecido seco desde el mes de junio.

En general, los precipitados obtenidos responden, mayoritariamente, a cristales equidimensionales de calcita, con un crecimiento homogéneo en todas direcciones (figura 4 A). Son cristales de hábito romboédrico y constituyen verdaderos “mesocristales” (Cölfen y Antonietti, 2005). En algunos de los precipitados, en particular en las salas de Belén y Montaña, se ha detectado la presencia de microorganismos. Esta intervención orgánica aparece en forma de telaraña creando pequeñas colonias (figura 4 B). En las salas de Cascada y Cataclismo, los precipitados recogidos son también calcíticos con hábito trigonal, pero, a diferencia de los anteriores, estos cristales están alterados y presentan cavidades o cráteres (figura 4 C y D) que originalmente podrían haber estado ocupados por microorganismos (Pedley y Rogerson 2010). Además en estas salas se han detectado fases aragoníticas (figura 4 E y F).

Los precipitados de las Galerías Altas y Nuevas no presentan, en general, huellas de disolución (figura 5) y corresponden también a cristales de calcita bien formados con hábitos romboédricos (figura 5 A y B). En estas salas son frecuentes los cristales con hábito tabular (figura 5 C y F) y se observa que los cristales constituyen verdaderos tapices (figura 5 D y E). Puntalmente se han detectado fases aragoníticas en la sala de la Montaña.

En lo que respecta a la tasa/cantidad de precipitación de carbonato, cabe señalar que su mayor o menor contenido está ligado a multitud de variables, principalmente a la tasa de goteo, pero también influye la altura desde la que se produce el impacto (distancia del goteo a la placa Petri), el estado de saturación de las aguas infiltradas, etc. En general, las diferencias entre los goteos pueden explicarse por el proceso de infiltración del agua a lo largo del epikarst que puede ocurrir de una manera muy lenta y constante a través del sistema poroso de la roca soporte o de un modo más rápido y estacional utilizando la propia fracturación de la roca, o una combinación de ambos. Durante el periodo de estudio considerado, se ha constatado en todos los dispositivos precipitación de material carbonatado, si bien la cantidad de precipitado ha sido diferente según el punto de control considerado, así en NP-BE la menor cantidad de precipitado puede asociarse al menor tiempo de exposición al gotero, que permaneció seco durante parte del periodo de control.

En NP-MO2, el caudal de goteo es de 5 ml/min (tabla 1); en los goteros NP-CAT1 y NP-INM el caudal es inferior a este valor, según observaciones de campo realizadas. Los valores máximos de precipitado se han recogido en la Sala de la Montaña (NP-MO3, 6,1g) y los mínimos en la Sala del Cataclismo (NP-CAT1, 0,1g). El punto en el que se registra la mayor cantidad de precipitado NP-MO3, se corresponde con el valor más alto de caudal de goteo de toda cavidad (194 ml/min de valor medio) (tabla 1). Además, en este gotero el valor de la conductividad eléctrica del agua es también de los más altos de la cueva (639 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y el mayor valor si sólo se consideran goteros cuyas aguas proceden de la infiltración de la lluvia y no las que tienen influencia del riego de los jardines. En el punto correspondiente a NP-CAS1 se ha obtenido una relativa baja cantidad de precipitado en relación a lo que, *a priori*, se podría esperar, considerando que se ubica bajo un gotero constante de caudal relativamente alto (10 ml/min) y alta mineralización, superior a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (tabla 1). Durante el período de estudio, el propio goteo intenso hizo

volcar la placa de Petri, por lo que esta no recibió agua durante cierto período de tiempo. De forma preliminar, atribuimos a este incidente la menor cantidad de precipitado recogido en relación a otros puntos de goteo de similares características.

Los datos isotópicos obtenidos de los precipitados carbonatados y de las aguas se muestran en la tabla 2. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ varían entre máximos de -5 ‰ y -7,1 ‰ y mínimos de -7,1

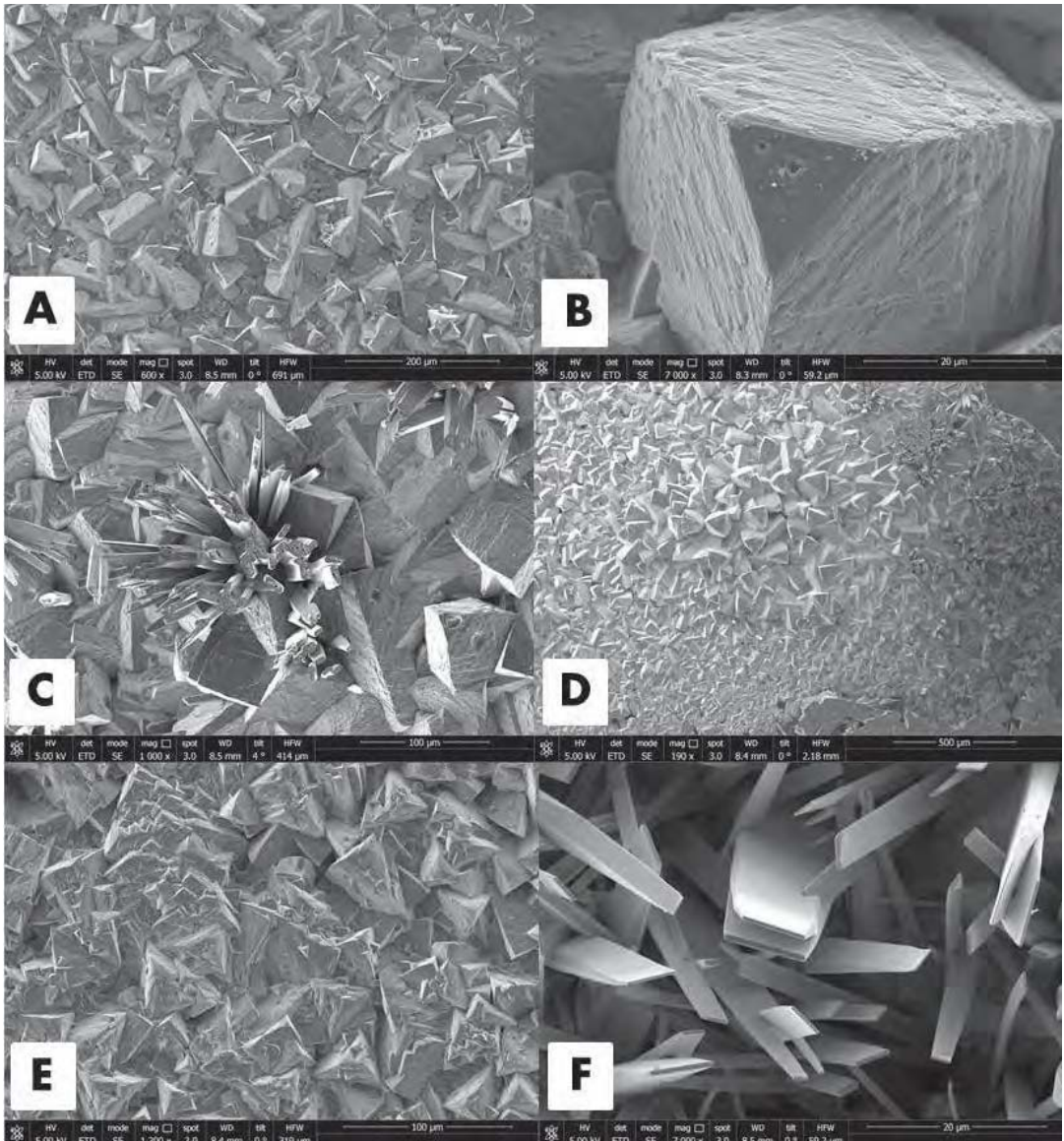


Figura 5. Fotografías mediante SEM de los precipitados calcínicos obtenidos A) y B) Sala Hércules, D) y E) Cristales de calcita en Sala Inmensidad, C) y F) Cristales con hábito tabular en Sala de la Montaña.

‰ y -11,3 ‰, respectivamente para los precipitados. En general, existe un aligeramiento isotópico del $\delta^{18}\text{O}$ a lo largo de todo el proceso desde que el agua de lluvia llega al suelo, se infiltra en el sustrato geológico y ya en la cueva se desgasifica y precipitan los carbonatos.

Precipitados	%$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$	%$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$	Aguas Gotero	%$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	%$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$
NP-BE	-9,7	-5,3	G-BE	-6,2	-37,9
NP-CAS1	-10,4	-7,1	G-CAS1	-5,6	-33,4
NP-CAS2	-7,1	-5,4	G-CAT2	-4,9	-27,8
NP-CAT1	-7,4	-5,7	G-HE1	-5,2	-32,8
NP-CAT2	-10,6	-5,0	G-HE2	-5,6	-32,1
NP-HE	-10,9	-5,6	G-INM	-4,6	-26,4
NP-INM	-9,3	-5,1	G-MO1	-5,9	-34,1
NP-MO1	-11,3	-6,3	G-MO2	-4,6	-33,8
NP-MO2	-7,5	-5,7	G-MO3	-5,6	-34
NP-MO3	-11,2	-5,9			

Tabla 2. Resultados isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ de carbonatos precipitados actualmente y $\delta^{18}\text{O}$ y δD de las aguas de goteo en cada punto de control.

Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ presentan una mayor variabilidad, que puede justificarse por la presencia de vegetación en superficie (Jiménez de Cisneros, 1994) y por el tiempo de residencia del agua en el suelo. En cuanto al agua de goteo los valores isotópicos se sitúan entre la línea de agua meteórica mundial (Craig, 1961) y la de agua meteórica local definida a partir de muestras de lluvia (Caballero *et al.*, 1996; Matthey, 2008). Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ varían entre -3,6 ‰ y -6,2 ‰ y los de δD entre -13,8 ‰ y -37,9 ‰ (figura 6). El bajo rango de variación de la composición isotópica del agua de goteo comparado con la variación en el agua de lluvia es habitual en las cuevas, y se asocia al periodo de permanencia del agua en las reservas del epikarst y en la zona vadosa durante un tiempo suficiente (al menos dos semanas) que origina una homogenización de la señal isotópica del agua de goteo.

Conclusiones

El control de los parámetros ambientales realizado durante el estudio de precipitación de carbonatos en el interior de la Cueva de Nerja refleja una diferencia en las condiciones ambientales de las Galerías Turísticas frente a las Galerías Altas a lo largo del ciclo anual. Durante los meses de primavera-verano, el aire de las Galerías Turísticas tiene mayor temperatura, mayor humedad relativa y mayor concentración de CO_2 que durante el otoño-invierno. Así, la precipitación carbonatada en las Galerías Turísticas estaría favorecida durante este último período (otoño-invierno), consecuencia de la menor presión parcial de CO_2 de la atmósfera subterránea, que determinaría una menor P_{CO_2} del agua de goteo y de la mayor ventilación de la cavidad, que fa-

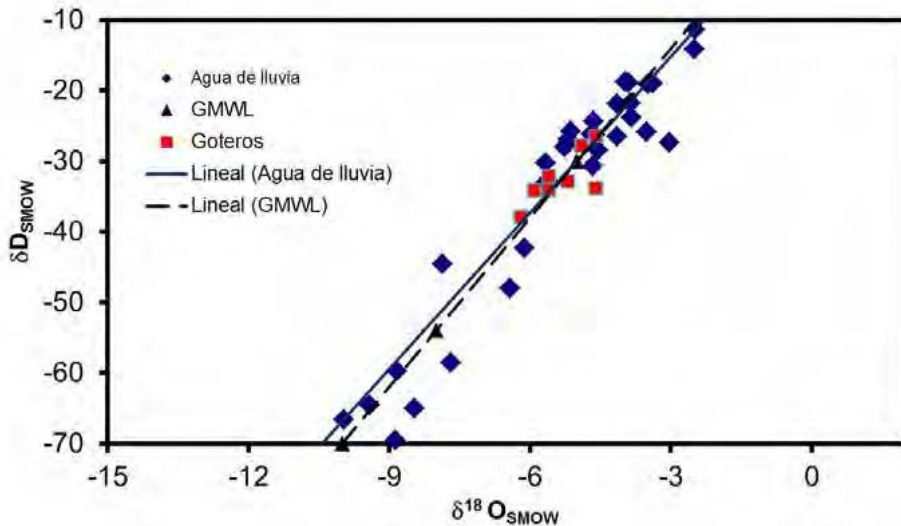


Figura 6. Valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de las aguas de goteo. Línea de agua meteórica mundial GMWL (Craig, 1961) y agua meteórica local definida a partir de muestras de lluvia (Caballero et al., 1996).

vorecería los procesos de evaporación del agua de goteo. Durante el periodo estacional más seco (primavera-verano) una mayor concentración de CO_2 en la atmósfera de la cavidad, la máxima humedad ambiental y la menor ventilación de las salas se traduciría en una baja tasa de precipitación de carbonatos en este sector de la cueva.

En las Galerías Altas y Nuevas, la humedad relativa del aire es muy elevada a lo largo de todo el ciclo anual, por lo que los procesos de evaporación serían mínimos. En este caso, las menores concentraciones de CO_2 del aire se registran durante el período estival y en los períodos en los que la temperatura exterior es notablemente inferior a la de la cavidad. La menor presión parcial de CO_2 de la atmósfera subterránea determinaría una menor P_{CO_2} del agua de goteo, favoreciéndose el desarrollo de los precipitados calcícos en esta época del año.

Parece observarse cierta relación entre el caudal de goteo y la cantidad de precipitado recogido en cada uno de los dispositivos de precipitación, si bien este aspecto deberá ser comprobado con medidas periódicas del caudal de goteo específicas, en cada uno de los goteros de control, a la vista de las notables variaciones que muestran los dos goteros equipados con pluviógrafos, pero que no tienen asociada ninguna placa de precipitación. Asimismo, es necesario realizar medidas periódicas, *in situ*, de los principales parámetros físico-químicos y nuevos análisis geoquímicos del agua de goteo, al objeto de determinar su papel en la mineralogía y textura de los precipitados.

En general, los precipitados obtenidos hasta la fecha son cristales equidimensionales de calcita, con hábito trigonal, que forman verdaderos "mesocristales". En general, la fase cristalina dominante es la calcita con hábito romboédrico aunque en varias salas aparecen cristales de aragonito de hábito fibroso o acicular. Las cavidades o huellas de disolución observadas en algunos cristales

de calcita pueden ser debidas a la acción de microorganismos. En las Galerías Altas y Nuevas, los cristales no muestran este tipo de huellas y están bien formados, con predominio de los hábitos romboédricos y tabulares.

Los resultados isotópicos evidencian una homogenización de la señal isotópica tras la infiltración del agua y finalmente la precipitación del carbonato. La variabilidad de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ puede justificarse por la presencia de vegetación en superficie y por el tiempo de residencia del agua en el suelo.

Agradecimientos

Este trabajo procede de los estudios desarrollados por el área de Geología del Proyecto General de Investigación Interdisciplinar de la cueva de Nerja, dirigido expresamente a la conservación de la cavidad. El proyecto está financiado por la Fundación Pública de Servicios Cueva de Nerja, coordinado desde su Instituto de Investigación y autorizado por la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía.

Referencias

- Andreo, B., Carrasco, F. y Sanz de Galdeano, C. 1993. Estudio geológico del entorno de la Cueva de Nerja. En: *Trabajos sobre la Cueva de Nerja, 3. Geología de la Cueva de Nerja* (F. Carrasco, Ed.), 25-50.
- Andreo, B., Liñán, C., Carrasco, F., Batiot, C., Emblanch, C. y Durán, J.J. 2005. Infiltration in the dolomitic karstic system of Nerja cave (southern Spain). En: Final Programme and Abstract Book of the 14th International Congress of Speleology, 154. Atenas.
- Arrese, B. 2009. *Geomorfología, evolución geológica y condiciones ambientales actuales de la Cueva de Nerja, Málaga*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid, 304.
- Avidad, J. y García Dueñas, V. 1980. *Mapa geológico a escala 1:50.000*, Hoja nº 1055 (Motril), I.G.M.E., Memoria explicativa 36.
- Bar-Matthews, M., Ayalon, A. y Kaufman, A. 1997. Late Quaternary paleoclimate in the eastern Mediterranean region from stable isotope analysis of speleothems at Soreq Cave, Israel. *Quaternary Research* 47, 155-168.
- Caballero, E., Jiménez de Cisneros, C. y Reyes, E. 1996. An stable isotope study of cave seepage waters. *Applied Geochemistry*, 11, 583-587.
- Cölfen, H. y Antonietti, M. 2005. *Mesocrystals: Inorganic Superstructures Made by Highly Parallel Crystallization and Controlled Alignment* rsch. *Angewandte Chemie International Edition* 44, 35.S.5576-5591.
- Craig, H. 1961. Isotopic variations in meteoric water. *Science* 133, 1702-1703.
- Dominguez-Villar, D., Carrasco, R.M., Pedraza, J., Cheng, H., Edwards, R.L. y Willenbring, J.K. 2013. Early maximum extent of paleoglaciers from Mediterranean mountains during the last glaciation. *Scientific Reports* 3, Article number: 2034 doi:10.1038/srep02034.
- Elorza, J.J. y García-Dueñas, V. 1980. *Mapa geológico a escala 1:50.000*, Hoja nº1054 (Vélez-Málaga), I.G.M.E. Memoria explicativa, 59.
- Ferguson, G. y Beltrami, H. 2006. Transient lateral heat flow due to land-use changes. *Earth and Planetary Science Letters*, 252 (1), 217-222.
- Frisia, S., Borsato, A., Preto, N. y McDermott, F. 2003. Late Holocene annual growth in three Alpine stalagmites records the influence of solar activity and the North Atlantic Oscillation on winter climate. *Earth and Planetary Science Letters* 216, 411-424.
- Hellstrom, J., McCulloch, M. y Stone, J., 1998. A detailed 31,000-year record of climate and vegetation

- change, from the isotope geochemistry of two New Zealand speleothems. *Quaternary Research* 50, 167-178.
- Jiménez de Cisneros, C. 1994. *Geoquímica de carbonatos relacionados con etapas de emersión*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 216 p.
- Jiménez-López, C., Caballero, E., Huertas, F.J. y Romanek, C. S. 2001. Chemical, mineralogical and isotope behavior, and phase transformation during the precipitation of calcium carbonate minerals from intermediate ionic solution at 25°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65 (19), 3219-3231.
- Liñán, C., del Rosal, Y., Carrasco, F., Vadillo, I., Benavente, J. y 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.
- Mattey, D., Lowry, D., Duffet, J., Fisher, R., Hodge, E. y 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, 80-95.
- Morse J. W. y Casey W. H. 1988. Ostwald processes and mineral paragenesis in sediments. *Am. Journal Sci.* 288, 537-560.
- Morse J. W. y Mackenzie F. T. 1990. *Geochemistry of Sedimentary Carbonates*. Elsevier, New York.
- Pedley, H.M. y Rogerson, M. 2010. In vitro investigations of the impact of different temperature and flow velocity conditions on tufa microfabric. *En: Tufas and speleothems : Unravelling the Microbial and Physical Controls* (H.M. Pedley y M. Rogersen, Eds.), Geological Society, London, Special Publications, 336, 193-210.
- Sanz de Galdeano, C. 1986. Structure et stratigraphie du secteur oriental de la Sierra Aljara (Zone Alpujarride, Cordillères Bétiques). *Estudios Geológicos* 42, 281-289.
- Sanz de Galdeano, C. 1990. Estructura y estratigrafía de la Sierra de los Guájares y sectores próximos (Conjunto Alpujarride, Cordilleras Béticas). *Estudios Geológicos* 46, 123-134.

C. Jiménez de Cisneros Vencelá, *et al.*, 2018. Caracterización físico-química y mineralógica del suelo externo de la cueva de Nerja (Málaga, España). En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 43-54.

Caracterización físico-química y mineralógica del suelo externo de la cueva de Nerja (Málaga, España)

C. Jiménez de Cisneros Vencelá⁽¹⁾, A. Peña Heras⁽¹⁾, E. Caballero Mesa⁽¹⁾ y C. Liñán Baena^(2,3)

(1) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR), Avda. de las Palmeras 4, 18100 Armilla (Granada).
concepcion.cisneros@iact-ugr.csic.es, aranchaph@iact-ugr.csic.es, emilia.caballero@iact-ugr.csic.es

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

(3) Departamento de Ecología y Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga. Campus de Teatinos s/n, 29071 Málaga.

RESUMEN

La cobertera edáfica externa situada sobre una cueva actúa como reguladora de los intercambios entre el interior y el exterior de la cavidad, modifica la retención e infiltración de agua y proporciona materia orgánica, minerales arcillosos, y elementos nutrientes, aspectos fundamentales para el desarrollo de los microorganismos y precipitados en el interior de la cueva. En este trabajo se realiza una caracterización de la composición mineralógica y geoquímica del suelo externo de la Cueva de Nerja, de sus propiedades texturales y de algunas de sus propiedades bioquímicas, dado que cualquier modificación o alteración que se produzca en esta delgada capa de suelo se refleja en variaciones en las condiciones físico-químicas del ecosistema subterráneo.

Palabras clave: cueva de Nerja, geoquímica, mineralogía, parámetros físico-químicos, suelo.

Physicochemical and mineralogical characterization of the external soil of the Nerja cave (Málaga, Spain)

ABSTRACT

The soil placed on a cave acts as regulator of the changes occurring in and on the cavity, modifies water infiltration and retention and provides organic matter, clay minerals, and nutrient elements, all of them essential for the growth of microorganisms and precipitates inside the cave. In this work the mineralogical and geochemical composition of the soil laying on Nerja Cave was characterized, as well as its textural properties and some biochemical parameters, since any modification or alteration that may happen in this thin covering layer will be reflected in variations in the physicochemical conditions of the underground ecosystem.

Keywords: geochemistry, mineralogy, Nerja cave, physicochemical properties, soil.

Introducción

La función que juega el suelo es clave en el desarrollo del ecosistema de una cueva. La caracterización de la composición mineral y geoquímica del suelo, así como de sus propiedades texturales, hace posible conocer parámetros muy significativos que permiten establecer la variabilidad de las condiciones climáticas en el área de estudio. El análisis de la cobertera edáfica de la cueva permite caracterizar y comprender la dinámica del ecosistema subterráneo.

La cueva de Nerja es una importante cavidad turística del litoral malagueño desarrollada en mármoles dolomíticos triásicos con un promedio de 460.000 visitantes al año. Su entorno se encuentra muy antropizado como consecuencia de las superficies construidas y las áreas ajardinadas. En las áreas más alejadas a la entrada de la cueva la vegetación que predomina es matorral y pinar.

En este trabajo se ha realizado una caracterización mineralógica y geoquímica del suelo sobre la superficie de la cueva de Nerja. También, se han determinado sus propiedades texturales y algunas de sus propiedades bioquímicas. El objetivo del estudio ha sido conocer con mayor detalle la composición del suelo, que interviene directa o indirectamente en los procesos de intercambio cavidad-superficie que quedan reflejados tanto, en el material que precipita y se forma actualmente, como en las posibles modificaciones de las condiciones ambientales reinantes dentro de la cavidad. Así, cualquier cambio que se produce en esta delgada cobertera de suelo puede provocar una variación de las condiciones físico-químicas del ecosistema subterráneo.

Localización geográfica y geológica

La cueva de Nerja se encuentra ubicada en el extremo suroriental de la provincia de Málaga, a 3 km al Este del pueblo de Nerja, junto a la localidad de Maro (figura 1A). La región se encuentra situada en la Zona Interna de la Cordillera Bética, cadena de plegamiento alpino que ocupa la zona meridional de la Península Ibérica. En la Zona Interna de la Cordillera Bética se diferencian cuatro dominios paleogeográficos, dispuestos en mantos de corrimiento apilados: Nevado-Filábride, Alpujárride, Maláguide y Unidades frontales (Dorsal Bética). En el entorno de la cueva afloran materiales metamórficos del Complejo Alpujárride y sedimentos detríticos (continentales y marinos) postorogénicos (figura 1 B). Los materiales alpujárrides corresponden a dos mantos de corrimiento: Almijara, en posición inferior (donde se ubica la cueva) y Guájares, sobre el anterior (Avidad y García Dueñas, 1980; Elorza y García Dueñas, 1980). La cueva de Nerja se localiza en la vertiente meridional de la Sierra Almijara con predominancia de esquistos oscuros, esquistos claros, mármoles dolomíticos sacaroideos (en los que se desarrolla la cueva) y mármoles calizos con niveles de calcoesquistos (Sanz de Galdeano, 1986 y 1990; Andreo *et al.*, 1993).

La serie estratigráfica comienza por una secuencia metapelítica, de gran espesor (puede alcanzar hasta 1000 m) constituida por esquistos oscuros en la base y claros hacia el techo atribuidos al Paleozoico y al Trías inferior, respectivamente. Esta secuencia pasa gradualmente hacia arriba, a través de unos niveles de transición de calcoesquistos, cuarcitas, mármoles y esquistos, a una potente serie marmórea. Los mármoles carbonáticos donde se desarrolla la cueva, de edad Trías medio, pueden llegar a tener 400 m de espesor y son de naturaleza dolomítica, de color blanco o gris, de grano medio a grueso, muy diaclasados (figura 1 B). En algunas ocasiones presentan una textura sacaroidea, que da lugar a que se disgreguen con facilidad originando los denominados "arenales". La fracturación de esta sierra es uno de los condicionantes en la formación del relieve kárstico y, en particular, ha sido un factor esencial en la formación de la cueva de Nerja.

Metodología

Para la caracterización del suelo exterior sobre la cueva de Nerja se seleccionaron seis puntos de

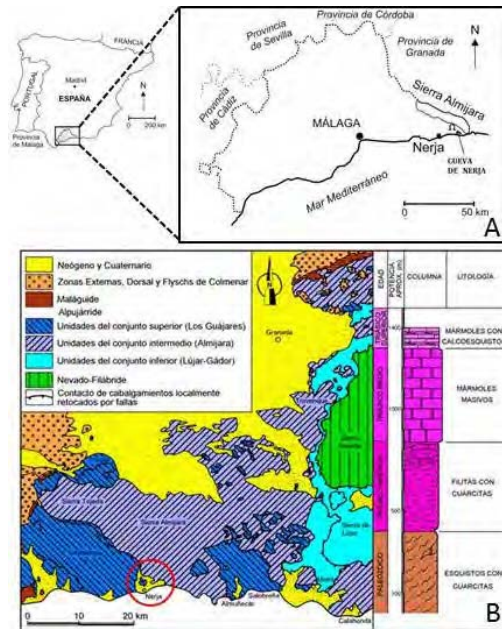


Figura 1. A) Localización geográfica de la cueva de Nerja (modificada de Arrese, 2009). B) Localización geológica de la cueva de Nerja en el sector central del Complejo Alpujarride y serie estratigráfica sintética de los materiales alpujarrides (tomada de Sanz de Galdeano, 1990).

muestreo, localizados sobre la superficie del cavernamiento, concretamente sobre las salas de Belén, Cascada, Cataclismo, Hércules, Inmensidad y Montaña (muestras clasificadas con esta nomenclatura: NS-BE, NS-CAS, NS-CAT, NS-HE, NS-INM y NS-MO). Un aspecto destacable durante la recogida de las muestras fue el escaso y pobre desarrollo de suelo en todos los puntos de muestreo cuyo espesor no supera los 20 cm, salvo en los situados sobre la entrada de la cueva (figura 2). En las zonas más próximas a las entradas el espesor del suelo puede alcanzar entre 30 y 50 cm, siendo en estos casos algo más poroso y con abundante vegetación herbácea. Se puede considerar que el suelo de estas zonas, de origen mayoritario antrópico, es un suelo con un alto componente artificial.

En cada punto de muestreo se recogieron unos 3 kg de suelo, de la capa superficial (0-20 cm). Las muestras se secaron en estufa de aire forzado a 40 °C y se tamizaron a través de una criba de 2 mm. Sus propiedades se muestran en la tabla 1.

El pH y la conductividad se determinaron en suspensiones suelo/agua desionizada (1/2,5, m/v). El carbono orgánico (CO) se analizó con la metodología de oxidación húmeda de Mingorance et al. (2007). El contenido en carbonatos se cuantificó por el método del calcímetro de Bernard. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se calculó según el método colorimétrico de Meier y Kahr (1999). La distribución del tamaño de las partículas del suelo se cuantificó aplicando el método de la pipeta de Robinson con hexametáfosfato sódico como agente dispersante. El con-

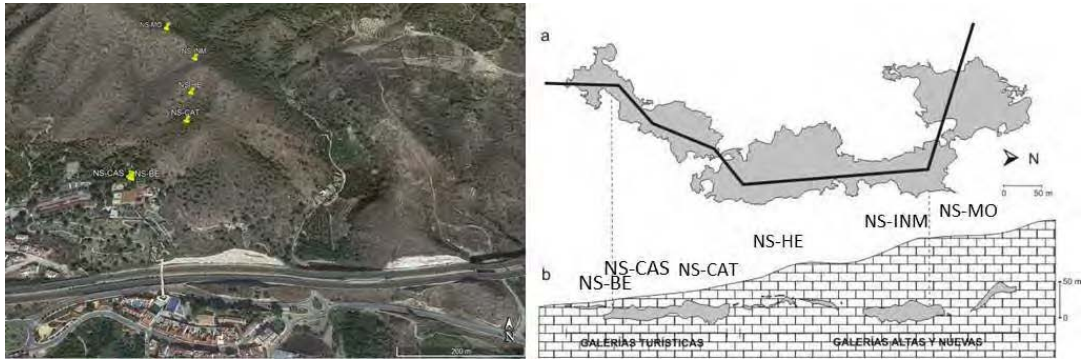


Figura 2. Localización de los puntos de muestreo de los suelos externos de la cueva de Nerja. Proyección en planta (a) y en perfil (b) de la cueva de Nerja con indicación de las muestras de suelos tomadas (modificada de Arrese, 2009).

tenido en C y N se determinó mediante un Analizador Elemental *THERMO SCIENTIFIC* Modelo Flash 2000 (CIC, Universidad de Granada). La capacidad de retención de agua se cuantificó por gravedad. La medida de la respiración inducida de los suelos se llevó a cabo en un respirómetro automático (μ Trac 4200, Sy Lab microbiology, Gomensoro) midiendo los cambios de impedancia de una solución de KOH a lo largo de 24 h (Mingorance y Peña, 2016). La actividad deshidrogenasa del suelo (ADH) se determinó según el método de García et al. (1997).

La especies minerales se identificaron por difracción de Rayos X (*Panalytical X-Pert Prodiffractometer*) con radiación Cu K (45 kV, 40 mA), usando el software XPOWDER®. Mediante el método de polvo se han identificado y cuantificado las fases cristalinas presentes. Sobre la fracción < 2 m se han reconocido los filosilicatos presentes realizando para ello agregados orientados. El análisis químico de los elementos mayoritarios se ha realizado sobre la muestra sólida mediante fluorescencia de rayos X con el equipo SpectraPLUS S4 Pioneer (Bruker) que incorpora un tubo de rayos X con ánodo de Rh (60 kV, 150 mA).

Análisis estadístico

Para detectar diferencias entre los valores medios de los grupos se realizó un análisis de la varianza (ANOVA de una vía) y la comparación post-hoc entre las medias se llevó a cabo con el test de Fisher LSD. La relación entre variables se analizó mediante un análisis de regresión. Para descubrir la estructura subyacente en el conjunto de datos se utilizó un análisis factorial basado en el análisis de componentes principales. Igualmente se ha realizado un análisis de conglomerados o clúster, que agrupa las variables observadas según la distancia o similitud entre ellas.

Se consideraron significativos valores con $P < 0,05$. El tratamiento estadístico de los datos se llevó a cabo usando el paquete estadístico IBM SPSS Statistics v. 23 (IBM) y las representaciones gráficas con Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corp.).

Resultados y discusión

Propiedades fisicoquímicas de los suelos

En general puede decirse que para la mayoría de las propiedades determinadas existen diferencias entre los suelos situados en la zona más cercana a la entrada de la cueva (NS-BE y NS-CAS) y los suelos que se encuentran en las zonas más alejadas (NS-HE, NS-INM y NS-MO) (tabla 1).

El contenido en carbonatos para los suelos NS-BE y NS-CAS varía entre 10 y 20%, algo más alto en NS-CAT, entre 20-40%, mientras que el de los suelos de NS-HE, NS-INM y NS-MO se clasifica como muy alto (> 40%).

El pH controla el grado de solubilidad de los minerales en el suelo y, por tanto, la capacidad de disolución de las aguas de infiltración respecto a la roca infrayacente. El pH de los suelos con menor contenido en carbonatos es prácticamente neutro (7,0-7,3) y resulta moderadamente alcalino para NS-HE, NS-INM y NS-MO (7,2-7,8), al tratarse de suelos carbonatados (tabla 1). El pH y el contenido en carbonatos están relacionados significativamente ($P < 0,05$) ($\text{pH} = 6,87 + 0,012 \cdot \text{carbonatos}$; $R^2 = 0,602$).

En cuanto a la conductividad se constata que ninguno de los suelos se puede considerar salino ($\text{CE} < 2 \text{ dS m}^{-1}$). Los suelos con menor conductividad ($< 0,6 \text{ dS m}^{-1}$) corresponden a NS-HE y NS-INM (suelos con bajo contenido en CO y más carbonatados, que es una sal insoluble) y la mayor conductividad ($> 0,8 \text{ dS m}^{-1}$) se registra en NS-BE y NS-CAT, suelos menos carbonatados y con mayor contenido en CO, por lo que la conductividad puede proceder de sales inorgánicas solubles, pero también de iones orgánicos. El suelo NS-CAS presenta un valor intermedio.

La capacidad de intercambio catiónico refleja la capacidad de un suelo de retener cationes a su alrededor. La CIC es mayor para los suelos situados en la zona más cercana a la entrada de la cueva, aunque no se ha encontrado una relación significativa ($P > 0,05$) con el resto de propiedades fisicoquímicas determinadas.

El contenido en CO de los suelos es alto, especialmente en los situados cerca de la entrada de la cueva (7-9%: NS-BE, NS-CAS y NS-CAT) y disminuye para NS-HE, NS-INM y NS-MO (2,2-3,5%), dado que responden a suelos en ladera con poca cobertura vegetal. En estos casos el carbono inorgánico aumenta probablemente como respuesta a una menor influencia de la cobertura vegetal y una mayor contribución del carbono mineral, en relación a la presencia de mármoles dolomíticos como roca encajante. Estos resultados coinciden con los dados por Benavente et al. (2006), con valores que oscilaban entre 9,1% y 2,2%, encontrándose siempre los contenidos más altos en los suelos cercanos a la entrada de la cueva.

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. Se espera pues que los suelos más cercanos a la entrada de la cueva retengan más el agua, lo que conllevaría una menor percolación a la cavidad. Sin embargo, se ha observado que en estas zonas de la cueva el caudal de goteo es más alto, posiblemente porque el espesor de roca por encima de la cueva es menor y porque, al tratarse de una zona ajardinada, hay un mayor aporte de agua de riego. La retención de agua

está relacionada de forma significativa ($P < 0,05$) con el contenido en CO del suelo ($\text{Ret agua} = 29,5 + 4,7 * \text{CO}$; $R^2 = 0,793$). Esto es lógico porque la materia orgánica mejora la estructura y porosidad del suelo.

La relación C/N en el suelo permite conocer la rapidez con la que se descompone la materia orgánica y su riqueza en nitrógeno. Dicha relación C/N varía según el tipo de suelo, por lo que los valores óptimos no son concluyentes, aunque podrían situarse por debajo de 20, como en los suelos NS-BE, NS-CAS y NS-CAT.

Propiedades bioquímicas de los suelos

En la tabla 1 se presentan los valores de la respiración tras 2, 4 y 6 h de incubación. Aun cuando las mayores diferencias corresponden a tiempos cortos (especialmente a 2 h), se puede constatar que para todos los tiempos existen diferencias significativas entre todos los suelos (ANOVA, $P < 0,05$). Por un lado, se agrupan los suelos NS-BE, NS-CAS y NS-CAT, que no se diferencian entre sí y, por el otro, NS-HE, NS-INM y NS-MO, que tampoco son diferentes entre ellos y que presentan menor respiración. Se ha encontrado una relación significativa ($P < 0,05$) entre el contenido en CO y la respiración del suelo a 2 h ($\text{Respiración}_{2h} = 1,3154 * \text{CO} - 3,8354$; $R^2 = 0,985$), una relación lógica, porque el CO constituye una fuente de energía para los microorganismos. Benavente *et al.* (2006) cuantificaron los contenidos de CO_2 epigénico en la zona de infiltración en la cueva de Nerja. Estos autores encontraron los contenidos máximos en las áreas más cercanas a la entrada de la cueva (2000 ppm) y los mínimos en las áreas más distales (300 ppm), valores acorde con los obtenidos en este estudio.

De especial interés resultan los datos obtenidos de la actividad deshidrogenasa. El suelo con la ADH más alta es NS-CAT (7,5% de CO), mientras que suelos con CO de 9,5 y 7% tienen unos valores muy bajos. Ambos suelos (NS-BE y NS-CAS) están situados bajo los árboles, en la zona más cercana a la entrada de la cueva. Si tenemos en cuenta todos los suelos no se encuentra ninguna relación significativa ($P > 0,05$) entre los valores de la ADH y el contenido en CO. Por el contrario, si eliminamos los dos suelos bajo los pinos, se observa que la ADH está significativamente relacionada con el contenido en CO del suelo ($P < 0,05$) mediante la ecuación $\text{ADH} = 104,3 * \text{OC}$ ($R^2 = 0,891$).

Análisis mineralógico y textural

El análisis mineralógico de los suelos pone de manifiesto que la composición de todos ellos es muy similar reflejando por tanto un mismo origen. La dolomita es el mineral mayoritario en los suelos situados en las áreas más alejadas de la entrada de la cueva, acompañado de cuarzo (7-12%) y filosilicatos (15-24%) (tabla 2). 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 como accesorios feldespatos (tanto potásicos como plagioclasas), salvo en NS-HE cuyo contenido es algo mayor (4-5%).

Los minerales de la arcilla, los filosilicatos, son considerados testigos sensibles a los cambios ambientales. En general, el análisis de las diferentes asociaciones de minerales de las arcillas refleja información sobre la composición del área de aporte, relacionándose directamente su presencia o ausencia con parámetros de carácter climático, los cuales controlan la meteorización de las rocas. En el área de estudio se constata que el mineral predominante en la fracción arcillosa es la clorita junto con otros minerales silicatados como son el cuarzo y los feldspatos (figura 3). La presencia mayoritaria de clorita en estos suelos junto con el cuarzo es coherente teniendo en cuenta los materiales metapelíticos (esquistos, cuarcitas y cuarzoesquistos) y carbonatados (mármoles calizos y dolomíticos) que conforman Sierra Almijara y que constituyen la principal área fuente de material para la formación de estos suelos tras la acción de los diferentes procesos físico-químicos y de erosión en estas rocas.

El análisis de elementos mayores (tabla 3) corrobora las pequeñas diferencias mineralógicas observadas en los suelos estudiados, constatándose una gran diferencia de los contenidos elemen-

Suelo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	pH	CE ^a (dS m ⁻¹)	CIC ^b (meq. 100 g ⁻¹)	CO ^c (%)	C/N	CaCO ₃ (%)	Retención agua (%)	Actividad deshidrogenasa ^d	Resp. ^e 2h	Resp. 4 h	Resp. 6 h
NS-BE	14	45	41	6,98 ± 0,18	0,87 ± 0,03	20,0 ± 1,8	9,1 ± 0,6	18,3	8,94	68	167 ± 17	9,5 ± 0,6	5,9 ± 0,5	4,3 ± 0,4
NS-CAS	16	46	38	7,26 ± 0,10	0,65 ± 0,04	16,9 ± 1,1	7,0 ± 0,1	16,3	16,4	67	63 ± 18	8,2 ± 0,2	5,4 ± 0,0	3,9 ± 0,0
NS-CAT	21	48	31	7,02 ± 0,04	0,85 ± 0,01	12,6 ± 0,4	7,5 ± 0,4	21,2	31,5	68	751 ± 108	9,0 ± 0,3	5,5 ± 0,1	4,1 ± 0,1
NS-HE	25	53	22	7,77 ± 0,13	0,51 ± 0,03	6,9 ± 0,1	2,2 ± 0,1	49,6	65,3	36	180 ± 34	4,7 ± 0,1	3,6 ± 0,1	2,9 ± 0,0
NS-INM	31	49	20	7,24 ± 0,05	0,55 ± 0,08	6,4 ± 0,1	2,6 ± 0,2	51,0	50,5	45	302 ± 31	5,0 ± 0,6	3,9 ± 0,4	3,2 ± 0,2
NS-MO	20	52	28	7,64 ± 0,07	0,72 ± 0,05	8,9 ± 0,0	3,5 ± 0,2	34,0	56,6	42	224 ± 26	5,3 ± 0,4	4,1 ± 0,3	3,2 ± 0,3

^aCE: conductividad eléctrica, medida en proporción 1/2,5 (mV); ^bCIC: capacidad de intercambio catiónico; ^cCO: carbono orgánico; ^dLas unidades de la actividad deshidrogenasa se expresan en µg INTF g⁻¹h⁻¹ y ^elas de la respiración de los suelos en mg CO₂ h⁻¹ 100 g⁻¹

Tabla 1. Algunas propiedades fisicoquímicas y bioquímicas (promedio ± desviación estándar) del suelo externo de la cueva de Nerja.

tales para los suelos situados en las áreas cercanas a la entrada a la cueva donde los valores de SiO₂ son los más altos y varían entre 31,8% y 35,1% mientras que NS-INM presenta el valor más bajo (< 20%). Se observa una relación inversa entre los contenidos de SiO₂ y Al₂O₃ y los contenidos en CaO y MgO, que son relativamente elevados. Se ha establecido una relación significativa ($P = 7 \times 10^{-6}$) entre los contenidos en óxidos de Ca y Mg ($MgO = 2,93 + 0,39 * CaO$; $R^2 = 0,995$).

Los resultados obtenidos tras la caracterización de la composición mineral y geoquímica del suelo externo, permiten concluir que se trata de un suelo homogéneo, y pobremente diferenciado, con un escaso espesor, y sin horizontes edáficos bien definidos (litosol), donde aflora mayoritariamente el sustrato geológico correspondiente a mármoles dolomíticos triásicos. Únicamente se puede hablar de un horizonte edáfico, más o menos antropizado y escasamente desarrollado en las áreas cercanas a la entrada de la cueva, donde se alcanzan altos contenidos en materia orgánica y tonalidades de marrones oscuros.

En estas áreas el mayor grado de humedad y contenido en CO deriva de la existencia de cobertura vegetal. El sistema poroso del suelo determina el movimiento de fluidos (agua líquida, vapor de agua, sales en solución, etc.). Este suelo sensible a los cambios ambientales externos va a condicionar los intercambios gaseosos entre la cueva y el exterior.

Suelo	Dolomita (%)	Cuarzo (%)	Filosilicatos (%)	Feldspatos (%)
NS-BE	28	23	49	<1
NS-CAS	26	22	51	<1
NS-CAT	39	22	38	<1
NS-HE	72	8	15	4-5
NS-INM	69	7	23	<1
NS-MO	63	12	24	<1

Tabla 2. Análisis mineralógico del suelo externo de la cueva de Nerja.

Suelo	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)
NS-BE	33,2	17,7	6,6	0,18	4,8	5,1	0,24	1,8	0,77	0,30
NS-CAS	35,1	18,1	6,3	0,15	5,4	5,7	0,25	1,9	0,78	0,43
NS-CAT	31,8	15,5	5,2	0,15	6,1	8,7	0,26	1,6	0,68	0,20
NS-HE	23,6	12,1	3,7	0,13	9,3	16,3	0,20	1,1	0,49	0,20
NS-INM	17,9	9,3	2,8	0,10	10,6	19,8	0,17	0,77	0,36	0,16
NS-MO	25,5	12,9	4,1	0,15	8,5	14,4	0,20	1,1	0,52	0,24

Tabla 3. Composición de elementos mayores del suelo externo de la cueva de Nerja.

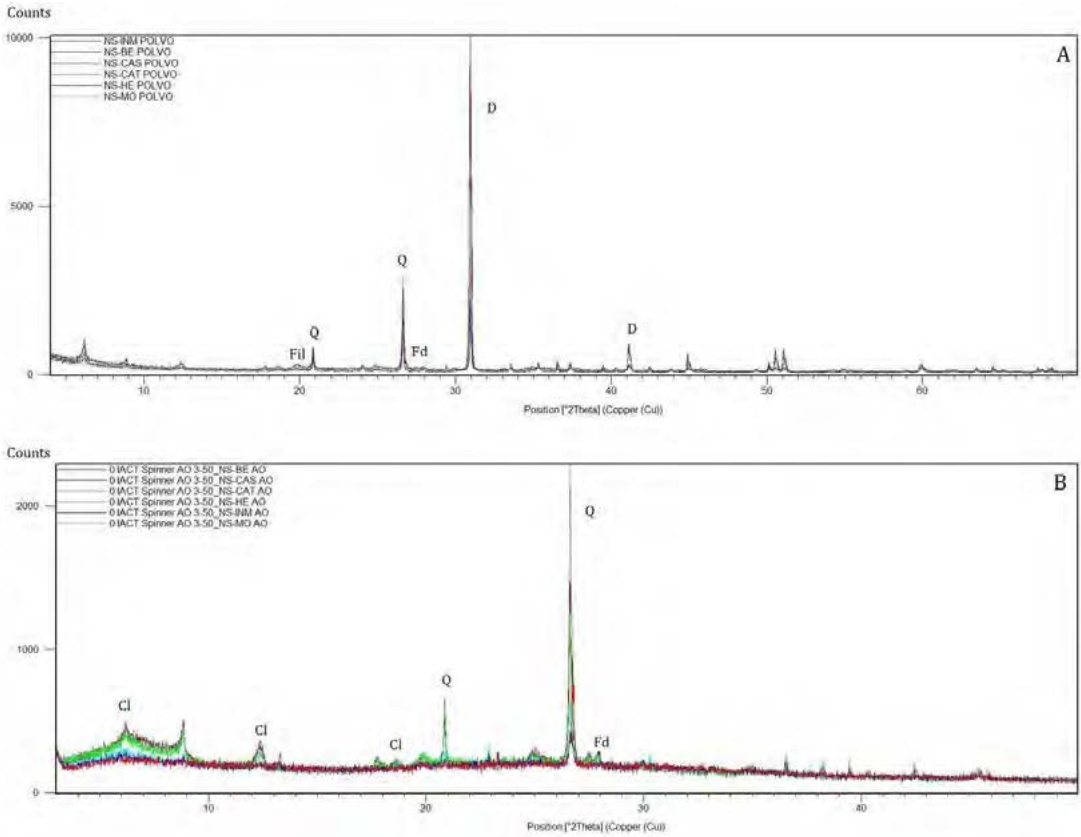


Figura 3. Difractogramas de: A) muestra total de los suelos de la cueva de Nerja y B) de la fracción arcilla.

El análisis de la textura o distribución de las partículas minerales también aporta información sobre las propiedades hídricas de los suelos. La textura es una propiedad muy estable en los suelos, mientras que la estructura y la cantidad y tipo de materia orgánica, que también influyen en las propiedades hídricas, son propiedades que pueden variar a corto y medio plazo (lluvias intensas, cambios en la vegetación, puesta en cultivo de los suelos etc.). En general, se puede afirmar que, 1) cuanto mayor es el tamaño de las partículas más rápida es la infiltración y menor es el agua retenida por los suelos (los suelos arenosos son más permeables y retienen menos agua que los arcillosos); 2) los suelos con buena estructura tienen mayor velocidad de infiltración que los compactados; 3) el mayor contenido en materia orgánica aumenta el agua retenida por el suelo; y 4) a mayor espesor del suelo mayor capacidad de retener agua.

Los resultados indican que los suelos con mayor contenido en arcilla son los situados en la parte más baja, cercanos a la entrada de la cueva (NS-BE y NS-CAS), seguidos por NS-CAT, en la zona de ladera. Todos ellos presentan un contenido en arcilla > 31% mientras que, para los más alejados, este oscila entre 20 y 28%, con un alto contenido en limo (\approx 50%). De acuerdo a la distribución de partículas de la fracción fina la textura de los suelos es franco arcillosa para NS-MO y NS-CAT, franco-limoso para NS-HE y NS-INM, y franco-arcillo-limoso y arcillo-limoso para los

dos suelos con mayor contenido en arcilla, NS-CAS y NS-BE. La capacidad de intercambio catiónico está relacionada de forma significativa con el contenido en arcilla ($P = 0,0004$) mediante la ecuación $CIC = -7,6 + 0,65 * \text{arcilla}$ ($R^2 = 0,961$). Esto era de esperar porque la CIC de un suelo varía según el contenido en arcilla, el tipo de arcilla, el pH y el contenido en CO (Hazelton y Murphy, 2007). También se constata una relación significativa entre el contenido en arcilla y la capacidad de retención de agua ($P < 0,05$) ($\text{humedad} = 9,4 + 1,5 * \text{arcilla}$; $R^2 = 0,644$).

Análisis estadístico

El análisis de componentes principales, que explica el 94,1% de la varianza, se llevó a cabo con nueve variables que se muestran en la figura 4, donde se han agrupado de acuerdo a un análisis clúster, considerando una distancia euclidiana < 3 .

En el CP1, que explica el 75,1% de la varianza observada, se agrupan con valores positivos el CO (0,970), la capacidad de retención de agua (0,932), y la respiración a 2 h (0,946) y también, con menor puntuación, la conductividad (0,743). La respiración del suelo aumenta con el contenido en CO, que también está relacionado con la capacidad de retención de agua, ya que un aumento en CO genera un incremento en la porosidad de suelo. Del mismo modo, el contenido en CO se relaciona con la conductividad, por la presencia de iones orgánicos solubles. Por otro lado se incluyen el contenido en arcillas (0,971) y la capacidad de intercambio catiónico (0,986),

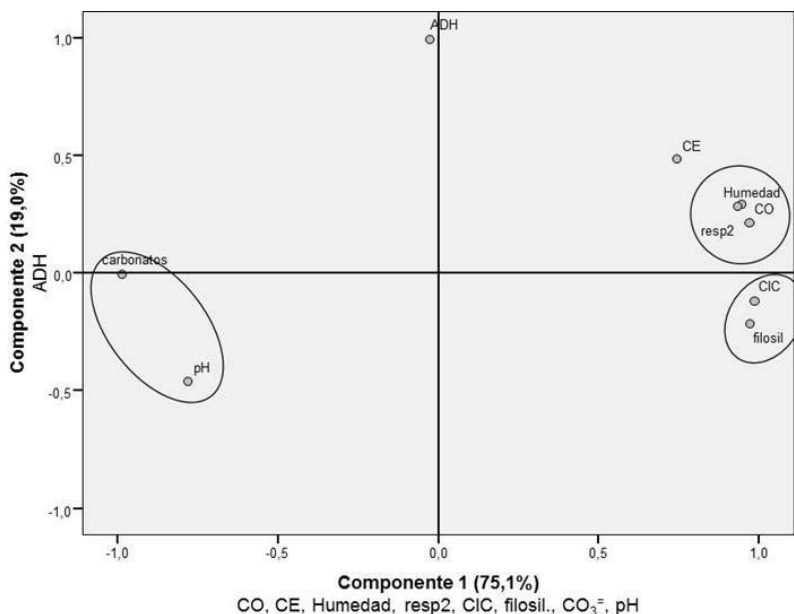


Figura 4. Análisis de componentes principales. Las propiedades se agruparon de acuerdo a los resultados obtenidos de un análisis clúster jerárquico. CE: conductividad eléctrica; CO: carbono orgánico; resp2: respiración a 2 h; CIC: capacidad de intercambio catiónico; filosil: filosilicatos; ADH: actividad deshidrogenasa.

propiedades del suelo íntimamente relacionadas, ya que la CIC de un suelo varía principalmente según el contenido y el tipo de arcilla. Con puntuaciones negativas se encuentran los carbonatos (-0,946) y el pH (-0,782), lo que es lógico dado que en los suelos más carbonatados el contenido en CO o en filosilicatos es menor (tabla 1). Ambas propiedades, carbonatos y pH, están muy relacionadas, porque a medida que aumenta el contenido en carbonatos, lo hace también el carácter básico del suelo.

El CP2, que explica el 19,0% de la varianza, solo incluye la actividad deshidrogenasa (0,993). Aunque generalmente la actividad deshidrogenasa se relaciona con el contenido en CO, los suelos NS-BE y NS-CAS, situados bajo los pinos, pudieran considerarse como ecosistemas forestales, para los que la actividad deshidrogenasa no sigue las mismas tendencias que el resto de suelos, viéndose más limitada la actividad de los microorganismos del suelo por la disponibilidad de nutrientes o por la relación C/N que por la disponibilidad de C (Quilchano y Marañón, 2002).

Conclusiones

Los suelos situados sobre la cueva de Nerja se agrupan en función de la distancia a la entrada de la cavidad. Por un lado, los suelos más antropizados, cercanos a la entrada de la cavidad y, por el otro, los suelos más distales. En el primer grupo, el contenido en arcilla y CO, así como muchas propiedades relacionadas como la conductividad, la capacidad de retención de agua, la capacidad de intercambio catiónico y la liberación de CO₂, son más elevados. Por el contrario, en los suelos más distales de la entrada, el contenido en carbonatos y el pH son más altos. La composición química y mineralógica es muy similar en todos los suelos como corresponde a suelos muy homogéneos, pobremente diferenciados, con escaso espesor y sin horizontes edáficos bien definidos. Es de esperar sin embargo, que las diferencias observadas, generadas mayoritariamente por la presencia de cobertera vegetal en las zonas ajardinadas, afecten a la composición y al volumen de agua que se infiltra en la cavidad. Esto a su vez, se puede reflejar en el material que precipita en el interior de la cueva el cual se verá afectado por una mayor participación de la actividad orgánica en estas áreas.

Agradecimientos

Este trabajo procede de los estudios desarrollados por el área de Geología del Proyecto General de Investigación Interdisciplinar de la cueva de Nerja, dirigido expresamente a la conservación de la cavidad. El proyecto está financiado por la Fundación Pública de Servicios Cueva de Nerja, coordinado desde su Instituto de Investigación y autorizado por la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía.

Referencias

- Andreo, B., Carrasco, F. y Sanz de Galdeano, C. 1993. Estudio geológico del entorno de la Cueva de Nerja. En: *Trabajos sobre la Cueva de Nerja, 3. Geología de la Cueva de Nerja* (F. Carrasco, Ed.), 25-50.
- Arrese, B. 2009. *Geomorfología, evolución geológica y condiciones ambientales actuales de la Cueva de Nerja, Málaga*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid, 304.

- Avidad, J. y García Dueñas, V. 1980. *Mapa geológico a escala 1:50.000*, Hoja nº 1055 (Motril), I.G.M.E., Memoria explicativa 36.
- Benavente, J., El Mabrouki, K., Molina, J.M., Vadillo, I., Liñán, C., Simón, M. y Carrasco, F. 2006. Determinación experimental del contenido en CO₂ del suelo sobre una cavidad kárstica en clima mediterráneo (Cueva de Nerja, Málaga). *Geogaceta* 39, 95-98.
- Elorza, J.J. y García-Dueñas, V. 1980. *Mapa geológico a escala 1:50.000*, Hoja nº1054 (Vélez-Málaga), I.G.M.E. Memoria explicativa, 59.
- García, C., Hernández, T. y Costa, F. 1997. Potential use of dehydrogenase activity as an index of microbial activity in degraded soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 28, 123-134.
- Hazelton, P.A. y Murphy, B.W. 2007. *Interpreting Soil Test Results: What Do all the Numbers Mean?* CSIRO Publishing: Melbourne.
- Meier, L.P. y Kahr, G. 1999. Determination of the cation exchange capacity (CEC) of clay minerals using the complexes of copper (II) ion with triethylenetetramine and tetraethylenepentamine. *Clays and Clay Minerals* 47, 386-388.
- Mingorance, M.D., Barahona, E. y Fernández-Gálvez, J. 2007. Guidelines for improving organic carbon recovery by the wet oxidation method. *Chemosphere* 68, 409-413.
- Mingorance, M.D. y Peña, A. 2016. A methodological approach to measure soil respiration. *Journal of Geochemical Exploration* 169, 187-191.
- Quilchano, C. y Marañón, T. 2002. Dehydrogenase activity in Mediterranean forest. *Biology and Fertility of Soils* 35:102-107.
- Sanz de Galdeano, C. 1986. Structure et stratigraphie du secteur oriental de la Sierra Almijara (Zone Alpujarride, Cordillères Bétiques). *Estudios Geológicos* 42, 281-289.
- Sanz de Galdeano, C. 1990. Estructura y estratigrafía de la Sierra de los Guájares y sectores próximos (Conjunto Alpujarride, Cordilleras Béticas). *Estudios Geológicos* 46, 123-134.

R. Morales García, et al., 2018. Estudio hidroquímico de las aguas endokársticas de la cueva de s'Aigo, Ciutadella (Menorca). En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 55-68.

Estudio hidroquímico de las aguas endokársticas de la cueva de s'Aigo, Ciutadella (Menorca)

R. Morales García⁽¹⁾, J.J. Durán Valsero⁽¹⁾ y P.A. Robledo Ardila⁽²⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. Departamento de Investigación en Recursos Geológicos. C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España. r.morales@igme.es; jj.duran@igme.es

(2) Instituto Geológico y Minero de España. Unidad Territorial de Baleares. C/ Felicità Fuster, nº7, 07007 Palma de Mallorca, Baleares, España. pa.robledo@igme.es

RESUMEN

La cueva de s'Aigo forma parte de un conjunto de cavidades localizadas en el entorno de Cala Blanca, al sur de Ciutadella, en la isla de Menorca. Desde el punto de vista hidrogeológico, presenta como característica destacada un lago interior dividido en dos zonas por un caos de bloque, que representa el nivel freático del acuífero. A pesar de las distintas exploraciones e investigaciones que se han efectuado en la cueva hasta la fecha, no se han realizado análisis químicos que documenten las características y la composición química de las aguas de la misma. En este trabajo se presentan los primeros resultados de la caracterización hidroquímica realizada dentro del estudio integral de los aspectos geoambientales que está realizando el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en colaboración con el Consell Insular de Menorca (CIM), con objeto de evaluar la posible habilitación turística de la cueva de s'Aigo. Se han llevado a cabo dos campañas de muestreo (25/07/2017 y 23/03/2018), en las cuales se han tomado siete muestras de agua de la cueva. Tres muestras corresponden a la zona no saturada del acuífero (goteos activos), mientras que el resto proceden del lago y representan el agua freática. Las primeras presentan una mineralización más débil, aunque relativamente alta para estar en la zona no saturada, con más de 1 g/L, y una facies hidroquímica clorurada sódica-cálcica, en tanto que las segundas alcanzan una mineralización mucho más elevada, entre 7 y 15 g/L, y una facies hidroquímica netamente clorurada-sódica. En una de las muestras del lago se ha detectado la presencia de triclorometano, en pequeñas cantidades, sin que se haya podido establecer su origen y procedencia.

Palabras clave: acuífero kárstico, hidroquímica, lago subterráneo, masa de agua subterránea de Ciutadella, zona no saturada.

Hydrochemical study of the endokarstics waters of the de s'Aigo cave, Ciutadella (Menorca)

ABSTRACT

The de s'Aigo cave is part of a group of cavities located in the northern of Cala Blanca, south of Ciutadella, on the island of Menorca. From the hydrogeological point of view, one of the main characteristic is an endokarstic lake, divided in two zones by a break down rocks, which represents the water table of the area. In spite of the different explorations and investigations that have been carried out in the cave to date, no chemical analyzes have been carried out that document the characteristics and chemical composition of the waters of the cave. This paper presents the first results of the hydrochemical characterization carried out in the integral study of the geo-environmental aspects, which is being carried out by the Geological and Mining Institute of Spain (IGME) for the Insular Council of Menorca (CIM), in order to evaluate the possible tourist rating of the s'Aigo cave. Two sampling campaigns (25/07/2017 and 03/23/2018) have been carried out, in which seven water samples have been taken from the cave. Three correspond to the unsaturated zone of the aquifer (active drips), while five come from the lake and represent groundwater. The former have a weaker mineralization,

although relatively high to be in the unsaturated zone, with more than 1 g/L, and a chloride-calcium-sodium facies, while the latter reach a much higher mineralization, between 7 and 15 g/L, and a chloride-sodium facies. In one of the samples of the lake the presence of trichloromethane has been detected, in small quantities, without its origin being known.

Keywords: groundwater body of Ciutadella, hydrochemistry, karstic aquifer, non saturated zone, underground lake.

Introducción

La cueva de s'Aigo se encuentra situada en la isla de Menorca, bajo la urbanización Cala Blanca, muy próxima al mar. La localidad de Cala Blanca se ubica al oeste de la isla, en el término municipal de Ciutadella, a unos 2,5 km al sur de esta ciudad (figura 1).

Se trata de un sector de costa acantilada y calas de gran atractivo turístico donde el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) está realizando en colaboración con el Consell Insular de Menorca (CIM), un estudio integral de los aspectos geoambientales de la cueva de s'Aigo, y otras cuevas cercanas, con objeto de evaluar su posible rehabilitación turística.

La cueva de s'Aigo se encuentra bastante modificada por la acción del hombre al haber sido acondicionada antiguamente para las visitas turísticas, aunque en los últimos años ha permanecido cerrada. Se trata de una cueva de dimensiones razonables, con un lago interior y una cierta

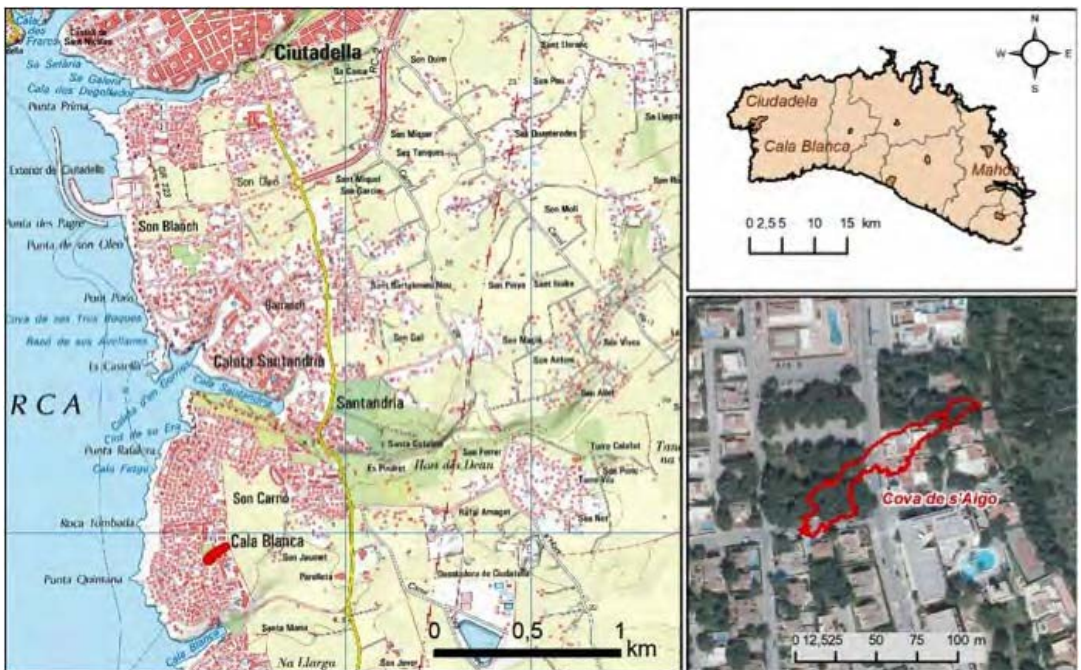


Figura 1. Situación de la cueva de s'Aigo en la urbanización de Cala Blanca (Ciutadella, Menorca).

cantidad y variedad de espeleotemas, con más de 100 m de longitud de galerías. Fue explorada por primera vez en el año 1955 por el equipo de Búsquedas Espeleológicas del Centro Excursionista de Cataluña (CEC), con la colaboración de aficionados locales. Durante estas exploraciones se recuperaron algunas cerámicas talayóticas y clásicas, así como restos óseos humanos que se depositaron en el ayuntamiento de Ciutadella para su museo municipal. En la actualidad, se ha realizado el levantamiento topográfico detallado de la planta de la cueva y de las secciones transversales a la dirección principal de la cavidad (IGME y CIM, 2017).

Marco geológico e hidrogeológico

Menorca es la isla más nororiental del archipiélago balear, que constituye la parte emergente del denominado Promontorio Balear en el Mediterráneo occidental. Desde el punto de vista geológico, la isla de Menorca se compone de dos regiones bien diferenciadas: la región de Tramuntana, al norte, formada de materiales paleozoicos (esquistos del Silúrico, calizas del Devónico, turbiditas siliciclásticas del Carbonífero y areniscas y pelitas rojas del Pérmico), materiales del Mesozoico (areniscas y dolomías del Triásico y Jurásico y calizas del Cretácico) y rocas del Terciario inferior; y la región de Migjorn al sur, compuesta por rocas carbonáticas del Mioceno superior que de forma discordante recubren el sustrato Paleozoico, Mesozoico y Paleógeno (Pomar *et al.*, 2002) (figura 2).

Las rocas miocenas superiores (Tortonense inferior a Messiniense) de la región de Migjorn presentan una disposición subhorizontal. Localmente, la sucesión del Mioceno superior se apoya sobre sedimentos del Mioceno medio (Obrador *et al.*, 1983, y 1992), conglomerados y calcarenitas de origen bioclástico.

La cueva de s'Aigo, se desarrolla en materiales que pertenecen al Mioceno superior, del denominado Complejo Arrecifal, compuesto por sedimentos calcareníticos de grano grueso, bioclastos, rodolitos, fragmentos de corales y algas rodofíceas, equínidos y moluscos.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la cueva de s'Aigo se ubica en la Masa de Agua Subterránea (MAS) de Ciutadella (ES110MSBT1901M3) compuesta litológicamente por los materiales miocenos descritos que constituyen un acuífero libre y costero (figura 3). En esta masa de agua las cotas de los niveles piezométricos presentan poca variación interanual, con una depresión de los niveles más importante en los pozos de abastecimiento cercanos a la localidad de Ciutadella. No obstante, hay que destacar que los niveles freáticos son coincidentes en la mayoría de las cavidades con el nivel del mar. Las profundidades de niveles freáticos en este sector están entre los 14 y los 9 m. Los valores máximos registrados en ion cloruro durante 2014 fueron de 2.550 mg/L (Robledo, 2014; García *et al.*, 2014), lo que indica presencia de agua salobre consecuencia de la intrusión de agua de mar. La evolución interanual muestra un aumento del valor promedio de 6 mg/L, consecuencia del incremento puntual del valor máximo registrado en los pozos de Es Caragolí, utilizados para el abastecimiento a la localidad de Ciutadella, relativamente próximos a la zona donde se ubican las cavidades. Por el contrario, los valores de nitratos en este sector no superan los 40 mg/L (Robledo, 2014; García *et al.*, 2014), lo que indica poca actividad agraria en la zona, por otro lado, propia de estos entornos de la isla.

La facies hidroquímica predominante es mixta, de tipo bicarbonatada-clorurada sódico-cálcica

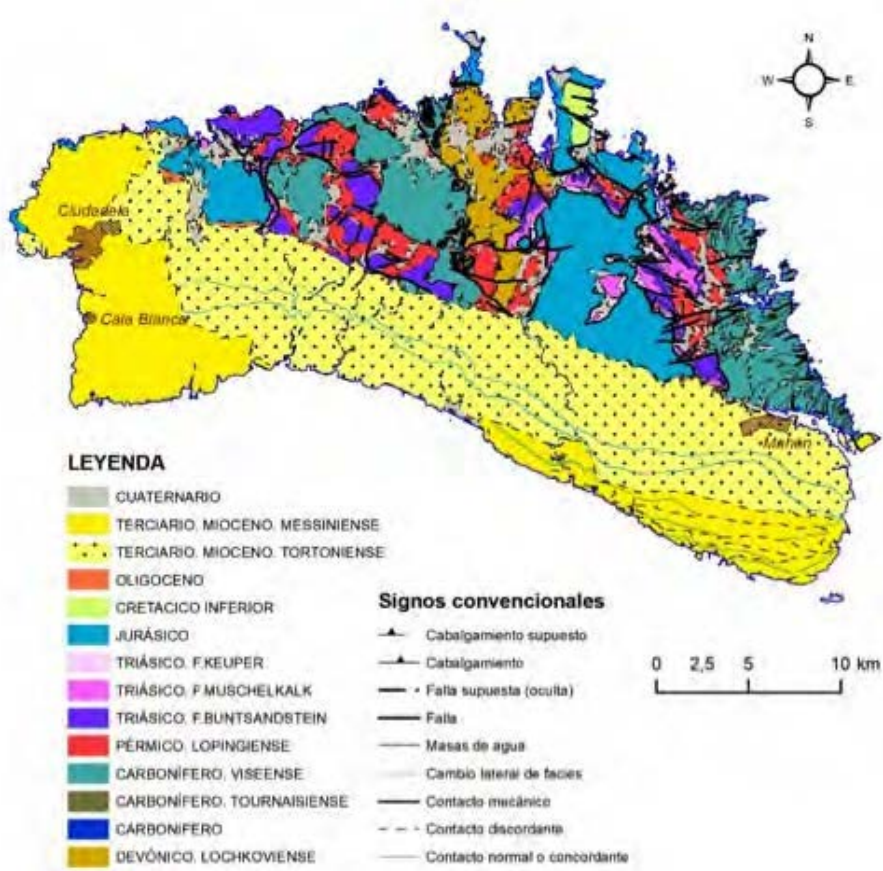


Figura 2. Mapa geológico de la isla de Menorca. Fuente: GEODE/IGME.

en toda la masa de agua subterránea, si bien debido a la fuerte salinización por intrusión marina en el sector occidental, en los alrededores de Ciutadella, existen zonas con facies netamente cloruradas sódicas (López García y Cantón Avila, 2012).

Metodología de estudio

Para la caracterización hidroquímica de la cueva de s'Aigo, se han llevado a cabo dos campañas de muestreo (julio de 2017 y marzo de 2018), durante las cuales se han tomado en total siete muestras de agua subterránea de la cueva. Tres corresponden a la zona no saturada del acuífero (goteos activos), mientras que el resto proceden del lago y otros lugares equivalentes que representan el agua freática del acuífero. La situación de los puntos donde se han tomado las muestras dentro de la cueva puede verse en la figura 4.

En las muestras de agua procedentes de la primera campaña de muestreo se ha realizado un



Figura 3. Distribución de las Masas de Agua Subterránea en la isla de Menorca.

análisis químico normal. En el agua freática se han determinado además, los metales. El análisis químico normal comprende un análisis químico de 16 determinaciones (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO_4 , HCO_3 , CO_3 , NO_3 , NO_2 , NH_4 , PO_4 , SiO_2 , Oxidabilidad al MnO_4K , Conductividad eléctrica a 20 °C y pH), más Residuo Seco a 180 °C, materias en suspensión, Carbono Orgánico Total y Turbidez. El análisis de metales incluye la determinación de 23 elementos (Ag, Al, As, Bo, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Th, Tl, U, V y Zn), mediante el método de ICP-MS. En las muestras de agua de la segunda campaña, además del análisis químico normal, se han determinado metales, compuestos orgánicos volátiles (COV), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), detergentes y plaguicidas, tanto en el agua freática como en el agua de goteo de la zona no saturada. Todas estas determinaciones analíticas se han llevado a cabo en los laboratorios del IGME en Tres Cantos (Madrid), tras el adecuado envasado, etiquetado, conservación y transporte al citado laboratorio. Los principales resultados analíticos de ambas campañas se muestran en las tablas 1 y 2.

Resultados hidroquímicos

Desde el punto de vista hidroquímico, las muestras de agua analizadas presentan características químicas diferenciadas. En el diagrama de Piper (figura 5) y en los diagramas de Stiff representados en el mapa de la figura 7, se observan dos grupos composicionales sensiblemente dife-

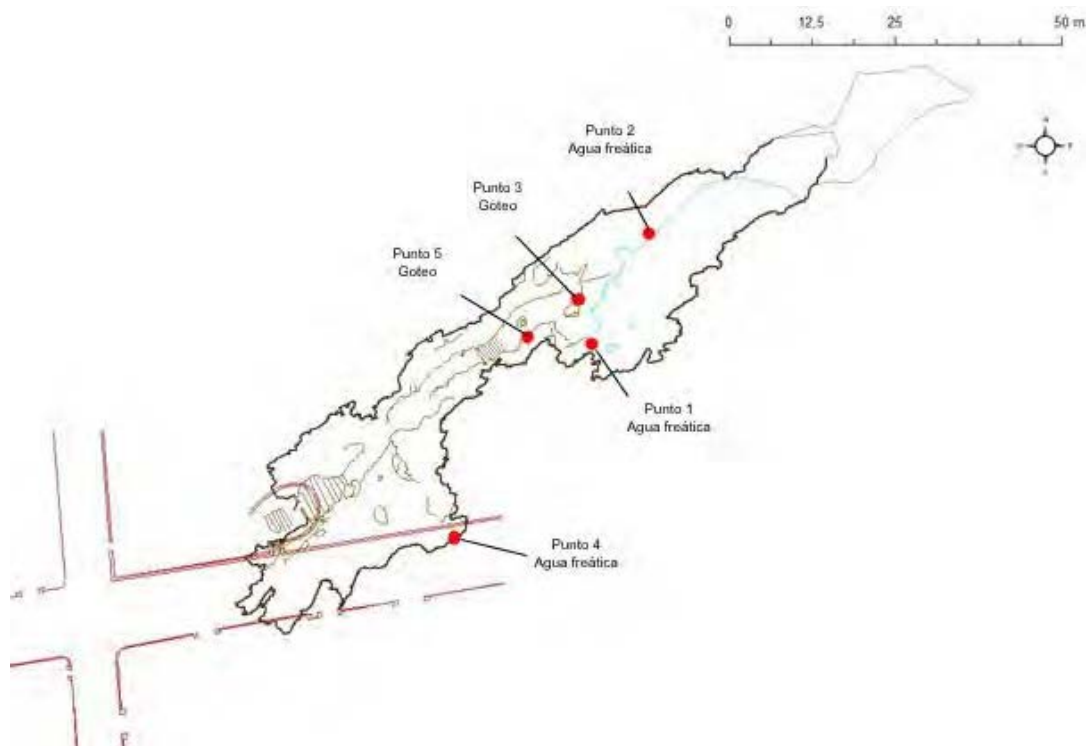


Figura 4. Situación de los puntos de muestreo de las aguas subterráneas en la cueva de s'Aigo.

rentes. Las aguas freáticas presentan facies netamente cloruradas sódicas, con una fuerte mineralización y valores de conductividad eléctrica que oscilan entre 10.000 y 22.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que las aguas de la zona no saturada (goteos) presentan facies clorurada sódica-cálcica (con facies secundaria bicarbonatada en la muestra tomada en marzo de 2018) con una mineralización mucho más débil, con valores de 1.500 a 1.800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cabe destacar, que las aguas de goteo presentan una mineralización inusualmente alta para proceder de una infiltración del agua de lluvia con un periodo de tránsito muy rápido, ya que la zona no saturada del acuífero, es decir, el espesor de roca por encima de la cueva, no supera los 15 m, según la topografía realizada recientemente (CIM e IGME, 2017).

En la composición de las aguas del lago (tabla 1), destaca la elevada mineralización (residuo seco entre 7,2 y 15,4 g/L), y los elevados contenidos en Cl (3.860-9.100 mg/L), SO_4 (440-1.060 mg/L), Na (2.339-5.463 mg/L), K (74-143 mg/L), Mg (180-550 mg/L) y Ca (180-308 mg/L). Contienen una cantidad importante de nitratos (39-44 mg/L), aunque sin presencia de nitritos, amonio ni materia orgánica oxidable (no se detecta DQO).

En la composición del agua de goteo (tabla 1), destaca también la relativamente elevada mineralización (residuo seco entre 1,1 y 1,3 g/L), y los contenidos en Cl (326-498 mg/L) y Na (226-326 mg/L). El contenido en nitratos es bajo (6-15 mg/L), sin presencia de nitritos ni amonio, pero

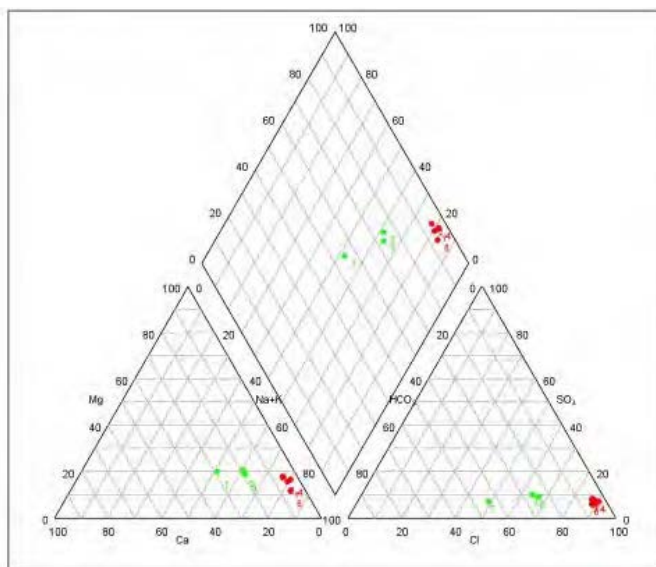
Nº punto	Nombre Muestra Completo	FECHA	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	SO4 (mg/L)	HCO3 (mg/L)	NO3 (mg/L)	NO2 (mg/L)	NH4 (mg/L)	PO4 (mg/L)	SiO2 (mg/L)	DQO (mg/L)	C.E. 20° (µS/cm)	pH
1	CSA-01 Entrada al lago	25/07/17	2339	74	180	224	3860	530	288	43	0,00	0,00	0,00	9	nsd	10180	7,96
2	CSA-02 lateral SW del lago	25/07/17	2489	78	216	280	4240	550	294	44	0,00	0,00	0,00	8,9	nsd	10930	7,65
4	CSA-04 fondo perfil	26/07/17	5463	143	308	550	9100	1060	340	39	0,00	0,00	0,27	6,5	nsd	21640	7,57
3	CSA-03 goteo	26/07/17	326	9	98	48	498	114	338	15	0,00	0,00	0,00	9,8	1,9	1700	7,65
5	CSA-05 goteo 2	26/07/17	273	7	85	46	450	90	271	9	0,00	0,00	0,00	12,4	1,9	1560	7,5
1	CSA-01 Entrada al lago	23/03/18	2678	96	220	180	4320	440	400	39	0,00	0,00	0,26	9,6	nsd	14000	7,37
5	CSA-05 goteo 2	23/03/18	226	8	122	44	326	70	490	6	0,00	0,00	0,00	9,1	2,2	1800	7,34
Norma sanitaria actual (2003). Partes A y B																	
Norma sanitaria actual (2003). Parte C - Parámetros indicadores																	
RTS de 1990. Concentración máxima admisible																	
RTS de 1990. Niveles guía																	

Tabla 1. Jones mayoritarios y parámetros fisico-químicos de las aguas subterráneas de la cueva de s'Aigo. Se incluye sobre cada parámetro, el valor de la concentración máxima de referencia para consumo humano, con un código de colores y se marcan con sombreado aquellos valores que superan dichos parámetros (nsd: no se detecta).

N° punto	Nombre Muestra Completo	FECHA	10 µg/L	200 µg/L	10 µg/L	1000 µg/L	100 µg/L	5 µg/L	50 µg/L	2000 µg/L	200 µg/L	1 µg/L	50 µg/L	Mo (µg/L)
			Ag (µg/L)	Al (µg/L)	As (µg/L)	Boro (µg/L)	Ba (µg/L)	Be (µg/L)	Cr (µg/L)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	Hg (µg/L)	Mn (µg/L)	
1	CSA-01 Entrada al lago	25/07/2017	< 0,5	< 10	0,58	< 1000	24,7	< 0,5	0,82	2,63	< 150	< 5	< 5	< 2
2	CSA-02 lateral del lago	25/07/2017	< 0,5	14	0,61	< 1000	26,4	< 0,5	0,78	< 2	< 150	< 5	< 5	< 2
4	CSA-04 fondo perfil	26/07/2017	< 1	50,2	< 1	< 2000	23,8	< 1	< 1	< 4	< 300	< 10	< 10	< 4
1	CSA-01 Entrada al lago	23/03/2018	nsd	13,8	< 0,5	< 1000	26,1	nsd	nsd	< 0,5	< 150	< 5	< 5	< 2
5	CSA-05 goteo 3	23/03/2018	nsd	1,34	0,09	106	16,5	nsd	< 0,05	0,21	< 15	nsd	< 0,5	< 0,2

N° punto	Nombre Muestra Completo	FECHA	20 µg/L	10 µg/L	5 µg/L	10 µg/L	5000 µg/L	5 µg/L	U (µg/L)	V (µg/L)	Zn (µg/L)	
			Ni (µg/L)	Pb (µg/L)	Sb (µg/L)	Se (µg/L)	Th (µg/L)	Ti (µg/L)				
1	CSA-01 Entrada al lago	25/07/2017	< 5	< 2	< 0,5	< 5	< 0,5	< 0,5	1,17	1,32	< 10	
2	CSA-02 lateral del lago	25/07/2017	< 5	< 2	< 0,5	< 5	< 0,5	< 0,5	1,2	1,32	< 10	
4	CSA-04 fondo perfil	26/07/2017	< 10	< 4	< 1	< 10	< 1	< 1	1,77	1,44	31,8	
1	CSA-01 Entrada al lago	23/03/2018	< 5	< 2	nsd	< 5	nsd	nsd	1,06	1,53	35,5	
5	CSA-05 goteo 3	23/03/2018	< 0,5	< 0,2	nsd	0,81	nsd	nsd	0,52	0,44	1,14	
	Norma sanitaria actual (2003). Partes A y B											
	Norma sanitaria actual (2003). Parte C - Parámetros indicadores											
	RTS de 1990. Concentración máxima admisible											
	RTS de 1990. Niveles guía											

Tabla 2. Metales de las aguas subterráneas de la cueva de s'Aigo. Se incluye, sobre cada parámetro, el valor de la concentración máxima de referencia para consumo humano, con un código de colores y se marcan con sombreado aquellos valores que superan dichos parámetros (nsd: no se detecta).



Nº	Muestra	Fecha	Facies hidroquímica	
			Anionica	Cationica
1	Punto 1. Entrada al lago	Julio-17	Cl	Na
2	Punto 2. Lateral del lago	Julio-17	Cl	Na
3	Punto 3. Goteo 1	Julio-17	Cl	Na Ca
4	Punto 4. Fondo perfil	Julio-17	Cl	Na
5	Punto 5. Goteo 2	Julio-17	Cl	Na Ca
6	Punto 1. Entrada al lago	Marzo-18	Cl	Na
7	Punto 5. Goteo 3	Marzo-18	Cl HCO3	Na Ca

Figura 5. Diagrama de Piper y facies hidroquímicas de las aguas muestreadas en la cueva de s'Aigo. Se representan en rojo las aguas freáticas y en verde las aguas de la zona no saturada.

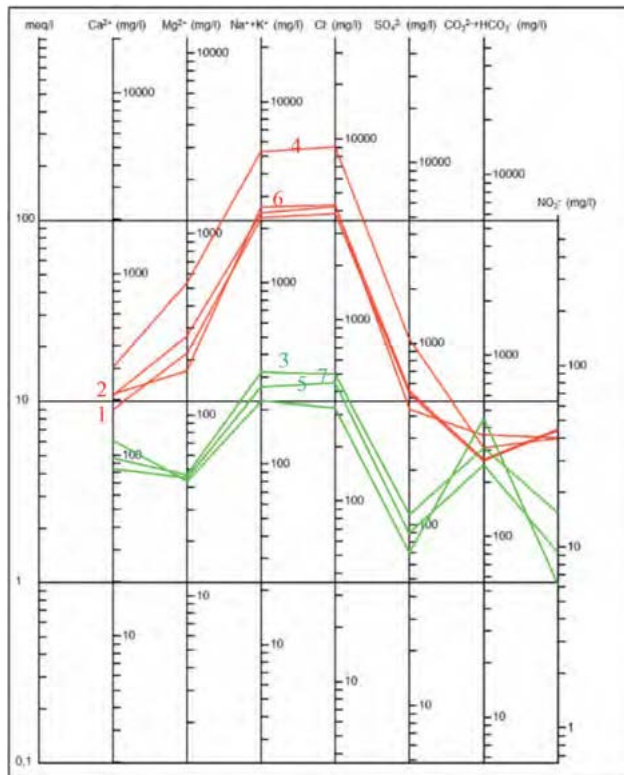
presentan una cierta cantidad de materia orgánica oxidable (DQO entre 1,9 y 2,2 mg/L), lo que puede indicar un indicio de contaminación derivada de la situación de la cueva, en un medio urbano.

Aunque solo se dispone de dos campañas de muestreo, la evolución temporal de las muestras del agua freática (muestras 1 y 6) y del goteo (muestras 5 y 7) no refleja una variación composicional sustancial, sólo la muestra 4 presenta una mayor mineralización, aunque en este punto no se ha efectuado el muestreo en la segunda campaña (figura 6).

Espacialmente, se observa una diferenciación entre las aguas freáticas del interior de la cueva (figura 7). La muestra tomada en el lateral de la cueva (punto 4), en un pequeño hueco que coincide también con el nivel freático, presenta una mineralización de casi el doble (C.E. 21.640

μS/cm) que las muestras tomadas directamente del agua del lago (puntos 1 y 2). Esta mayor mineralización puede ser debida a que se trate de un agua sometida a mayor evaporación o al gradiente de salinización normal, por estar ligeramente más próxima al mar, hecho que puede ser coherente con que en toda la zona existe una fuerte salinización por intrusión marina, ya citada anteriormente en los alrededores de Ciutadella.

Con respecto al contenido en metales (tabla 2), en ninguna de las muestras analizadas se detecta,

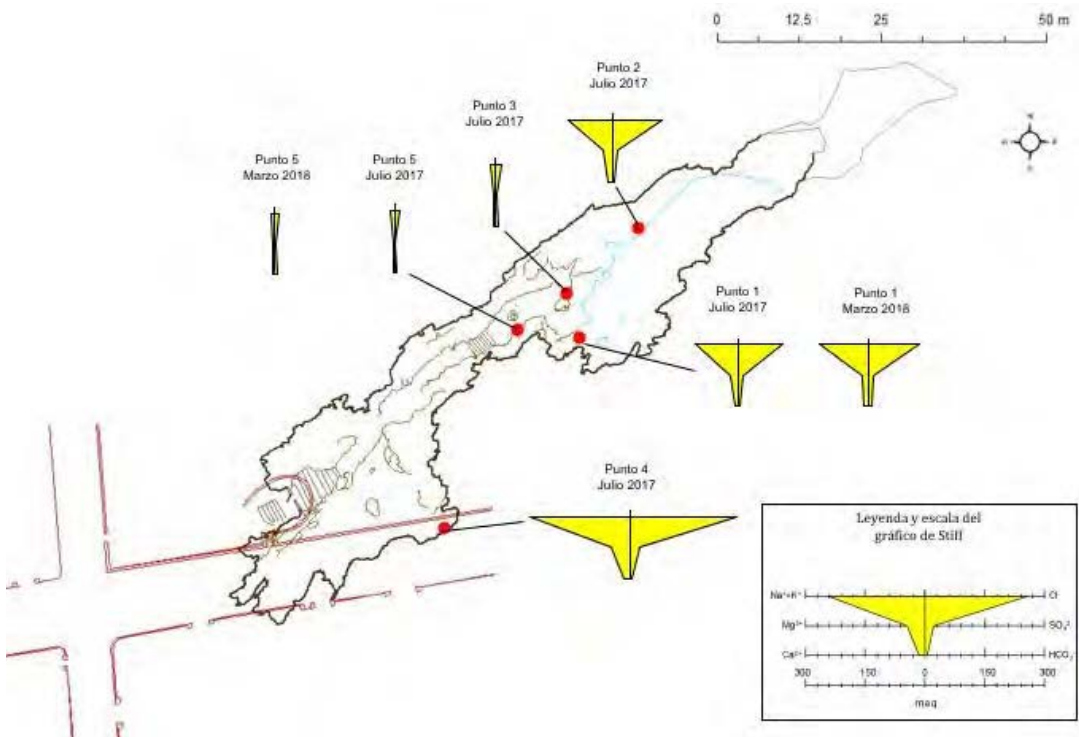


Nº	Muestra	Fecha
1	Punto 1. Entrada al lago	Julio-17
2	Punto 2. Lateral del lago	Julio-17
3	Punto 3. Goteo 1	Julio-17
4	Punto 4. Fondo perfil	Julio-17
5	Punto 5. Goteo 2	Julio-17
6	Punto 1. Entrada al lago	Marzo-18
7	Punto 5. Goteo 3	Marzo-18

Figura 6. Diagrama de Schoeller-Berkaloff modificado de las aguas muestreadas en la cueva de s'Aigo. Se representan en rojo las aguas freáticas y en verde las aguas de la zona no saturada.

o el valor está por debajo del límite de detección del método, presencia de Ag, Be, Cd, Co, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Th y Tl; mientras que todas las muestras contienen pequeñas concentraciones de Ba, U y V, siendo siempre inferior la concentración de estos elementos en el agua de goteo. Además, las aguas del lago presentan bajas concentraciones de Al, As, Cr, Cu y Zn, destacando un valor máximo un tanto elevado de Al (50 $\mu\text{g/L}$) en la muestra del punto 4 en julio de 2017 y otro máximo de Zn (35,5 $\mu\text{g/L}$) en la muestra del punto 1 en marzo de 2018, si bien todas las concentraciones están muy por debajo de los límites de potabilidad establecidos en la legislación. Por su parte, las aguas de goteo presentan una composición cercana a las del lago endokárstico, excepto en lo referente a la ausencia de Cr (o no se detecta) y a la presencia de Bo (106 $\mu\text{g/L}$) y de Se (0,81 $\mu\text{g/L}$).

Finalmente, respecto al contenido en COV, PAH, detergentes y plaguicidas, se han analizado aquellos compuestos que figuran en el RD 1798/2010. Todos los resultados indican que los valores en las aguas del lago y en la zona no saturada de la cueva están por debajo del límite de detección y cuantificación del método analítico, excepto en el contenido en el COV triclorometano (cloroformo). Se detecta presencia de triclorometano en el agua de goteo, aunque no se puede cuantificar al estar por debajo del límite de detección del método, mientras que en el agua del lago se obtiene un valor de 0,260 $\mu\text{g/L}$. Este contenido se encuentra por debajo del límite que establece la legislación sanitaria para la suma de los trialometanos (100 $\mu\text{g/L}$) y, aunque



es bajo, no forma parte de la composición natural de las aguas subterráneas, por lo que su presencia debe estar relacionada con procesos incipientes de contaminación antrópica.

Los compuestos orgánicos son sustancias químicas que contienen carbono y se encuentran en todos los elementos vivos. Los compuestos orgánicos volátiles (COV) se convierten fácilmente en vapores o gases. Junto con el carbono, contienen elementos como hidrógeno, oxígeno, flúor, cloro, bromo, azufre o nitrógeno. Los COV son liberados por la quema de combustibles, como gasolina, madera, carbón o gas natural. También se encuentran en disolventes, pinturas y otros productos empleados y almacenados en los hogares o lugares de trabajo, por lo que el origen del cloroformo en la cueva puede ser diverso y debe ser investigado.

Como referencia de calidad, en las tablas 1 y 2 se han comparado los resultados con los valores máximos establecidos en las partes B y C del Anexo I del RD 140/2003, del 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano; y también se han reflejado aquellos parámetros que contemplaba la anterior legislación de potabilidad. Cuando el valor medido supera el límite máximo establecido, se ha indicado por un código de colores en función de cuál sea el parámetro que se supera. En las aguas freáticas, se superan los límites en los parámetros de Na, K, Ca, Mg, Cl, SO_4 , conductividad eléctrica, pH y, en el caso de los metales Fe y Hg, queda indeterminado por ser el valor límite de la reglamentación inferior al límite de detección de esa muestra. En las aguas de goteo se superan los límites en el contenido en Na, Cl y, ocasionalmente, en Ca y DQO.

Discusión y conclusiones

En este trabajo se presenta la primera caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas de la cueva de s'Aigo, realizada en el marco del estudio integral de los aspectos geoambientales del conjunto de cuevas de Cala Blanca, con objeto de evaluar su posible habilitación para uso turístico. Para esta caracterización se han llevado a cabo dos campañas de muestreo, tanto en las aguas freáticas (lago) como en las de la zona no saturada de la cueva (goteos activos), en las que se han analizado los principales iones mayoritarios y minoritarios de las aguas, los metales, COV, PAH, detergentes y plaguicidas.

La interpretación de los resultados analíticos, realizada a partir de la representación gráfica de los análisis químicos, muestra una clara diferenciación de facies hidroquímica entre las aguas freáticas y las aguas de goteo. Las primeras presentan una facies netamente clorurada sódica, de elevada mineralización, mientras que las aguas de goteo presentan facies cloruradas sódico-cálcicas, de menor mineralización que las freáticas.

En las aguas del lago, la mineralización es elevada, típica de zonas de mezcla entre agua dulce y agua salada del mar, y se observa un cierto gradiente ascendente hacia el oeste, en dirección a la costa (las aguas en el punto 4 son más mineralizadas que en los puntos 1 y 2), hecho que se explica y es coherente con el estado de intrusión marina que se registra históricamente en esta zona de Menorca.

Las aguas de goteo presentan una mineralización más elevada de lo habitual en relación con la

composición natural de un agua de recarga procedente de la infiltración del agua de lluvia sobre el acuífero que, en este caso, atravesaría un espesor de zona no saturada muy escaso, de unos 15 m máximo. Esta mineralización puede tener explicación en el lavado de las sales marinas procedentes del aerosol marino que se deposita sobre la superficie del suelo cerca de la costa, u otro origen antrópico que debe ser investigado con más detalle.

Además de la interpretación de la composición de las aguas subterráneas de la cueva, deben investigarse otras fuentes de mineralización de las aguas, pues se ha detectado la presencia de algunos metales pesados, tanto en las aguas del lago como en las aguas de goteo que, aunque en concentraciones muy bajas, inducen a pensar en una afección de origen antrópico de las mismas, hecho que se complementa con la existencia de restos de cloroformo en las aguas del lago y de la zona no saturada.

Agradecimientos

Se agradece al Consell Insular de Menorca (CIM) y al Instituto Geológico y Minero de España, el marco de colaboración establecido, mediante un convenio específico, que permite llevar a cabo el proyecto denominado "Estudio científico-técnico, biótico y abiótico, de las cuevas de Cala Blanca, Menorca, Islas Baleares", donde queda enmarcado este trabajo. Así mismo, se agradece la colaboración prestada por el Ayuntamiento de Ciutadella por facilitar el acceso a la cueva y, particularmente, a Pere Arnau por su aportación en las labores de topografía y muestreo de la misma. Finalmente, se agradece a los laboratorios del IGME en Tres Cantos (Madrid) la elaboración de los análisis químicos de las aguas subterráneas muestreadas.

Referencias

- López, J.M., Cantón, J.L. y Palmer, E. 2014. *Memoria de actividades de las redes de control de aguas subterráneas en las Islas Baleares (Proyecto ATMIH)*. Fondo documental IGME. 21.
- CIM e IGME. 2017. Informe técnico: anteproyecto compartido para la apertura al público de la cueva de s'Aigo, Cala Blanca, Menorca. Diciembre 2017. Fondo documental IGME.
- López García, J.M. y Cantón Avila, J.L. 2012. Islas Baleares. En: *Nuevas aportaciones al conocimiento de los acuíferos costeros. Estado de la intrusión marina en los acuíferos costeros españoles*. (López Geta, J.A. y Fernández Ruiz, L. eds.). Vol. 2, 153-182. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. 0.
- Obrador, A., Pomar, L., Rodríguez- Perea, A. y Jurado, M.J. 1983. Unidades deposicionales del Neógeno menorquín. *Acta Geológica Hispánica*, 18 (2): 87-97.
- Obrador, A., Pomar, L. y Tarbener, C. 1992. Late Miocene breccia of Menorca (Balearic Islands): a basis for the interpretation of a Neogene ramp deposit. *Sedimentary Geology*, 79: 203-223.
- Pomar, L., Obrador, A. y Westpha, H. 2002. Sub-wavebase cross-bedded grainstones on a distally steepened carbonate ramp, Upper Miocene, Menorca, Spain. *Sedimentology*, 49, 139-169.
- Robledo, P.A. 2014. *Informe científico-técnico sobre el estudio de las alternativas para la puesta en valor de la Cova de s'Aigo y de la Cova de Na Megaré, Cala Blanca. T.M. de Ciutadella (Menorca)*. Fondo documental IGME. 26.

F. Gázquez, *et al.*, 2018. Hidrotermalismo de baja temperatura durante la formación de espeleotemas subacuáticos en la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva). En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 69-78.

Hidrotermalismo de baja temperatura durante la formación de espeleotemas subacuáticos en la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva)

F. Gázquez⁽¹⁾, J.M. Calaforra⁽²⁾, W. Martín-Rosales⁽³⁾ y M. López-Chicano⁽³⁾

(1) School of Earth and Environmental Sciences. University of St. Andrews. St Andrews, KY16 9AL, Escocia, Reino Unido. f.gazquez@ual.es

(2) Departamento de Biología y Geología. Universidad de Almería, Carretera de Sacramento s.n, La Cañada de San Urbano, 04120 Almería, España. jmcalforra@ual.es

(3) Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada. 18002 Granada, España. wmartin@ugr.es, mlopezc@ugr.es

RESUMEN

Aunque los procesos espeleogenéticos que generaron la Gruta de las Maravillas de Aracena (Huelva) han sido abordados en diversos estudios, aún se desconocen las condiciones ambientales que predominaron en la cueva durante las etapas más recientes de precipitación de espeleotemas. Mecanismos de karstificación derivados de la oxidación de masas de pirita alojadas en los mármoles de la roca de caja contribuyeron al desarrollo de la cavidad. Estos procesos espeleogenéticos pudieron haber ocurrido a temperaturas relativamente altas, y de ser así, el hidrotermalismo podría haber continuado durante las etapas posteriores de precipitación de espeleotemas. En este trabajo estudiamos los isótopos estables de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) y carbono ($\delta^{13}\text{C}$) de espeleotemas subacuáticos (conos de calcita flotante y costras de calcita) como indicadores de la temperatura de cristalización y de la fuente de carbonato/bicarbonato disuelto en el agua para la formación de espeleotemas. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ en la calcita (-3.7‰ a -5.6‰, V-PDB) son más positivos que los esperados para carbonatos precipitados en condiciones hidrotermales de alta temperatura (e.g. <-8‰). Nuestras estimaciones preliminares, asumiendo valores de $\delta^{18}\text{O}$ en el agua original de formación similares a los actuales en el entorno de la cueva (-4.5±0.5‰, V-SMOW), sugieren que la temperatura de precipitación de estos espeleotemas se habría mantenido entre 15 y 26°C, en algunos casos ligeramente más elevada que la temperatura actual del agua en la cavidad (~17.5°C). Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ (-8.7‰ a -12.2‰, V-PDB) son más negativos que los esperados para contribuciones de CO_2 de origen profundo ($\delta^{13}\text{C} \approx 0‰$) e indican que la fuente de carbono en los espeleotemas actuales fue de origen superficial (i.e. suelo y vegetación sobre la cueva). Nuestros resultados sugieren que durante las fases de formación de los espeleotemas estudiados, la cueva pudo haber presentado una anomalía térmica positiva, probablemente relacionada con el calor residual de etapas anteriores.

Palabras clave: cuevas hipogénicas, espeleotemas, hidrotermalismo, isótopos estables, paleotemperatura.

Low-temperature hydrothermalism during formation of subaqueous speleothems in Gruta de las Maravillas cave (Aracena, Huelva)

ABSTRACT

Despite the speleogenetic mechanisms that generated the Maravillas Cave of Aracena (Huelva) have been addressed in recent studies, the details about the environmental conditions that prevailed during the formation of the cave have remained elusive to date. Karstification processes derived from oxidation of pyrite hosted in the marble bedrock contributed to the cave development. This process may have occurred at relatively high temperatures and hydrothermal conditions

may have been prevailed during later stages of speleothems precipitation. Here, we study the stable isotope composition of oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) and carbon ($\delta^{13}\text{C}$) in subaqueous speleothems (raft calcite cones and calcite crusts) as indicators of crystallization temperature and source of dissolved inorganic carbon (DIC). The results of $\delta^{18}\text{O}$ in carbonate (-3.7‰ to -5.6‰, V-PDB) rule out high temperature carbonate precipitation, which normally shows lower $\delta^{18}\text{O}$ (e.g. <-8‰). We estimate formation temperatures ranging from 15 to 26°C, assuming a $\delta^{18}\text{O}$ value in the cave water similar to today's values in the cave setting (-4.5±0.5‰, V-SMOW). These reconstructed temperatures are slightly higher than the modern cave water temperature (~17.5°C). The $\delta^{13}\text{C}$ values (-8.7‰ a -12.2‰, V-PDB) indicate CO_2 contributions from vegetation and soil over the cave and insignificant contribution from CO_2 of hypogene/deep origin ($\delta^{13}\text{C}\approx 0\%$). Our results suggest that the stages of speleothems crystallization in Maravillas cave may have been shown a slightly positive thermal anomaly but did not formed from a high temperature solution.

Keywords: hydrothermalism, hypogene caves, palaeotemperature, stable isotopes, speleothems.

Introducción

Con más de 170.000 visitantes al año, la Gruta de las Maravillas de Aracena (Huelva) es una de las cavidades turísticas españolas más visitadas. Desde su apertura al público en 1914, diversos estudios científicos han abordado los mecanismos espeleogenéticos que la generaron (Martínez-Moreno *et al.*, 2016), la hidrogeoquímica de sus aguas de goteo (López-Chicano *et al.*, 2010), su geomorfología y mineralogía (Martín-Rosales *et al.*, 1995; Gázquez *et al.*, 2017), así como su microclima y gestión ambiental (Martín-Rosales *et al.*, 2008, 2012). Los trabajos más recientes sobre su espeleogénesis sugieren que la oxidación de masas de piritita (FeS_2) alojadas en los mármoles del Cerro del Castillo en los cuales se desarrolla la cavidad, podrían haber favorecido la corrosión de la roca de caja carbonática como consecuencia de la producción de ácido sulfúrico (Martínez-Moreno *et al.*, 2016). Aunque los mecanismos que predominaron durante las primeras fases de formación de la cavidad parecen estar bien identificados, las características ambientales que prevalecieron (*ej.* temperatura) durante etapas posteriores de precipitación de espeleotemas de calcita (CaCO_3) no han sido estudiados hasta la fecha.

El estudio de las características geoquímicas de espeleotemas, y más concretamente su composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$) puede ayudar a determinar la temperatura del agua en la cueva en el momento de su precipitación (*ej.* Gázquez *et al.*, 2016). Esto se debe a que el fraccionamiento isotópico del oxígeno entre el HCO_3^{2-} disuelto y el carbonato precipitado depende de la temperatura del agua (Tremaine *et al.*, 2011). Esta relación viene dada por la expresión:

$$1000\ln\alpha = 16.1 - 103/T - 24.6 \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde α es el fraccionamiento isotópico entre el oxígeno del HCO_3^- disuelto (cuya composición isotópica en el equilibrio es igual a la del oxígeno del agua) y el carbonato (CaCO_3) del espeleotema, y T es la temperatura del agua en grados Kelvin. Por otro lado, los isótopos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) de la calcita pueden aportar información sobre la fuente de carbono a la disolución (*ej.* disolución de la roca de caja, CO_2 procedente del suelo, etc.) (Lambert y Aharon, 2011). En el presente trabajo, se ha analizado la composición isotópica del oxígeno y el carbono en espeleotemas subacuáticos (costras de calcita y conos de calcita flotante) de la Gruta de las Maravillas, con el fin de hacer una primera aproximación geoquímica a los procesos que los generaron, así como a la temperatura del agua en el momento de la precipitación del carbonato.

Entorno geológico

La Sierra de Aracena se encuentra en el dominio meridional de Sierra Morena Occidental. En ella aparecen materiales precámbricos, paleozoicos y granitos hercínicos, además de pequeños depósitos cuaternarios ligados fundamentalmente a la red fluvial actual. La región presenta una orografía abrupta, con alineaciones montañosas asociadas a ciertas litologías (rocas carbonatadas y vulcanitas ácidas). Las rocas carbonatadas que ocupan mayor extensión son mármoles calcíticos y dolomíticos, de edad Cámbrico Inferior (Simancas *et al.*, 2006), con potencias entre 250 y 400 m (Martínez-Moreno *et al.*, 2016).

La Gruta de las Maravillas se desarrolla en mármoles de edad Precámbrico, con disposición homoclinal en torno a N120°E y buzamiento de 40°N, con un espesor máximo de cerca de 200 m (Martínez-Moreno *et al.*, 2016). Este lentejón carbonatado, se presenta como una pequeña banda de unos 700 m de largo y 150 m de ancho, y conforma el cerro donde se desarrolla la cavidad. Aparece intercalado entre un conjunto de gneises feldespáticos al norte, cuarcitas al este y en contacto con granodioritas al sur. Hacia el NO, este queda interrumpido por una fractura que pone a los mármoles en contacto con metavulcanitas. En el cerro del Castillo, donde se desarrolla la cueva, no aparece ninguna morfología exokárstica relevante. La temperatura medial actual de la cavidad oscila entre 15°C y 19.5°C.

Metodología

Descripción de las muestras

En la Sala de los Desnudos de la Gruta de las Maravillas se tomó un fragmento de una costra de calcita subacuática de aspecto botroidal de ca. 18 cm de espesor, compuesta de una primera fase de láminas de calcita microcristalina de color marrón oscura (ca. 8 cm) y una segunda fase de láminas de cristales blancos de calcita en empalizada (ca. 10 cm). Se tomaron muestras de polvo (ca. 1 mg) con un microtaladro aproximadamente cada centímetro, desde la base hasta la parte más externa del espeleotema (CL-01 a CL-18 en tabla 1). Esta costra yace sobre los mármoles de la roca de caja de la cavidad (figura. 1a). En la zona de contacto entre el mármol y el espeleotema se ha detectado la presencia de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Gázquez *et al.*, 2017).

En el sector de la Sala del Volcán (figura 1), se extrajo un cilindro de 10 cm de profundidad y 3 cm de diámetro de la base de un cono de calcita flotante de aproximadamente 1 m de altura (GM-04) y ca. 50 cm de diámetro. El testigo se cortó longitudinalmente y se tomaron 3 muestras a 1 cm, 5 cm y 10 cm de la base (zona más antigua). Análisis previos de la edad de estos conos mediante el método de U-Th revelaron que se formaron entre 101 ± 5 ka y 5 ± 1 ka antes del presente (Martín-Rosales *et al.*, 2008).

Análisis isotópicos

Para el análisis isotópico de los carbonatos se utilizó un dispositivo Gas Bench II (*Thermo Scientific*) de preparación de muestras para análisis isotópico acoplado a un espectrómetro de masas de

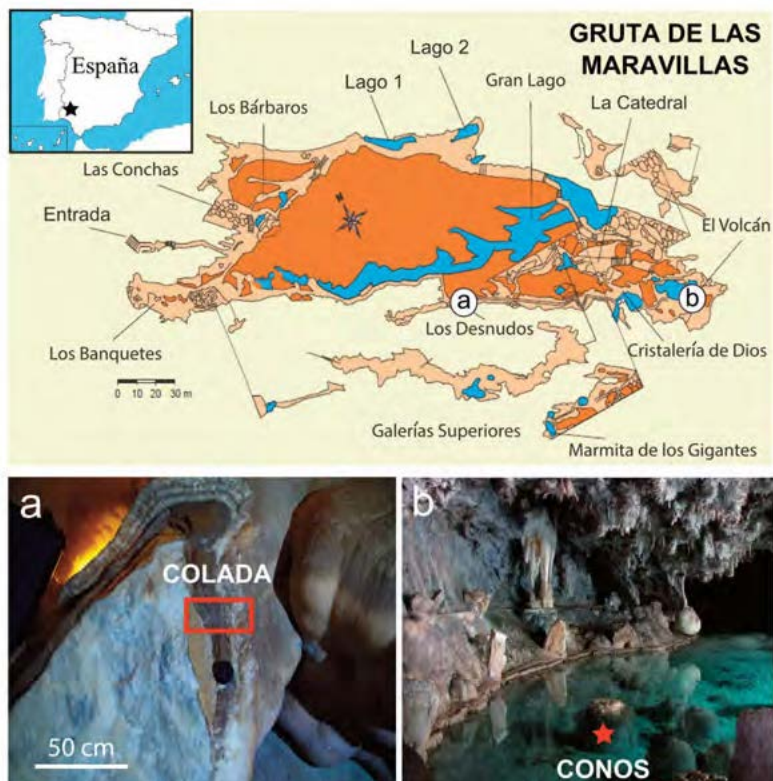


Figura 1. Mapa topográfico de la Gruta de las Maravillas y ubicación de las muestras analizadas: a) costra subacuática en la Sala de los Desnudos y b) cono de calcita flotante similar a los muestreados en la Sala del Volcán.

relaciones isotópicas MAT253 (*Thermo Scientific*) en el Godwin Laboratory de la Universidad de Cambridge (Reino Unido). La composición isotópica del oxígeno y el carbono ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$) está estandarizada con respecto al patrón internacional V-PDB. La reproducibilidad del método fue $\pm 0.03\text{‰}$ (1σ) para $\delta^{13}\text{C}$ y $\pm 0.08\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$, basada en el análisis de patrones internos. Los valores de las muestras se encuentran dentro de la recta de calibración obtenida con estos estándares. Los datos de $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ fueron convertidos a V-SMOW (*Vienna Sea Mean Ocean Water*) mediante la fórmula de Coplen (1995) para su comparación con los valores de las aguas.

Cálculo de paleo-temperaturas

Los valores de temperatura de formación de los espeleotemas han sido calculados utilizando la ecuación de Tremaine *et al.* (2011) (ecuación 1). Para ello, se utilizaron los valores de $\delta^{18}\text{O}$ obtenidos de análisis de los espeleotemas y el valor medio actual del agua de lluvia en el norte de la provincia de Huelva, obtenidos del *Online Isotopes in Precipitation Calculator (OIPC) model* (Bowen y Revenaugh, 2003). Se ha asumido que este valor fue similar al del agua en la cueva durante la formación de los espeleotemas y que no ha variado considerablemente en el pasado.

Esta premisa está basada en reconstrucciones de $\delta^{18}\text{O}$ en agua de paleo-acuíferos en el SO de la Península Ibérica, que sugieren que el $\delta^{18}\text{O}$ en el agua de lluvia en esta zona no experimentó cambios significativos entre el último máximo glacial (frio) y el Holoceno (cálido) (Jasechko *et al.*, 2015). Para los cálculos se ha utilizado un valor de $\delta^{18}\text{O}$ de $-4.5 \pm 0.5\text{‰}$. El rango de valores (-4‰ a -5‰) incluye con gran probabilidad los valores medios de $\delta^{18}\text{O}$ en el agua de lluvia en esta región, y por consecuencia en el agua de la cueva, durante el Cuaternario. Las incertidumbres en los valores de temperatura son del orden de $\pm 2^\circ\text{C}$ (1σ), derivados del error analítico en $\delta^{18}\text{O}$ de los carbonatos y las incertidumbres en el valor de $\delta^{18}\text{O}$ en el agua de la cueva durante la formación de los espeleotemas.

Resultados

Los valores isotópicos de los espeleotemas analizados ($n=21$) oscilan entre -5.5‰ y -3.7‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y entre -12.2‰ y -9.0‰ para $\delta^{13}\text{C}$ (figura 2). La sección interna y más antigua de la costra de la Sala de los Desnudos presenta los valores de $\delta^{18}\text{O}$ más positivos ($-4.4 \pm 0.5\text{‰}$, $n=8$), mientras que, en la parte externa y reciente los valores son ligeramente más negativos ($-5.1 \pm 0.4\text{‰}$, $n=10$). Los conos de calcita flotante de la Sala del Volcán muestran valores intermedios de $\delta^{18}\text{O}$ ($-4.9 \pm 0.1\text{‰}$, $n=3$). Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en la parte interna de la costra ($-10.5 \pm 1\text{‰}$) son indistinguibles de los de la parte externa ($-10.3 \pm 7\text{‰}$) y similares a los de los conos ($-10.0 \pm 0.6\text{‰}$).

Las temperaturas calculadas utilizando la ecuación de Tremaine *et al.* (2011) y los valores $\delta^{18}\text{O}$ de los espeleotemas varían entre 15°C y 26°C . La media de temperatura de formación de la

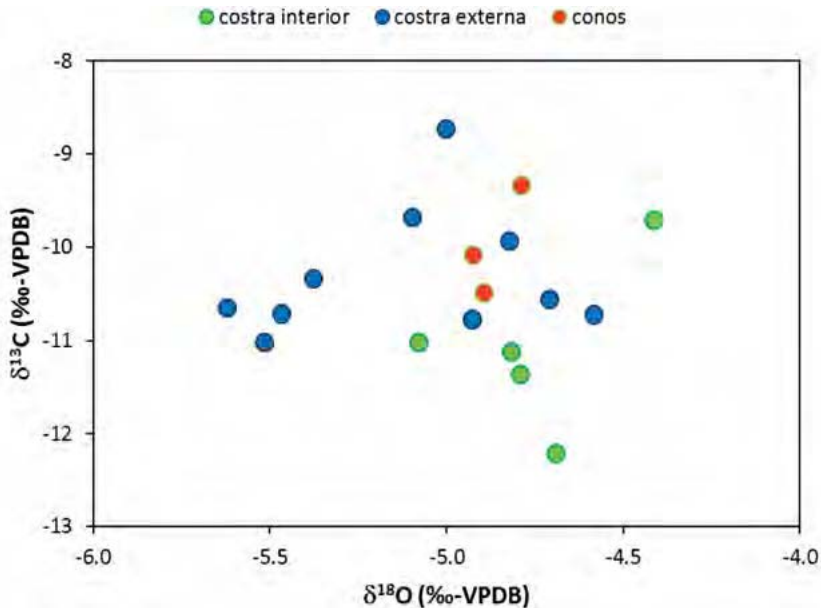


Figura 2. Resultados de isótopos estables en espeleotemas carbonáticos de la Gruta de las Maravillas.

costra interna de la Sala de los Desnudos es de $19\pm 3^{\circ}\text{C}$ ($n=8$), mientras que la parte externa cristalizó a $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ($n=10$). La temperatura del agua durante la formación de los conos de calcita flotante fue de $22\pm 1^{\circ}\text{C}$ ($n=3$).

Discusión

La composición isotópica de los espeleotemas subacuáticos de la Gruta de las Maravillas ha permitido estimar la temperatura del agua a partir de la que precipitaron. En la Sala de los Desnudos, costras de calcita con morfologías botroidales, típicas de espeleotemas subacuáticos, precipitaron sobre los mármoles de la roca de caja. La presencia de yeso entre el sustrato marmóreo y el espeleotema ha sido interpretada como una evidencia de que durante las primeras fases de espeleogenesis en la cueva se produjo oxidación de sulfuros metálicos y producción de ácido sulfúrico, que reaccionó con la roca carbonática y dio lugar al yeso (Martínez-Moreno *et al.*, 2016; Gázquez *et al.*, 2017). En fases posteriores, el agua alcanzó la saturación en carbonato cálcico y las costras comenzaron a precipitar en esta parte de la cueva que se encontraba sumergida. La temperatura del agua durante la primera fase de crecimiento de las costras ($19\pm 3^{\circ}\text{C}$) sugiere que el agua en la cueva estaba ligeramente más caliente que la cueva en la actualidad ($15-19.5^{\circ}\text{C}$), probablemente debido al calor residual de la roca heredado de etapas hidrotermales anteriores o al carácter exotérmico de la reacción de oxidación de la pirita. La segunda fase de precipitación de la costra se produjo a una temperatura similar a la etapa anterior de cristalización de carbonato, en torno a $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ (figura 3).

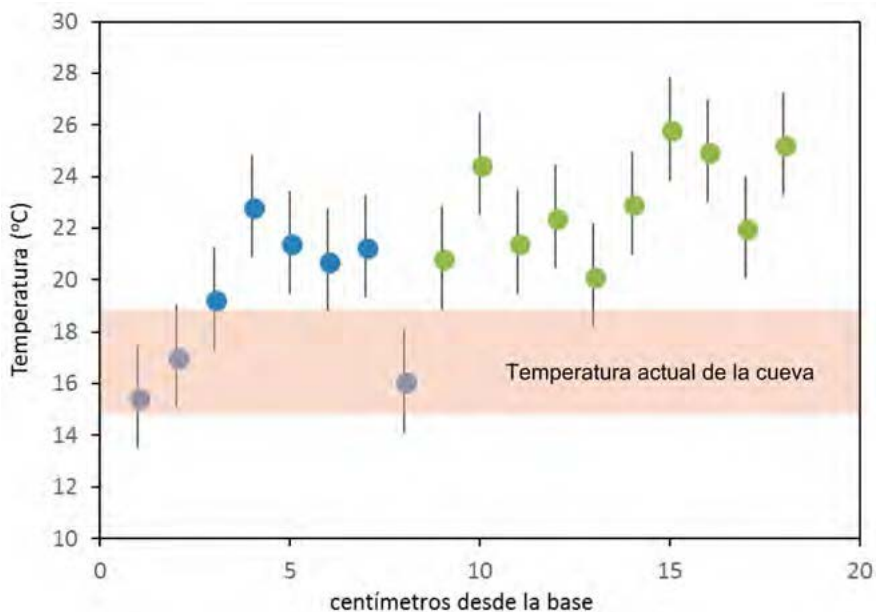


Figura 3. Variación de la temperatura de formación de la costra subacuática de la Sala de los Desnudos en función a la distancia a la roca caja. Los símbolos azules representan la parte más antigua del espeleotema (1 a 8 cm desde la roca caja), mientras que los valores en verde representan la parte más externa y reciente (9 a 18 cm desde la base).

Muestra	Descripción	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$	T(°C)
GM-04 EXT	Testigo GM-04, 10 cm desde la base	-4.8	-9.3	21
GM-04 MED	Testigo GM-04, 5 cm desde la base	-4.9	-10.1	22
GM-04 INT	Testigo GM-04, 1 cm desde la base	-4.9	-10.5	22
CL-01	Costra interna, 1 cm desde la base	-3.7	-9.0	15
CL-02	Costra interna, 2 cm desde la base	-4.0	-9.8	17
CL-03	Costra interna, 3 cm desde la base	-4.4	-9.7	19
CL-04	Costra interna, 4 cm desde la base	-5.1	-11.0	23
CL-05	Costra interna, 5 cm desde la base	-4.8	-11.1	21
CL-06	Costra interna, 6 cm desde la base	-4.7	-12.2	21
CL-07	Costra interna, 7 cm desde la base	-4.8	-11.3	21
CL-08	Costra interna, 8 cm desde la base	-3.8	-9.9	16
CL-09	Costra externa, 9 cm desde la base	-4.7	-10.5	21
CL-10	Costra externa, 10 cm desde la base	-5.4	-10.3	24
CL-11	Costra externa, 11 cm desde la base	-4.8	-9.9	21
CL-12	Costra externa, 12 cm desde la base	-5.0	-8.7	22
CL-13	Costra externa, 13 cm desde la base	-4.6	-10.7	20
CL-14	Costra externa, 14 cm desde la base	-5.1	-9.7	23
CL-15	Costra externa, 15 cm desde la base	-5.6	-10.6	26
CL-16	Costra externa, 16 cm desde la base	-5.5	-10.7	25
CL-17	Costra externa, 17 cm desde la base	-4.9	-10.7	22
CL-18	Costra externa, 18 cm desde la base	-5.5	-11.0	25

Tabla 1. Análisis isotópico de carbonatos de la Gruta de las Maravillas y temperaturas estimada a partir de $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ usando la ecuación de Tremaine et al. (2011).

Los conos de calcita flotante de la Sala del Volcán precipitaron debido al hundimiento y acumulación de láminas de calcita, que previamente cristalizaron sobre la superficie de lagos poco profundos en este sector de la cavidad, probablemente desconectados del nivel freático local. La composición isotópica del oxígeno ha revelado temperaturas de formación de ca. 22 ± 1 °C, similares a la temperatura de formación de las costras de la Sala de los Desnudos, y sin aparente variación significativa de temperatura entre la parte interna y la parte externa. Aunque la edad de las muestras analizadas para isótopos estables no ha sido determinada, testigos extraídos de conos de calcita similares en el mismo sector de la cueva precipitaron entre 101 ± 5 ka y 5 ± 1 ka antes del presente. En conjunto, estos resultados sugieren que la temperatura en la Gruta de las Maravillas habría disminuido en torno a 5 °C, desde las fases de precipitación de espeleotemas subacuáticos que se extendieron al menos hasta 5 ± 1 ka, comparada con la temperatura actual de la cueva. Este enfriamiento acontecido en los últimos milenios podría haber sido consecuencia de la disminución de la temperatura del acuífero de la Sierra de Aracena, desde un hidrotermalismo de baja temperatura hasta los ca. 17 °C medido en el agua subterránea actual (López-Chicano *et al.*, 2010).

Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de los espeleotemas analizados (-12.2‰ a -9.0‰) sugieren que la fuente de carbono (CO_2) para la formación del carbonato fue mayoritariamente de procedencia edáfica y de plantas con metabolismo C3 (Bar-Matthews *et al.*, 2010). Estos valores obtenidos en los espeleotemas analizados descartan contribuciones significativas de otras fuentes de CO_2 de origen profundos o hipogénicas, que normalmente presentan valores cercanos a 0‰ (Lambert y Aharon, 2011). Aunque la precipitación de espeleotemas se produjo a temperatura ligeramente superior a la actual en la cueva, los procesos de origen profundo no habrían jugado un papel fundamental en cuanto a la saturación de la disolución para la cristalización del carbonato.

Conclusiones

La composición isotópica del oxígeno en espeleotemas subacuáticos de la Gruta de las Maravillas, muestra valores más elevados que los esperados para carbonatos precipitados a alta temperatura. Sin embargo, las temperaturas de formación de estos espeleotemas son ligeramente más elevadas (hasta 26 °C) que la temperatura ambiental de la cueva en la actualidad (15-19.5 °C), sugiriendo que la precipitación de carbonato se produjo en un ambiente hidrotermal de baja temperatura. Los resultados de los espeleotemas analizados sugieren que la cueva se vio afectada por el calor residual de etapas espeleogenéticas previas, que pudieron haber acontecido a temperaturas mucho más elevadas. Aunque se requiere de estudios geoquímicos más detallados de estos y otros espeleotemas para confirmar las temperaturas obtenidas (*ej.* análisis de inclusiones fluidas), nuestros resultados sugieren que las etapas preliminares de formación de la cavidad podrían haber estado marcadas por procesos hipogénicos/hidrotermales, mientras que las últimas etapas de formación espeleotémica estuvieron relacionadas con procesos epigénicos corroborados por los valores de $\delta^{13}\text{C}$ obtenidos en las muestras analizadas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Antonio Azor su ayuda en la recolección de algunas muestras y al Ayuntamiento de Aracena por su apoyo en los estudios y permisos para el acceso a la cavidad. Agradecemos a James Rolfe su ayuda en el análisis isotópico de los carbonatos y al Profesor David Hodell por prestar las facilidades necesarias. Los análisis realizados en este trabajo han sido financiados por los fondos del Grupo de Investigación de Recursos Hídricos y Geología Ambiental de la Universidad de Almería y el Godwin Laboratory de la Universidad de Cambridge (Reino Unido).

Referencias

- Bar-Matthews, M., Mearn, C.W., Jacobs, Z., Karkanis, P., Fisher, E.C., Herries, A.I.R., Brown, K., Williams, H.M., Bernatchez, J., Ayalon, A. y Nilssen, P.J. 2010. A high resolution and continuous isotopic speleothem record of paleoclimate and paleoenvironment from 90 to 53 ka from Pinnacle Point on the south coast of South Africa. *Quaternary Science Review* 29: 2131-2145.
- Bowen, G.J. y Revenaugh, J. 2013. Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation. *Water Resources*, 39, 1-13.
- Coplen, T.B. 1995. Reporting of stable carbon, hydrogen, and oxygen isotopic abundances. In: Reference

- and intercomparison materials for stable isotopes of light elements. *International Atomic Energy Agency, TECDOC*, 31-34.
- Gázquez, F., Calaforra, J.M., Rodríguez-Estrella, T., Ros, A., Llamusi, J.L. y Sanchez, J. 2016. Evidencias geoquímicas preliminares del origen hidrotermal de Sima de la Higuera-Sima Destapada (Región de Murcia). En: *El karst y el Hombre, las cuevas como patrimonio mundial. (Eds.) Andreo, B. y Duran, J.J.* VI Congreso Nacional de Cuevas Turísticas. Nerja. 283-294.
- Gázquez, F., Rull, F., Sainz, A., Medina, J., Calaforra, J.M., De las Heras, C. y Lasheras, J.A. 2017. In situ Raman characterization of minerals and degradation processes in a variety of cultural and geological heritage sites. *Spectrochimica Acta Part A*. 172C: 48-57.
- Jasechko, S., Lechler, A., Pausata, F.S.R., Fawcett, P.J., Gleeson, T., Cerdon, D.I., Galewsky, J., LeGrande, A.N., Risi, C., Sharp, Z.D., Welker, J.M., Werner, M. y Yoshimura, K. 2015. Late-glacial to late-Holocene shifts in global precipitation $\delta^{18}\text{O}$. *Climate of the Past*, 11: 1375-1393.
- Lambert, W.J. y Aharon, P. 2011. Controls on dissolved inorganic carbon and $\delta^{13}\text{C}$ in cave waters from DeSoto Caverns: Implications for speleothems $\delta^{13}\text{C}$ assessments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 753-768.
- López-Chicano, M., Martín-Rosales, W. y Vadillo, I., 2010. Caracterización hidrogeoquímica de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva, España). In: *Durán, J.J., Carrasco, F. (Eds.), Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 143-158.
- Martín-Rosales, W., Lopez-Chicano, M., Rodríguez Navarro, C.M. y Pulido-Bosch, A., 1995. Morfología, Espeleotemas y Climatología de la "Gruta de las Maravillas" (Aracena, Huelva). *Espeleotemas* 5, 51-62.
- Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Calaforra, J.M., Lauritzen, S.E. y Rodríguez-Navarro, C.M., 2008. La Gruta de las Maravillas. In: *Calaforra, J.M., Berrocal, J.A. (Eds.), El Karst de Andalucía, Geoespeleología, Bioespeleología y Presencia Humana*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, Sevilla (Spain), 209-215.
- Martín-Rosales, W., Romero-Bomba, E., López-Chicano, M. y Guerra, M., 2012. Efectos de la gestión ambiental sobre la distribución temporal de los visitantes de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva, España). In: *Durán, J.J., Robledo, P.A. (Eds.), Las cuevas turísticas como activos económicos: conservación e innovación*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), Madrid 448.
- Martínez-Moreno, F.J., Pedrera, A., Galindo-Zaldivar, J., Lopez-Chicano, M., Azor, A., Martín-Rosales, W., Ruano, P., Calaforra, J.M. y Hodar-Perez, 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.
- Simancas, J., Carbonell, R., Lodeiro, F.G., Estaun, A.P., Juhlin, C., Ayarza, P., Kashubin, A., Azor, A., Poyatos, D.M. y Sáez, R., 2006. Transpressional collision tectonics and mantle plume dynamics: the Variscides of southwestern Iberia. *Geological Society of London*, 32: 345-354.
- Tremaine, D.M., Froelich, P.N. y Wang, Y. 2011. Speleothem calcite farmed in situ: Modern calibration of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ paleoclimate proxies in a continuously-monitored natural cave system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75: 4929-4950.

P.A. Robledo, et al., 2018. Geomorfología de la cueva de s'Aigo, Cala Blanca, Menorca. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 79-94.

Geomorfología de la cueva de s'Aigo, Cala Blanca, Menorca

P.A. Robledo Ardila⁽¹⁾, J.J. Durán Valsero⁽²⁾ y R. Morales García⁽²⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España, C/ Felicià Fuster s/n, 07007. Palma de Mallorca, Illes Balears; pa.robledo@igme.es

(2) Instituto Geológico y Minero de España, C/ Ríos Rosas, 23. 28003-Madrid; jj.duran@igme.es r.morales@igme.es

RESUMEN

Los estudios geomorfológicos son poco frecuentes en cavidades en general y turísticas en particular, aunque tienen una notable utilidad desde diversos aspectos: turísticos, científico, de apoyo a la conservación o para la propia gestión de la cavidad. En este trabajo se describe el estudio geomorfológico que se ha realizado en la cueva de s'Aigo, Cala Blanca (isla de Menorca). La metodología ha consistido en la realización sistemática de siete perfiles topográficos de precisión, transversales a la orientación principal de la cavidad y uno longitudinal, con el apoyo de una estación total para la topografía y un distanciómetro láser de precisión con un sensor de inclinación integrado. Las secciones transversales resultantes y la sección longitudinal han servido de base para la realización de perfiles geomorfológicos, en los cuáles, mediante la observación directa y con la ayuda de la fotografía convencional, se han representado todos los elementos singulares identificados, a escala 1/250. Estos elementos, categorizados en una clasificación previa, incluyen rasgos geomorfológicos endokársticos naturales (el agua, formas erosivas, sedimentos detríticos y espeleotemas), y otros derivados de la acción antrópica, tanto pretérita (caminos, muros) como actual (habilitación turística). Posteriormente, se ha procedido a la representación espacial bidimensional en una cartografía geomorfológica procesada en un SIG.

Palabras clave: cueva de s'Aigo, cartografía geomorfológica, endokarst, perfil geomorfológico.

Geomorphology of the s'Aigo cave, Cala Blanca, Menorca

ABSTRACT

The geomorphological studies are a little frequent in caves in general and in show caves in particular, although this could be very useful and important to scientific works as well as to protect and conserve this type of environment. In this work we describe a geomorphological study in the s'Aigo show cave, Cala Blanca, (Menorca Island). The methodology has consisted in a systematic plot of fourteen topographic transversal sections to the principal direction of the cave. Have been use a total topographic station and laser distance detection with a slope sensor integrated. The transversal sections obtained have been the base to represent the geomorphology elements according to a previous field work into the cave. In every section has been plot over the endokarstics forms observed in a scale 1/250. These geomorphologic features have been classified according the type (water, erosive forms, detritus sediments, speleothems and others) and that structure related to the human activity, as miner labors, or whit the touristic use of the cave, like handrail, path and others. Finally, we have represented the geomorphologic map to scale 1/250, based in the topographic measures obtained by means of speleological task and different topographic works made during the cave restoration project. Finally, the geomorphologic dates have been plotted in a GIS.

Keywords: endokarst, geomorphological cartography, s'Aigo cave, geomorphological section.

Introducción

Las cavidades son sistemas ambientales que tienen como característica más destacada el ser muy

conservativos y sufren una evolución de procesos de intercambio de materia y energía permanente, constituyendo por tanto sistemas en continuo equilibrio dinámico. Los procesos geomorfológicos son parte importante de estos procesos y su registro permite conocer como ha sido la evolución de la cavidad y que procesos han operado de forma más importante. En muchas cuevas la intervención humana, ya sea como uso de estos espacios para refugio en épocas pretéritas o bien, referidas más recientemente a su uso turístico, han podido sufrir un impacto en su equilibrio natural. Las cavidades poseen importantes elementos cuyo interés científico es manifiesto entre los que destacan su patrimonio cultural como el arte rupestre (Jiménez-Sánchez *et al.*, 2006) y su patrimonio geológico y geomorfológico (Robledo *et al.*, 2012). Aunque históricamente los valores arqueológicos y los paleontológicos han sido los más estudiados en estos ambientes, en los últimos años el estudio de la geomorfología endokárstica, ha sido objeto de gran interés, como muestran los ejemplos de las cuevas de Nerja en Málaga o Tito Bustillo en Asturias (Arrese, 2009; Jiménez-Sánchez *et al.*, 2004 y 2011 b; Robledo *et al.*, 2014). Sin embargo, en otras cavidades como Ojo Guareña en Burgos, Vallgornera en la isla de Mallorca o Sant Josep, en Castellón, propuestas para ser declaradas Parque Nacional, Monumento Natural y la última en una región declarada Patrimonio Mundial por la UNESCO debido al arte rupestre que contienen, este tipo de trabajos todavía no se han abordado o se ha hecho de forma muy descriptiva y esquemática, si una metodología clara. Existe por tanto, un déficit en cuanto al conocimiento cuantitativo y cualitativo de estos medios, sobre los procesos que han operado y qué productos son parte y patrimonio de la huella de la historia de la Tierra en las cuevas. Los procesos geomorfológicos, así como las formas y productos derivados de éstos en una cavidad, han sido ampliamente descritos en general, de forma casi siempre aislada, como espeleotemas, sedimentos detríticos (White, 2007; Robledo, 2008; Robledo y Durán, 2009 y 2011; Robledo *et al.*, 2012; Jiménez-Sánchez *et al.*, 2011 b; Ferchill y Baker, 2012), tipos de conductos, o se han clasificado los tipos de cavidades según su forma en planta, en sección o tamaño (Ford y Williams, 1989). No obstante, en muy pocas ocasiones se han procedido a un estudio del conjunto donde no exista únicamente una descripción puntual de uno o varios de los elementos, sino que hayan sido identificados, descritos y cartografiados los productos de los procesos que han operado estableciendo un orden cronológico y espacial que no se limite a un mapa del suelo de la cueva. El estudio de la geomorfología endokárstica y su representación espacial, se está mostrando como una herramienta sumamente eficaz para poder abordar cualquier tipo de estudio; paleoclimático, paleontológico, geocronológico, patrimonial, arqueológico y otros, ya que posibilita entender la evolución del sistema en su conjunto, representar en el espacio cada elemento y, finalmente, componer un puzzle que, en ocasiones, es sumamente complejo. En los últimos tiempos, las técnicas para la realización de una cartografía geomorfológica se han basado en cuatro grandes herramientas: 1) Una base topográfica precisa de la cavidad; 2) la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la representación de los elementos del suelo de la cavidad; 3) la integración de trabajos específicos en una cartografía de la cueva (sedimentológicos, paleoclimáticos, arqueológicos y otros); y 4) la realización de numerosos perfiles geomorfológicos transversales seriados. En algunos trabajos, la cartografía geomorfológica de una cavidad se ha realizado con el objeto principal de representar los elementos geológicos y antrópicos más importantes, generalmente en cuevas turísticas (Jiménez-Sánchez *et al.*, 2004 y 2006; Arrese, 2009; Robledo *et al.*, 2012; Robledo y Durán, 2016) para su correcta gestión. En otros, es el objetivo ha sido la conservación y protección, (Arrese, 2009; Jiménez-Sánchez *et al.*, 2011 b) para lo que la cartografía geomorfológica suponía una herramienta más entre otros métodos. Sin embargo, existen todavía pocos estudios cuyo objeto sea la interpretación y evolución del sistema endo-

kárstico en su conjunto. En este estudio, para la realización de la cartografía geomorfológica de la cueva de s'Aigo se han llevado a cabo: una topografía de la cavidad a escala 1/250, 70 secciones transversales a la dirección principal de la cueva y una sección longitudinal, en las que posteriormente se han representado los elementos geomorfológicos.

El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo y la aplicación de una metodología para la realización de la cartografía geomorfológica establecida por Robledo *et al.* (2012 y 2016) que se aplicó previamente en el estudio de la cueva de El Soplao, Cantabria y de la Cueva de Ardales, en Málaga (Robledo y *et al.*, 2012, Robledo y Durán, 2016). Con ellos, se pretende obtener una representación en un mapa de los elementos que existen, obtener un producto final que permita determinar el orden cronológico de los procesos, de las formas y productos derivados de los mismos, abordando el suelo y el techo de la cueva en las secciones transversales y la sección longitudinal. El resultado final nos permitirá realizar interpretaciones muy precisas sobre la génesis, evolución paleoclimática y paleoambiental, evolución hidrogeológica, secuencias estratigráficas de sedimentos alóctonos y autóctonos (detríticos o de precipitación química), así como impactos derivados de la acción entrópica del hombre y la aplicación a planes de gestión y conservación.

Marco geográfico

La localidad de Cala Blanca se ubica al E de la isla de Menorca en el término municipal de Ciutadella (figura 1). Situada a 3,5 km de Ciutadella, este núcleo urbano es considerado como una de las urbanizaciones residenciales más visitadas de la isla en época estival. La urbanización se ubica entre dos calas naturales, Cala Blanca al sur, Cala Santandria y la Caleta d'en Gorries, al norte, ambas coincidentes con la desembocadura de torrentes. El sector que dividen ambas calas presenta una forma perimetral de costa semicircular con una longitud de perímetro litoral de unos 2,5 km de longitud. Queda delimitado en la franja litoral por paredes verticales de roca caliza que forman un acantilado.

Marco geológico

Menorca es la isla más nororiental del archipiélago Balear, que forma la parte emergente del Promontorio Balear en el Mediterráneo occidental. Morfoestructuralmente, la isla de Menorca se compone de dos regiones diferentes: la región de Tramuntana en la zona norte, formada de materiales paleozoicos (esquistos del Silúrico, calizas del Devónico y turbiditas siliciclásticas del Carbonífero), materiales del Mesozoico (areniscas y dolomías del Jurásico y calizas del Cretácico) y rocas del Terciario inferior; y la región de Migjorn en la zona sur, compuesta por rocas carbonáticas del Mioceno superior que de forma discordante recubren el sustrato Paleozoico, Mesozoico y Paleógeno (Pomar *et al.*, 2002) (figura 1). Las rocas miocenas superiores (Tortoniense inferior a Messiniense) de la región de Migjorn presentan una disposición subhorizontal y se disponen de forma discordante sobre estratos del Paleozoico, Mesozoico y Paleógeno. Localmente, la sucesión del Mioceno superior cubre el límite superficial-marino de otras unidades deposicionales: la unidad basal y la unidad detrítica, que han sido atribuidos a la parte inferior del Mioceno medio respectivamente (Obrador *et al.*, 1983, y 1992). La unidad basal consiste en sedimentos de caliza y dolomía conglomeráticos compuestos por cantos rodados de bivalvos y perforaciones

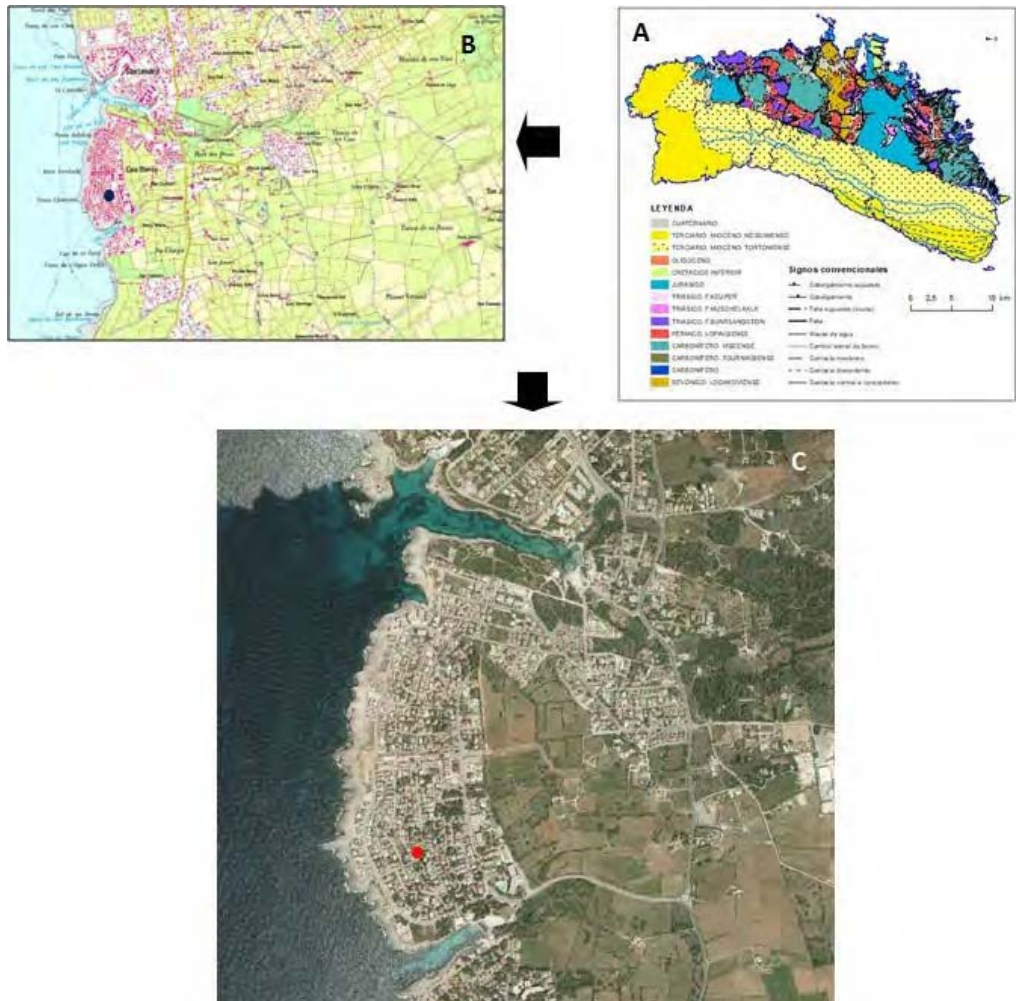


Figura 1. Marco geográfico y geológico en la zona de la localidad de Cala Blanca, donde se ubica la cueva de s'Aigo (en el punto rojo).

de esponjas y corales así como calcarenitas con pequeñas estratificaciones cruzadas. Los depósitos de la unidad basal se interpretan como depósitos proximales y de pie de acantilado. La unidad detrítica se compone principalmente de areniscas rojas y conglomerados que pasan a secciones mixtas con rocas siliciclásticas, interpretados como un depósito de fan-delta (Obrador *et al.*, 1983). Las rocas del Mioceno superior en las Islas Baleares se han dividido en tres unidades sedimentarias. La unidad considerada Tortoniana inferior, la unidad central (Complejo Arrecifal), Tortoniana superior-Messiniense inferior, la unidad superior, Messiniense únicamente reconocida en Mallorca e Ibiza y que consta de diversas litologías, incluyendo oolitos y estromatolitos (Unidad de Santanyí), evaporitas, dolomías y margas (Unidad de margas grises y yesos), conglomerados de fan-delta y margas (margas de la Bonanova).

El complejo arrecifal de Menorca cubre a la unidad inferior de rampa carbonatada, las unidades inferior y Mioceno medio y el Mesozoico. Aflora al sur de Mahón, al norte de Son Bou y el sur y el norte de Ciutadella (figura 1) y consiste en una plataforma de arrecifales progradantes. El límite inferior es una superficie de erosión en los márgenes de la cuenca que pasa a depósitos de cuenca en un contacto con la unidad de rampa inferior. La edad del complejo arrecifal es Tortonense-Messiniense. Las rocas del Mioceno superior en Menorca, sólo se ven afectadas a priori, por fallas subverticales y ligeras flexiones en rocas del Plioceno al Pleistoceno medio (Pomar *et al.*, 1996). El Cuaternario está representado heterogéneamente y discordante, tanto por sedimentos de relleno de pequeñas depresiones, probablemente asociado a cauces de torrentes como por dunas pleistocenas que solapan los acantilados.

La cueva de s'Aigo se desarrolla en materiales que pertenecen a la unidad superior, Complejo Arrecifal. Concretamente, se observan en el interior sedimentos calcareníticos de grano grueso, greinstones y dologreinstones, bioclastos, rodolitos, fragmentos de corales y algas rodofíceas, equínidos y moluscos.

Descripción de la cueva de s'Aigo

De acuerdo con la situación y descripción de las formas y productos observados la cueva de s'Aigo se puede considerar esta como una cavidad litoral epigénica, ligada a un proceso de disolución por aguas meteóricas a favor de las fracturas, así como por la disolución de la roca en la zona de mezcla entre aguas dulces y aguas saladas marinas. La planta de la cueva y las medidas tomadas sobre el terreno muestran una dirección principal NE-SO (N 25-30° E) que coincidan con la orientación principal de los conductos de la cueva; y su conjugada, fracturas con dirección N 80°-90° E, coincidentes con la orientación secundaria de salas y pasajes de segundo orden (figura 2). La cueva de S'Aigo fue descrita inicialmente por Thomas-Casajuana i Montoriol-Pous (1951) (figura 1). Posteriormente, Trias *et al.* (2002) describió parte de la cavidad; Zubillaga *et al.* (2005) realizó una topografía detallada y Arnau *et al.* (2008) una descripción exhaustiva del conjunto de salas y formas de la cueva. El desarrollo longitudinal de la cavidad en planta es de aproximadamente 132 m, con apenas 20 m de desnivel, una anchura máxima de los conductos de 23 m en la zona del lago y una altura entre 2 y 5 m también en la zona endokárstica inundada. De acuerdo con la descripción de Arnau *et al.* (2008) la cueva se divide en tres zonas; 1) zona de la Entrada, 2) el corredor y 3) zona del Lago (figura 3).

La cueva presenta un acceso desde un parque público que coincide con una zona deprimida del terreno semejante a una dolina. Desde su entrada, la cavidad presenta un conducto principal recto con pendiente negativa hacia la zona del lago, donde se abre sensiblemente la cavidad. Lateralmente, se desarrollan algunos conductos más pequeños con cierta continuidad, aunque de difícil acceso debido a la gran cantidad de bloques desprendidos desde el techo y las paredes de la cavidad así como, por escombros de origen antrópico, que cubría parcialmente dichos accesos. Cerca del lago, aparentemente la altura de la cavidad, se mantiene regular entre 3 y 4 m, hasta alcanzar el nivel piezométrico, donde tanto la anchura como la altura alcanzan valores máximos. La superficie del lago es de unos 800 m² aproximadamente, con un de entre pocos centímetros y 4 m (Arnau, *et al.*, 2008).

La cavidad no presenta gran cantidad ni variedad de espeleotemas ni de formas de disolución,

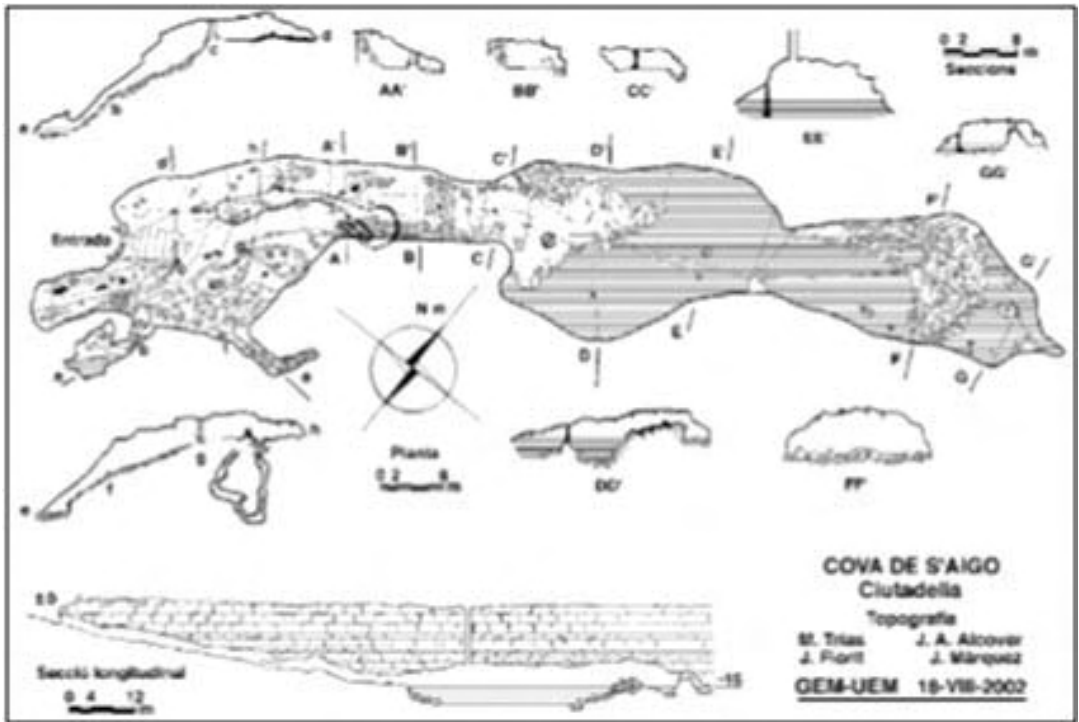


Figura 2. Topografía clásica de la cueva de s'Aigo (Trias et al., 2002).

aunque destacan la existencia de algunos ejemplares recientes de finos y numerosos macarrones o fistulosas. En algunos márgenes se han observado coladas estalagmíticas, y puntualmente, en la zona del lago se observan algunas formaciones, tales como columnas, estalagmitas y estalactitas, algunas de ellos sumergidos.

En la cueva se observa también un primer sector, habilitado para su visita en los años 70 del siglo XX, con una puerta de acceso de hierro, unas escaleras de obra y un camino de obra que conduce al lago. Es destacable la diferencia existente entre las primeras vistas para la realización de este trabajo (en el año 2016) donde existía una gran cantidad de vertidos y basuras en el interior de la cavidad, a la visión actual después de una limpieza a fondo realizada por personal del Consell Insular de Menorca y del Ajuntament, que permite ver con claridad cada uno de los elementos de la cueva. La proximidad desde el techo de la cueva a la superficie (o el escaso espesor del techo de la cueva), parece puede influir en la rápida filtración de agua y otros fluidos desde la superficie además de favorecer que el techo esté repleto de raíces de la vegetación que crece en superficie.

Por otro lado, es muy destacable el material arqueológico encontrado en la cavidad, la existencia de grabados antiguos y posibles marcas prehistóricas todavía sin documentar, que pueden tener su origen en el periodo talayótico. Esto otorga un plus de valor añadido a la misma.

Metodología

La metodología aplicada para este estudio se ha basado en: 1) El levantamiento topográfico de la planta de la cueva y de secciones transversales a la dirección principal de la cavidad; 2) la cartografía de los elementos geomorfológicos en los perfiles transversales y longitudinal; 3) finalmente, se ha procedido al tratamiento de los resultados mediante distinto *software* y se han volcado los datos en un SIG, para elaborar los perfiles y el mapa geomorfológico de la cueva.

El levantamiento topográfico de la planta y los perfiles transversales y longitudinales a la dirección de la cueva

El levantamiento topográfico de la cavidad fue realizado por la empresa TRAGSA a petición del Consell Insular tras las consideraciones realizadas por técnicos del IGME. Para dotar de coordenadas oficiales a la topografía de la cavidad se dispuso de varias bases cercanas a la entrada de las cuevas. Para ello, se utilizó la tecnología GPS-RTCM en tiempo real (RTK) a partir de la *Xarxa de Geodèsia Activa de las Illes Balears (XGAIB)*. Como estación de referencia se tomó la situada más próxima a la zona de trabajo, ubicada en el edificio del puerto antiguo de Ciutadella de Menorca, denominada RTCM-Ref003 / MENC.

Se utilizó un único receptor GPS bifrecuencia Leica GX1200 dotado de un radio MODEM. Una vez obtenidas estas coordenadas, se observaron mediante topografía clásica otra serie de bases en la cueva, que se utilizaran como referencia para el levantamiento con láser escáner. Se utilizó una estación total Leica 1205. Para el levantamiento topográfico de la parte de estudio de la cueva se usó un láser escáner Faro Focus S120. La tecnología de láser escáner utiliza ondas de láser para determinar la distancia a un objeto existente. Esto permite capturar una nube de puntos de alta densidad con rapidez y después de su tratamiento, proporciona un modelo en tres dimensiones, como consecuencia de los cuales obtenemos planos en CAD, ortofotomágenes, vídeos, y otros elementos. El escáner se estaciona de tal manera que pueda cubrirse toda el área de interés, siempre superponiendo zonas consecutivas e intentando cubrir las zonas ocultas. La conexión de los escaneos se lleva a cabo a través de esferas. Para ello, se utilizaron un total de 6 esferas se colocaron para que siempre haya un mínimo de 3 esferas comunes entre los escaneos consecutivos. Para georreferenciar los escaneos se partió de las bases observadas mediante topografía clásica. En la edición se utilizó un software de procesamiento de láser escáner SCENE, uniendo todos los escaneos realizados. Para ello, se asignaron las esferas colocadas sobre las bases observadas, las coordenadas UTM, reducidas para facilitar el procesamiento al software y su numeración correspondiente para así obtener un único modelo. Posteriormente, se filtraron los puntos georreferenciados para eliminar puntos erróneos, debido a rebotes con puntos no deseados con demasiado ruido. Finalmente se obtiene una nube de puntos que se trató con AUTOCAD, importando los ficheros del escáner procesados.

Las precisiones obtenidas por medio de este método son de ± 1 cm en planimetría y ± 2 cm en altimetría, para una distancia de radiación entre 10-15 km. Para los trabajos de levantamiento con Estación Total, la precisión que nos da el aparato es de 1,5 mgon para lecturas angulares y de 5 mm + 5 ppm para las distancias. Para el láser escáner, tenemos un error sistemático en la medición de las distancias de +/- 2 mm a 10 y 25 m. Para el post-proceso de los datos, el pro-

grama SCENE no da un error geométrico exacto sino que el resultado que obtiene lo denomina tensión. En las tareas de topografía de la cavidad y levantamiento topográfico de los perfiles transversales y el perfil longitudinal se contó con lo mismo equipos y metodología.

Se procedió a realizar los cálculos de los errores con el software, lo que permitió calibrar el cálculo de las poligonales para su posterior representación sobre un plano, incluyendo las cotas en cada punto de chequeo. La representación gráfica y edición de la topografía se diseño con el software CAD, a escala original 1/250.

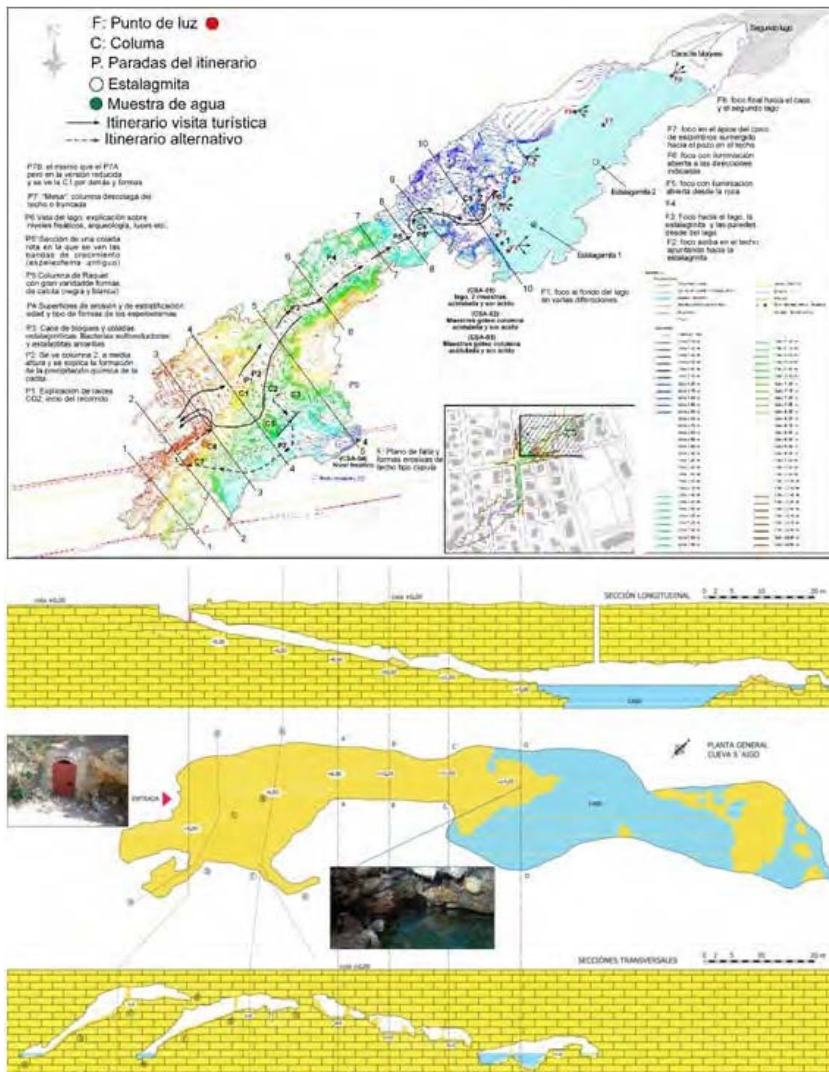


Figura 3. A) Topografía de la cueva una vez finalizada con la representación de las curvas de nivel y detallados los perfiles transversales además de otros elementos de la cueva. B) Topografía sintética de la cueva en la que se indican algunos de los perfiles transversales y el perfil longitudinal para su posterior levantamiento topográfico (IGME y CIM, 2016).

En la primera fase del trabajo, se realizó una exploración inicial para identificar los elementos y procesos geomorfológicos de la zona de estudio y así, reconocer en detalle, aquellos dominantes en cada sector, con las formas y productos derivados de los mismos, las secuencias estratigráficas y su orden sedimentario, atendiendo a los cambios laterales y verticales; también se abordó el estudio de otros elementos estructurales, como dirección, longitud y espesor de fracturas y/o fallas, así como las formas del techo de la cueva, atendiendo también a su variabilidad espacial. Seguidamente, se definieron los puntos en los que se iban a levantar las secciones transversales. Se seleccionaron 7 perfiles transversales a la dirección principal de la cueva, entre la entrada y el lago (figura 3), con una orientación principal en la mayoría NO-SE, y un perfil longitudinal NE-SO.

Para el levantamiento topográfico de los perfiles transversales, previamente indicados sobre el plano topográfico de la cavidad, se procedió a extender una cinta métrica entre los puntos marcados para cada perfil. Con el apoyo de la cinta métrica y el distanciómetro, se detalló el relieve del techo tomando las alturas.



Figura 4. En la imagen se observa cómo se identifican los detalladamente los datos espaciales de cada transecto para realizar el perfil.

Los datos topográficos se tomaron cada 50 cm o, en su defecto, en aquellos puntos de la sección transversal que por sus interés geomorfológico era necesario representar (cambios bruscos de pendiente, espeleotemas singulares, secuencias sedimentarias representativas, estalactitas, bóvedas de disolución, etc.) (figura 4). Posteriormente, con la estación total y mediante la técnica previamente explicada se procedió al levantamiento topográfico del relieve del suelo. Por último, se volcaron los datos tomados sobre el terreno de forma que definió el relieve de éste por una nube de puntos X, Y, Z. A la coordenada Z de la nube de puntos del suelo, se le integró la altura medida con el distanciómetro y se obtuvo una nueva nube de puntos, que es la que finalmente define el relieve del techo de la cueva. Superponiendo ambos perfiles y definiendo el relieve de la sección, cuyo resultado es el contorno de una sección transversal entre dos puntos de una zona seleccionada de la cueva en un plano a escala 1/250 (figura 5).

La representación geomorfológica en planta y los perfiles transversales

La representación espacial de la geomorfología de la cavidad trasladada a la planta y a los perfiles transversales se realizó con el apoyo de un distanciómetro Leica DISTO-D3a BT, que determina la distancia horizontal con precisión de ± 1 mm y la altura indirecta con un sensor de inclinación integrado ($\pm 45^\circ$). La cinta métrica se utilizó como referencia directa sobre el terreno de la sección tomada y, dispuesta en la misma dirección que el perfil, para que cada elemento quedara representado con la mayor precisión posible. También, se utilizó una brújula como material de apoyo para obtener medidas precisas de cambios de orientación en el perfil, direcciones de fracturas, alineaciones de espeleotemas o direcciones de estratificación de los sedimentos detríticos.

Durante el proceso de cartografía de los perfiles sobre el terreno se anota sucesivamente toda aquella información de interés y se corrigen los contornos para que se adecuen a la forma real de la sección (figura 6). Esta información posteriormente se incorpora y, en último término, se traslada a un nuevo formato volcando los datos en un SIG. Sobre el contorno de la sección a escala 1/250 se dibujan de forma convencional los elementos dispuestos en esa transversal, siguiendo el procedimiento de cartografiar siempre en una dirección y, representando en primer lugar, las formas que son referencias espaciales del perfil, como elementos antrópicos (pasarelas, caminos, muros etc.), espeleotemas o bloques de gran dimensión (figura 6). A continuación, se representan el resto de elementos geomorfológicos; primero los dispuestos en el suelo y, por último, los que se han desarrollado en el techo y las paredes, como estalactitas, formas de disolución, fracturas o encajamientos laterales de la red fluviokárstica. De los espeleotemas, sedimentos detríticos, bloques y otros depósitos se miden alturas, espesores, diámetros y distancias desde el techo y/o entre ellos trasladados a escala en un mapa. Tanto de la sección transversal y longitudinal en su conjunto, como de algunos depósitos o formas de interés se realiza paralelamente un catálogo fotográfico con el fin de completar la información, corregir algún error sobre el terreno en las sucesivas campañas de campo o, en el momento de su edición, pudiendo incorporar algún dato, previamente verificado. Cada perfil antes de ser editado en el gabinete se repasa relacionando medidas y distancias con la topografía base de la cueva y con el catálogo fotográfico. También, se realiza una leyenda que será integrada en todos los perfiles con los símbolos para los elementos representados.

La información obtenida de los perfiles transversales y el perfil longitudinal será muy útil para

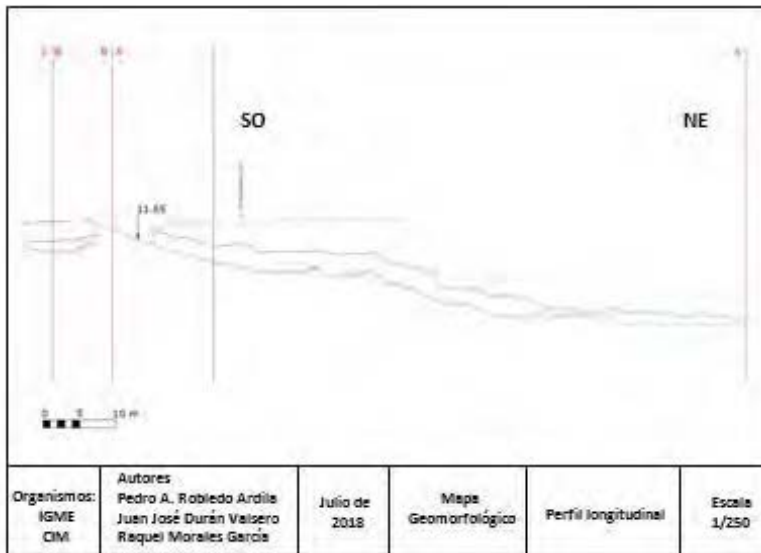
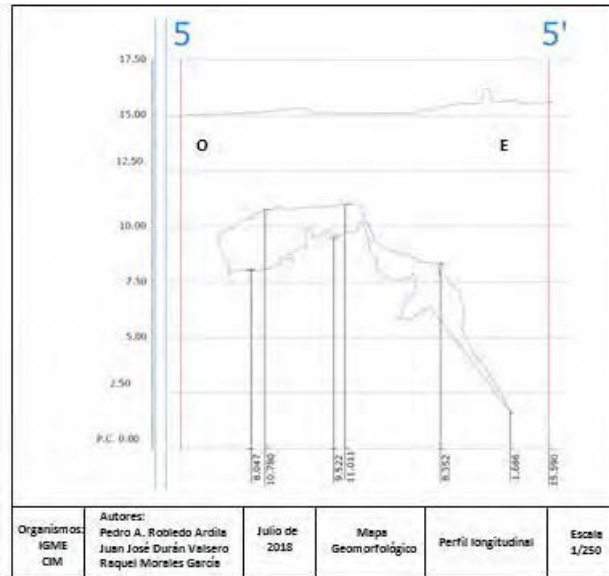


Figura 5. Contorno de una sección transversal. En la imagen superior el perfil n° 5, y el perfil longitudinal en la imagen inferior, tras el levantamiento topográfico a escala 1/250.

elaborar la geomorfología en planta de la cueva, ya que el mapa final puede incorporar algunos datos que, de otra forma, no habrían sido tomados. La leyenda para dicho mapa se basa en la definida por *international Speleological Union* (UIS), aunque algunos de los símbolos fueron modificados o creados en trabajos anteriores de forma que pudiera dar respuesta a elementos puntuales no contemplados en dicha clasificación. Por último, la información se traslada a un nuevo

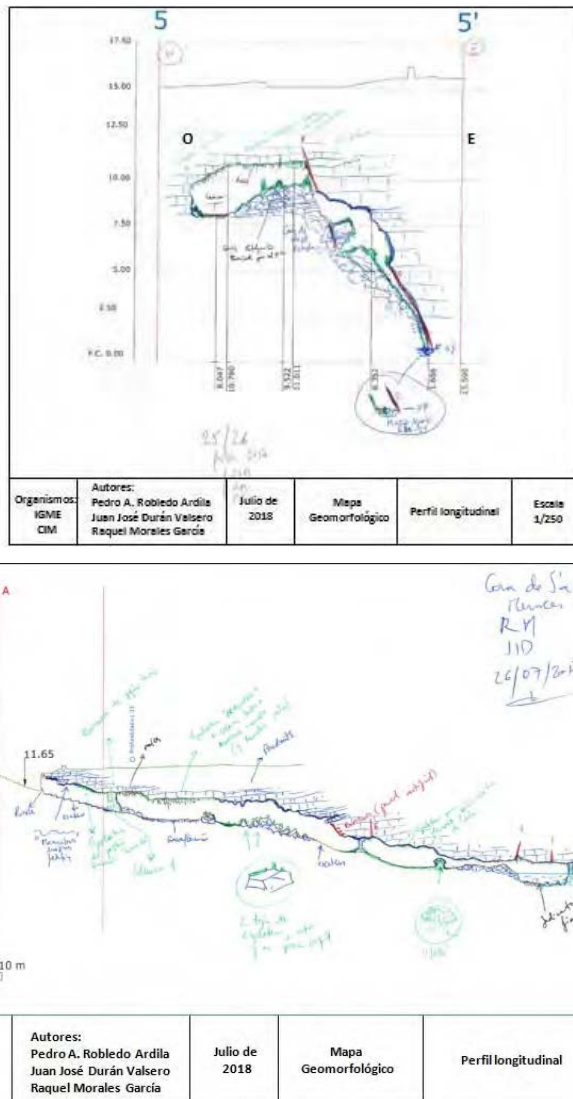


Figura 6. Representación geomorfológica del perfil transversal n° 5 sobre el terreno (imagen superior) y de perfil longitudinal (imagen inferior).

formato volcando los datos en un SIG, previo repaso de las medidas y distancias sobre con la topografía en planta de la cueva, las anotaciones realizadas y con el catálogo fotográfico.

Aplicación del SIG en la cartografía geomorfológica

Los perfiles transversales y el mapa geomorfológico se digitalizaron, georreferenciaron y, finalmente, se trasladó la información a un SIG. Las líneas y polígonos derivados de cada grupo de

formas cartografiadas se nivelaron y codificaron, dando a cada grupo de la leyenda una capa. Este sistema permite gestionar la información descrita de forma que sea equivalente en cada perfil y sobre la planta, para caracterizar y describir la distribución espacial de la geomorfología.

Resultados y discusión

El resultado final se presenta de los perfiles transversales y el perfil longitudinal en un formato a escala 1/250, representa nítidamente el contorno de la sección, las morfologías del suelo y el techo de la cavidad y los elementos antrópicos ubicados en la transversal de cada sección. Cada plano de los perfiles va acompañado del título, según la zona en la que se ha realizado, el transecto de la sección representada sobre la planta, la orientación de la sección, una leyenda de los elementos que han sido cartografiados, un texto descriptivo de la geomorfología representada y una secuencia de tres fotos en la que se observan aquellos elementos más representativos (figura 7).

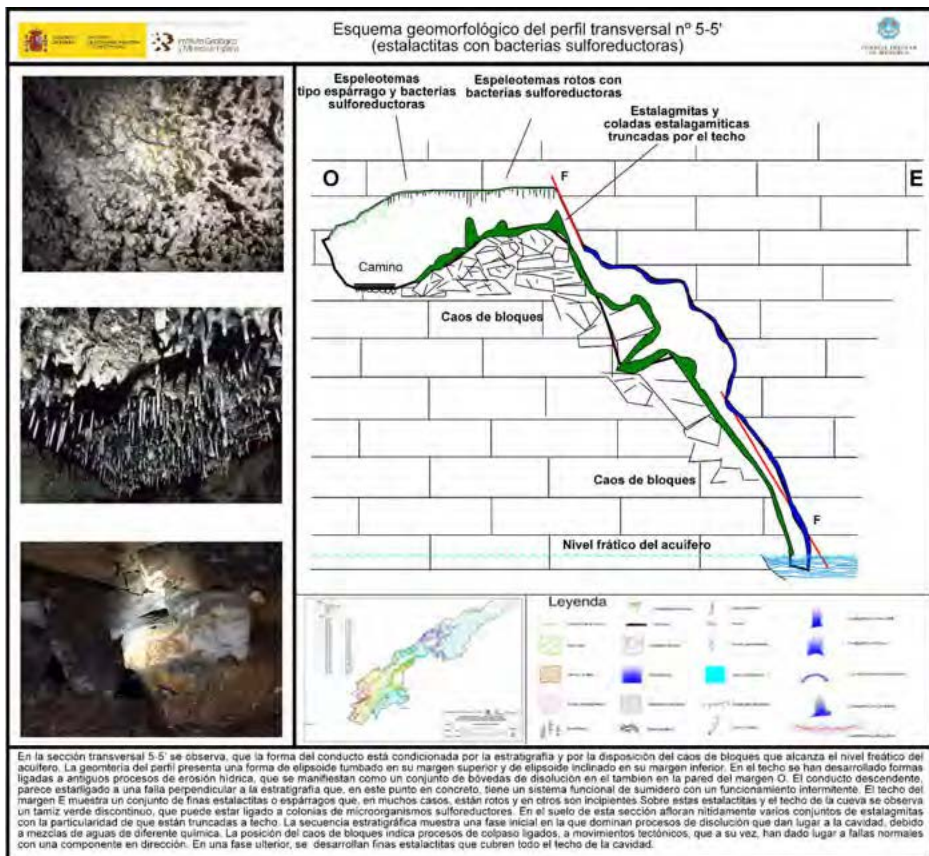


Figura 7. Representación geomorfológica del perfil transversal nº 5 una vez procesado.

Respecto a la interpretación de los trabajos de la cartografía geomorfológica, las secciones transversales y la sección longitudinal, se han podido describir, de forma preliminar, las formas y productos del suelo y el techo de la cueva y su distribución espacio-temporal. El registro sedimentario de la cueva de s'Aigo presenta, a grandes rasgos, dos tipos de sedimentos: autóctonos, relacionados con colapsos, y desprendimientos de grandes bloques y espeleotemas. Y sedimentos detríticos alóctonos, representados por los depósitos detríticos ligados como respuesta a la sucesión de etapas con pulsos más o menos energéticos del flujo de agua endokárstica. La cavidad tiene un control espeleogenético ligado a las aguas subterráneas del acuífero, como se puede observar en las fluctuaciones del lago endokárstico que constituye una parte importante de la cueva, y de la interfase agua dulce-agua salada. Sin embargo, el techo de la cavidad muestra una serie de bóvedas o cúpulas de disolución y/o corrosión que bien podrían estar ligadas a procesos de otra índole en fases pretéritas.

Conclusiones

Los trabajos llevados a cabo en la cueva de s'Aigo mediante una metodología en la realización de mapas geomorfológicos, ponen de manifiesto que es una herramienta muy útil para el conocimiento de los procesos geomorfológicos que han generado la cavidad. La realización de perfiles transversales a la dirección principal de la cavidad y el perfil longitudinal para su representación geomorfológica, permite obtener una información que hasta ahora no había sido abordada por su complejidad, como es la geomorfología del techo de la cueva y los datos sobre de altura, espesores o diámetros de las formas y depósitos. Este aspecto, supone un enorme avance cualitativo y cuantitativo en el conocimiento integral de los procesos que operaron en la cueva, de la ciclicidad de los eventos, así como de la evolución geomorfológica del sistema. Con ello, se obtiene un conjunto de mapas donde la representación de la distribución espacial de la geomorfología en la cueva es mucho más precisa y amplia, ya que los elementos geomorfológicos representados complementan y mejoran el análisis geomorfológico final. Los mapas finales permiten representar los elementos geomorfológicos dotándolos de un dato espacial en la vertical, por lo que es posible establecer el orden cronológico según la disposición de los depósitos en las diferentes zonas de la cueva. Este innovador trabajo para analizar la geomorfología endokárstica de la cueva, puede ser utilizado como herramienta para otros trabajos científicos y mejorar la gestión, conservación y planificación de las cuevas turísticas.

De la interpretación de los perfiles geomorfológicos se deduce que la forma en sección de la cueva está condicionada por la estratigrafía, la fracturación y la disposición de los grandes bloques desprendidos que, en algunos puntos, alcanzan el nivel freático del acuífero. Se han identificado formas ligadas a antiguos procesos de erosión hídrica, que se manifiestan como un conjunto de bóvedas de disolución en el techo y las paredes. Las formas de goteo gravitacionales como las estalactitas son casi todas muy recientes debido a la inestabilidad del techo que da lugar a caídas de bloques relativamente frecuentes, lo que impide un desarrollo más abundante. No obstante, el techo del margen SE de la cavidad muestra un conjunto de finas estalactitas que, en muchos casos, están rotas. Ligados a estas estalactitas se ha observado un tapiz verde discontinuo, que puede estar ligado a colonias de microorganismos sulforreductores. A lo largo de la cueva se observan nitidamente varios conjuntos de estalagmitas con la particularidad de que están truncadas a techo y, en muchos casos,

rotadas, con una segunda familia que se asienta en posición vertical, lo que nos permite identificar al menos, dos familias de espeleotemas. La secuencia estratigráfica muestra una fase inicial en la que dominan procesos de disolución que dan lugar a la cavidad, posiblemente debido a mezclas de aguas de diferente composición química. La posición del caos de bloques muestra que es anterior al desarrollo de las dos familias de estalagmitas. En una fase ulterior, se desarrollan finas estalactitas que cubren parte del techo de la cavidad.

Por otra parte, es importante destacar que el lago endokárstico inunda una parte de la cavidad muy importante y, por tanto, debe establecerse una correlación entre zona inundada y zona subaérea. Se han observado estalagmitas por debajo de la lámina de agua, así como espeleotemas epifreáticos en las paredes y sobre la superficie del agua (calcita flotante). Estos aspectos, serán abordados con técnicas de dataciones absolutas para conocer la evolución establecida previamente en cuanto a la secuencia y el orden sedimentario, y así conocer si su desarrollo es anterior o posterior a las observadas en la zona emergida de la cueva.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del Convenio de Colaboración entre el Instituto Geológico y Minero de España y el Consell Insular de Menorca. Agradecer de forma concreta la colaboración prestada por el Ajuntament de Ciutadella y, de forma particular, a Pedro Arnau, por su constante apoyo a todas las actividades realizadas en la cueva.

Referencias

- Arrese, B. 2009 Geomorfología, evolución geológica y condiciones ambientales actuales de la cueva de Nerja, Málaga. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. 306.
- Ford, D. y Williams, P. 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*, Wiley, England, 562.
- Calleja, S., Jiménez-Sánchez, M. y Domínguez-Cuesta, M.J. 2009. La Geomorfología como contexto del arte rupestre en la Cueva de Tito Bustillo (Ribadesella, Asturias), in: J.J. Durán, J. López-Martínez (Eds.), Cuevas turísticas, Cuevas vivas. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 27–39.
- Colina, J. y De Manuel, J.A. 2007. Rehabilitación y recuperación de espeleotemas en la cueva El Soplo para su habilitación al uso turístico. En: J.J. Durán, P.A. Robledo y J. Vázquez (Eds.). Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible. Publicaciones del IGME, nº 24, 43-56. Madrid.
- Fairchild, I. y Baker, A. 2012. *Speleothems science: from process to past environments*. Wiley-Blackwell. 450.
- García-Mondéjar, J., Agirrezabala, L.M., Aranburu, A., Fernández-Mendiola, P.A. Gómez-Pérez, I. López-Horgue, M. y Rosales, I. 1996. The Aptian-Albain tectonic pattern of the Basque-Cantabrian basin (northern Spain). *Geological Journal*, 31, 13-45.
- Jiménez-Sánchez, M., Durán, J.J. López-Martínez, J. Martos, E. y Arrese, B. 2004. Estudios geomorfológicos en cavidades kársticas de España in: B. Andreo, J.J. Durán (Eds.), *Investigaciones en sistemas kársticos españoles*, vol. 12, Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, IGME, Madrid, 333–349.
- Jiménez-Sánchez, M., Anadón-Ruiz, S., Farias, P., García-Sansegundo, J. y Canto Toimil, N. 2004. Geomorfología de la cueva de Tito Bustillo y del macizo kárstico de Ardines (Ribadesella, Costa Cantábrica, Norte de España), *Boletín del IGME* 2 (115) 257–263
- Jiménez-Sánchez, M., Aranburu, A., Martos de la Torre, E. y Domínguez-Cuesta, M.J. 2006. Patrimonio ge-

- ológico en las cuevas prehistóricas de Asturias: Métodos de trabajo en la Cueva de Tito Bustillo (Ribadesella), *Trabajos de Geología* 26 163–174.d *Karst Study*. 69 (1) (2007) 76–93.
- Jiménez-Sánchez, M., Ballesteros, D., Domínguez-Cuesta, M.J., Rodríguez, L. y Naves, B. 2011 a. Geomorfología de la Cueva El Soplao. En: J.J. Durán (Ed). *El Soplao: una venta al mundo subterráneo*. Gobierno de Cantabria. Santander. 81-90.
- Jiménez-Sánchez, M., Domínguez, M.J., Aranburu, A., y Martos, E. 2011 b. Quantitative indexes based on geomorphologic features: A tool for evaluating human impact on natural and cultural heritage in caves. *Journal of Cultural Heritage* 12, 270–278
- Martín, G., 2011. De las primeras exploraciones espeleológicas a la topografía 3-D. En: J.J. Durán (Ed). *El Soplao: una venta al mundo subterráneo*. Gobierno de Cantabria. Santander. 42-46.
- Quesada, S., Robles, S. y Rosales, I. 2005. Depositional architecture and transgressive-regressive cycles within Liassic backstepping carbonate ramps in the Basque–Cantabrian Basin, N Spain. *Journal of the Geological Society, London*, 162, 531-548.
- Robledo. P.A. 2008. *La cueva de El Soplao: una belleza infinita*. En: Guía de las excursiones del II Congreso Español de Cuevas Turísticas (CUEVATUR). 16-18 de octubre, Santander. 17-28 pp. (Depósito legal: SA - 772 – 2008).
- Robledo P.A. y Durán, J.J. 2009. Datos preliminares sobre la tipología, distribución y génesis de las excéntricas en la cueva de El Soplao, Cantabria, España. En: J.J. Durán y López Martínez J (Eds). 2009. *Cuevas turísticas, Cuevas Vivas*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. Madrid 13-27
- Robledo, P.A. y Durán, J.J. 2011. Los espeleotemas de El Soplao: un mundo de formas y colores. En: J.J. Durán (Ed). *El Soplao: una venta al mundo subterráneo*. Gobierno de Cantabria. Santander. 96-103
- Robledo P.A., Durán, J.J. González Hierro, M. y Castanedo, M. 2012. Geomorfología de las galerías de la vista de turismo pasarela de la cueva de El Soplao, Cantabria (España). En: *Las cuevas turísticas como activos económicos: conservación e innovación* - J.J. Durán. y P.A. Robledo, eds. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. 101-115.
- Robledo P.A. y Durán, J.J. 2016. Geomorfología de la cueva de Ardales, Málaga. Informe inédito. 72.
- Rossi, C, L., Lozano, Isanta, N. y Hellstrom, J. 2010. Manganese stromatolites in caves: El Soplao (Cantabria, Spain). *Geology*, 38 (12), 1119-1122
- White, W.B. 2007. Cave sediments and paleoclimate, *Journal of Cave and Karst Study* 69 (1) 76–93.

I. Álvarez, *et al.*, 2018. Metodología para la definición del perímetro de protección en los sistemas kársticos con arte rupestre: el caso de las cuevas de Alkerdi (Navarra, España). En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 95-110.

Metodología para la definición del perímetro de protección en los sistemas kársticos con arte rupestre: el caso de las cuevas de Alkerdi (Navarra, España)

I. Álvarez⁽¹⁾, A. Aranburu^(2, 6), A. Bodego⁽³⁾, M. Arriolabengoa^(2, 6), E. Iriarte⁽⁴⁾, P. Bilbao^(2, 6), M. del Val⁽⁵⁾, V. Abendaño⁽⁶⁾, J.I. Calvo⁽⁶⁾, D. Garate Maidagan⁽⁷⁾, A. Hermoso de Mendoza⁽⁶⁾, F. Ibarra⁽⁶⁾, J. Legarrea⁽⁷⁾, J. Tapia Sagarna⁽⁴⁾ y J. Agirre Mauleon⁽⁴⁾

(1) Departamento de Expresión Gráfica y Proyectos de Ingeniería, Euskal Herriko Unibertsitatea/Universidad del País Vasco, Paseo Rafael Moreno "Pitxitxi" nº2, 48013 Bilbao, Bizkaia. irantzu.alvarez@ehu.eus

(2) Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Euskal Herriko Unibertsitatea/Universidad del País Vasco. Barrio Sarriena s/n 48940 Leioa, Bizkaia.

(3) Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Euskal Herriko Unibertsitatea/Universidad del País Vasco. Barrio Sarriena s/n 48940 Leioa, Bizkaia.

(4) Laboratorio de Evolución Humana, Edificio de I+D+i, Universidad de Burgos, Plaza Misael Bañuelos s/n, 09001 Burgos

(5) Centro nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), 09002 Burgos

(6) Geo-Q Aranzadi, Korsenabarri Baserría, 48940 Leioa

(7) Instituto Internacional de Investigaciones Prehistóricas de Cantabria, Universidad de Cantabria. Avda. de los Castros s/n, 39005 Santander

RESUMEN

La aparición de elementos artísticos en entornos tan sensibles como los kársticos requiere, en la mayoría de los casos, el establecimiento de figuras de protección que regulen los usos permitidos en dicho entorno. En este trabajo se expone una metodología para el cálculo del riesgo geológico al que está sometido un Bien de Interés Cultural (BIC) emplazado en un entorno kárstico (pinturas y grabados rupestres). Para ello, se ha realizado un estudio inicial de las características geológicas del entorno (litología, geomorfología del endokarst y del exokarst y estudio de la fracturación) suficientes para realizar una primera valoración de los riesgos, a la espera de los datos ambientales de la cueva que requieren otros plazos. Todos estos datos han permitido calcular, por medio de un Sistema de Información Geográfico (GIS), el peligro geológico del entorno, la vulnerabilidad del patrimonio que se desea proteger y la exposición de ésta al peligro. Combinando estos parámetros se ha calculado y cartografiado el riesgo natural existente y se ha definido el perímetro de protección necesario, en base a estos parámetros para la preservación del patrimonio cultural. La aplicación de esta metodología se ha realizado en las cuevas de Alkerdi situadas en el municipio de Urdazubi/Urdax (Navarra, norte de España) y donde se han encontrado galerías con grabados del paleolítico superior y las pinturas paleolíticas más antiguas de la comunidad navarra.

Palabras clave: arte rupestre, área de Protección, karst, riesgo geológico, Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Methodology for the definition of a protection perimeter in karstic systems with rock art: the case of the Alkerdi caves (Navarra, Spain)

ABSTRACT

When artistic items are found in karst environments, requires, in most of the cases, to establish a protection perimeter to regulate the list of activities permitted in the area. This paper sets out a methodology for calculating the geological risk to which an Item of Cultural Interest (ICI) located in a karst environment is exposed. An itemised study of the geo-

logical characteristics of the cave environment is proposed: lithological cartography, endokarst and exokarst geomorphology and the study of fracturing of the limestone massif. Based on these data and using a Geographical Information System (GIS), it was possible to calculate the degree of the geological threats on a susceptibility map, according to the vulnerability of the heritage item to be protected and its exposure to the identified hazardous geological processes. By combining these parameters, the existing geological risk was calculated and mapped and the necessary protection perimeter for conservation of the cultural heritage was defined. This methodology was applied in the Alkerdi caves located in the municipal area of Urdazubi/Urdax (Navarre, northern Spain), where speleological and archaeological prospections found new galleries with Upper Palaeolithic engravings and the oldest Palaeolithic rock paintings of the province.

Keywords: Geographical Information Systems (GIS), geological risk assessment, karst, protection area, rock art.

Introducción

El descubrimiento de arte rupestre supone siempre un nuevo reto para la investigación, pero también para la administración encargada de su gestión y su protección. La aparición de elementos artísticos en entornos naturales que no gozan de figuras de protección específicas supone la adecuación de los usos permitidos en dicho entorno. Por ello, antes de comenzar con las tareas de conservación y restauración, es necesario realizar un análisis de los peligros naturales y/o humanos existentes en la zona y de la vulnerabilidad del patrimonio, para así poder determinar el perímetro de protección necesario para prevenir posibles afecciones (Allison, 2002; Sánchez et al., 2007).

En muchos casos, el hallazgo de nuevos elementos artísticos se suele dar en sistemas kársticos. Sin embargo, actualmente no existe una metodología contrastada y globalmente aceptada para el cálculo del riesgo geológico en los entornos kársticos que permita proteger tanto, el patrimonio artístico como el natural. Se han realizado distintas propuestas, como las realizadas por Robledo et al. (2015), Carrasco et al. (2015) (PROTEKARST), Angulo et al. (2013), Martín-Rosales et al. (2012) y Iriarte et al. (2010), todos ellos basados en la superposición de diferentes capas con información relativa a múltiples factores (geología, litología, geomorfología, hidrología, hidrogeología, etc.) y en la creación de un mapa de zonificación.

Tampoco existe un modelo objetivo, jerarquizado y testado para el establecimiento de un perímetro de protección para la preservación de un Bien de Interés Cultural (BIC) ubicado en entorno kárstico (un ejemplo lo podemos ver en la cueva de Nerja (Málaga) (Junta de Andalucía, 2006). Los modelos de protección que se aplican difieren dependiendo de la administración que lo aplique (Iriarte et al., 2010). Ello, puede deberse a que los entornos kársticos son complejos, donde el patrimonio cultural y natural están estrechamente relacionados (Jiménez-Sánchez et al., 2011) y, por lo tanto, es recomendable aplicar métodos flexibles que permitan adecuar el cálculo a las características específicas de cada lugar (Jiménez-Sánchez et al., 2011).

En este trabajo se muestra una metodología creada *ad hoc* para el cálculo del índice de riesgo geológico en el macizo kárstico de Alkerdi y la definición del perímetro de protección necesaria para la preservación de las pinturas y grabados hallados en las cuevas del macizo. El índice ha sido calculado teniendo en peligros geológicos del entorno, los peligros asociados a la vulnerabilidad del bien a preservar y la exposición de este bien a los peligros geológicos. La combinación de todos estos parámetros ha permitido calcular el riesgo geológico al que puede estar sometido el BIC, y delimitar el perímetro de protección para garantizar su preservación. Debido a la flexibilidad de la misma, puede ser aplicada en cualquier entorno kárstico.

Caso de estudio: el sistema kárstico de Alkerdi

El macizo de Alkerdi está situado en el norte de la Comunidad Foral de Navarra (España), en el término municipal de Urdazubi/Urdax, limítrofe con Francia (figura 1). El macizo lo compone un afloramiento de calizas arrecifales cretácicas que se prolonga, de forma discontinua, en dirección SO-NE.

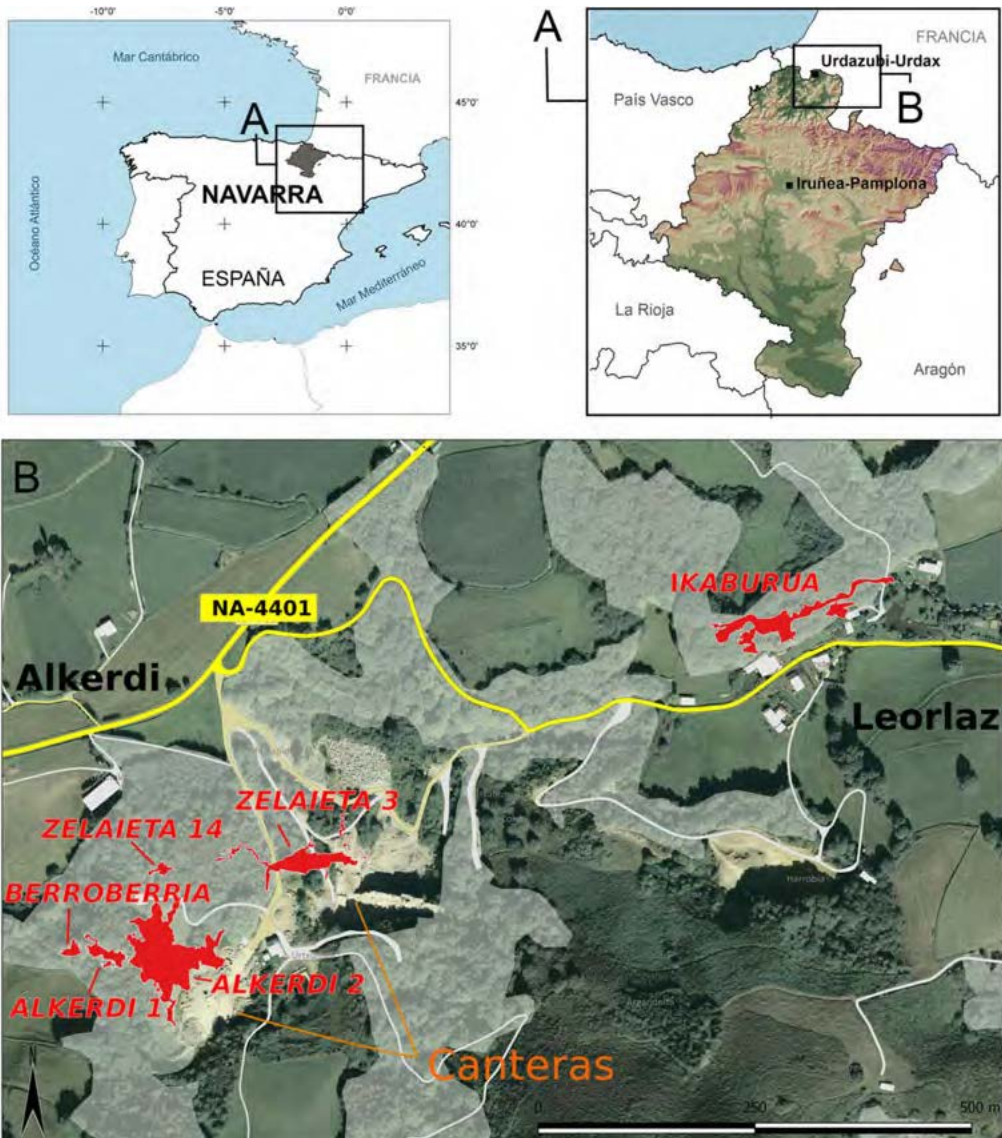


Figura 1. Localización del sistema kárstico de Alkerdi-Zelaieta-Ikaburua. Proyección en planta de las principales cuevas (en rojo).

En este macizo se ubica el extenso sistema kárstico de Alkerdi-Zelaieta-Ikaburua, aún en proceso de exploración, y donde se han encontrado, hasta el momento, medio centenar de elementos kársticos entre cuevas, sumideros y surgencias. El sistema, estructurado en cuatro pisos de dirección SO-NE, se extiende a lo largo de ca. 3 km y está compuesto por seis cuevas principales (figura 1). Una de estas cuevas, Alkerdi 1, contiene importantes elementos de arte rupestre e incluso grabados considerados como Bien de Interés Cultural (BIC) (Casteret, 1933; Garate y Rivero, 2015) y recientemente se han hallado nuevas manifestaciones de arte rupestre en la cueva de Alkerdi 2 (pinturas y grabados, hogares y material disperso), todos ellos situados en el segundo piso kárstico (Álvarez *et al.*, 2016). Debido a la importancia de los descubrimientos, la administración encargada de su gestión ha promovido realizar un estudio de los peligros naturales que podrían dañar las manifestaciones artísticas, así como la afección derivada de la cantera dedicada a la explotación de la caliza adyacente a la cueva (actualmente parada). El objetivo del estudio es, por tanto, determinar los riesgos naturales y definir así el perímetro de protección necesario para la conservación del BIC.

Metodología

Cualquier metodología utilizada para determinar el riesgo al que puede estar sometida una cueva y, por lo tanto, las pinturas y grabados hallados en ella, debe basarse en un conocimiento exhaustivo de todos los procesos que puedan afectar a la conservación de los mismos, que serán aquellos que se den sobre la cueva y en su área de influencia, variable en cada caso de estudio (Robledo *et al.*, 2015). Los riesgos potenciales en una cueva pueden ser tanto naturales (geológicos y/o ambientales) como provocados por la actividad humana. En este sentido, cabe mencionar que en el entorno del macizo de Alkerdi existe una cantera que ha estado en activo pero que actualmente está cerrada. Por ello, en este estudio no se han considerado los riesgos derivados de dicha actividad extractiva.

En los entornos kársticos el riesgo geológico se relaciona con todas aquellas amenazas que puedan alterar, de una u otra forma, el entorno del bien que se desea preservar. Esto requiere del estudio de todas las características geológicas, geomorfológicas y ambientales del interior y del exterior de la cueva. Sin embargo, el hallazgo de arte rupestre requiere, en muchos casos, de una intervención inmediata que impide un análisis de todos los factores. Los análisis ambientales, por ejemplo, requieren del registro y el estudio de diferentes parámetros ambientales e hidrogeológicos del interior de la cueva durante un periodo de 1 a 4 años. En el caso de este trabajo, el hallazgo de pinturas y grabados de gran valor requería un primer análisis inmediato que impidió la realización de ese análisis a largo plazo (sin embargo, cabe destacar que ya se han implantado los medidores necesarios en el interior de las cuevas que permitirán avanzar en el estudio en el medio plazo). A su vez, un análisis exhaustivo del sistema endokárstico requeriría del uso de medios indirectos como el georadar y las tomografías eléctricas (Robledo *et al.*, 2015), técnicas que precisan de zonas más o menos llanas y practicables (en el primer caso) y unas dimensiones mínimas (en el caso de las tomografías), lo que ha imposibilitado su aplicación en este estudio. Por ello, en este trabajo se expone una metodología para establecer el mapa de riesgo geológico del macizo de Alkerdi que permita plantear un primer perímetro de protección que podrá ser modificado por estudios posteriores.

Las pinturas y grabados que se han considerado en este estudio están localizadas en el nivel

kárstico más alto. Los peligros geológicos estudiados han sido: i) la infiltración de agua en el sistema kárstico, porque puede afectar directa o indirectamente el bien, ya sea por disolución o por la creación de nuevos espeleotemas sobre el mismo (Aranburu *et al.*, 2010); ii) los cambios en la circulación ambiental, debido a que los cambios en la condensación del agua pueden producir los mismos efectos que en el caso anterior (Lismonde, 2002); iii) el colapso de paredes y techos, que podrían impedir el acceso o destruir el bien cultural (Waltham *et al.*, 2005). En entornos kársticos la microporosidad del macizo rocoso relacionada con la litología, la fracturación controlada por características estructurales y la densidad de la porosidad de los conductos (endokarst) son los principales parámetros a tener en cuenta en la evaluación de los peligros. Una vez establecidos los procesos geológicos que potencialmente pueden suponer una amenaza, la magnitud del riesgo (R) se ha calculado siguiendo los siguientes pasos (Iriarte, *et al.* 2010; SGVE, 2008; Ayala y Olcina, 2002):

- Identificación y análisis de la susceptibilidad (S). El sistema kárstico de Alkerdi se ve afectado por:
 - Susceptibilidad litológica (S_l): basado en su composición, textura y la capacidad de ser erosionado.
 - Susceptibilidad por fracturación (S_f): basado en sus características estructurales y número de familias de discontinuidades (diaclasas, fallas y estratificación).
 - Susceptibilidad del exokarst (S_{ex}): basado en el impacto potencial de los diferentes elementos y procesos geomorfológicos (exokarst) que pueden interferir en el endokarst.
 - Susceptibilidad del endokarst (S_{end}): basado en los procesos geológicos potenciales que se dan en la cavidad vadosa.
- Cálculo de la vulnerabilidad (V) de los elementos de arte parietal, tanto las intrínsecas como las derivadas del propio soporte y/o del entorno más próximo. Representa la fragilidad de los elementos a proteger ante los peligros.
- Cálculo de la exposición (E) o el grado en el que pueden verse afectados ante un peligro. La exposición dependerá de la distancia a los distintos peligros naturales.
- Cálculo del riesgo geológico (R) como combinación de la susceptibilidad geológica, la vulnerabilidad y el grado de exposición del bien a proteger.
- Proponer en Área de Protección basado en la evaluación del riesgo geológico.

El análisis de los componentes del riesgo se ha apoyado en información cartográfica de la zona de estudio. Dicha información se ha integrado en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para posteriormente realizar el cálculo del riesgo geológico utilizando la denominada álgebra de mapas (Elez *et al.*, 2013). De esta forma, se han generado mapas de susceptibilidad, de vulnerabilidad y de exposición donde se representa el valor de la peligrosidad de forma cualitativa. El riesgo provocado por los agentes geológicos es la suma de los distintos peligros geológicos, multiplicado por la exposición y la vulnerabilidad del elemento a proteger, en nuestro caso, las muestras de arte parietal paleolítico.

$$R = (S_l + S_f + S_{ex} + S_{end}) * V + E$$

El mapa del riesgo geológico será la base para el establecimiento de un perímetro de protección que garantice la protección tanto de las cavidades como de los restos de arte rupestre. El perí-

metro propuesto, podrá servir como herramienta para la gestión y la conservación de las cuevas, su entorno y su contenido (Martín-Rosales *et al.*, 2012).

Resultados

Mapa de susceptibilidad (S)

La susceptibilidad geológica y geomorfológica se ha analizado en todo el área de estudio. Y con especial interés en el estudio de fracturación y detalles geomorfológicos, especialmente en la vertical de las cuevas de Alkerdi 1 y 2. Con cada uno de los peligros considerados se ha realizado un mapa donde se ha representado el grado de susceptibilidad cualitativa y cuantitativamente.

Mapa de susceptibilidad litológica

En la zona de estudio se han diferenciado 6 unidades litoestratigráficas, de naturaleza tanto carbonata como siliciclástica. A las distintas unidades se les ha asignado un valor de peligrosidad litológica dependiendo de sus características composicionales, texturales y de alteración.

Los esquistos, pizarras y grauvacas paleozoicas (Unidad 1) y las areniscas triásicas (Unidad 2) presentan cementos silíceos y dan los relieves más abruptos al sur del frente de cabalgamiento. Los materiales más competentes de estas unidades (esquistos, pizarras, areniscas) alternan con materiales menos competentes (lutitas, grauvacas), lo que provoca una erosión diferencial que favorece la caída gravitacional de bloques o deslizamientos a favor de los niveles más arcillosos. El material acumulado por desprendimiento, colapso o deslizamiento puede ser retrabajado e introducido en el sistema endokárstico mediante flujos de agua superficial (sedimentos alóctonos), a través de las fisuras y/o dolinas. Debido a la localización de las unidades 1 y 2 en el área colindante al sistema kárstico se le asigna un valor de *peligrosidad baja*.

La unidad de areniscas albienses (Unidad 3), aflora alternante con limolitas. Contienen cemento carbonatado, incrementando así el grado de alteración por disolución química del cemento. No dan importantes resaltes, por lo que la *peligrosidad* por caídas gravitacionales es *muy baja*.

Las cuevas de Alkerdi se desarrollan en la Unidad 4 (calizas rojas con rudistas). La caliza, de naturaleza micrítica con grandes fósiles, presenta una baja estratificación, es una roca homogénea, compacta, con una estructura isotropa rígida frente a la fracturación. La disolución sin embargo, preferentemente desarrollada a favor de discontinuidades de tipo estructural (diaclasas), es muy eficaz, y más aún si el agua está acidificada por el suelo que atraviesa. El profuso desarrollo de formas kársticas, evidencia este hecho (*peligrosidad alta*).

Las calizas de la Unidad 5 presentan un carácter estratificado y una naturaleza calcarenítica a micrítica, según la zona. Estas características aumentan el peligro de fracturación y colapso de la roca (*peligrosidad muy alta*). Por último, la unidad 6 se compone de facies de tipo *flysch*, formada por margocalizas y margas limosas-arenosas tabulares. Presentan una composición mixta que favorece la meteorización y la formación de suelo dando relieves bajos y suaves. Pese a su

carácter estratificado, no hay relieves rocosos y el peligro de desprendimientos es bajo (*peligrosidad muy baja*).

Mapa de susceptibilidad por fracturación

Las fracturas y discontinuidades de la roca controlan el peligro de que se den desprendimientos en el interior de las cuevas o la posible infiltración de agua (porosidad de las fracturas) (Ford y Williams, 2007). Por ello, se han evaluado las características estructurales del macizo rocoso: se han realizado un total de 123 medidas estructurales de discontinuidades en las que se han caracterizado los parámetros necesarios para la obtención de índice RMR de Bieniawski (1979). Siguiendo la metodología propuesta por Iriarte *et al.* (2010), este índice puede ser utilizado para calcular distintos índices geológicos de calidad y riesgo para las cavidades.

El análisis de las fracturas permite agruparlas en 3 familias que se caracterizan por ser principalmente de tipo ondulado-rugoso y plana-lisa, con un espaciado moderadamente juntas y una continuidad alta que oscila entre 3 y más de 10 m. En general, son fracturas abiertas y con abundantes indicios de disolución kárstica. Se constata, por tanto, el control de las familias principales de fracturación en la formación y el desarrollo de las galerías kársticas.

De acuerdo a los parámetros de fracturación observados en el macizo rocoso, el índice RMR es de 51 y, consecuentemente, *la susceptibilidad por fracturación es baja* en todo el macizo.

Mapa de susceptibilidad del exokarst

Este mapa se ha basado en el diferente impacto potencial que las unidades geomorfológicas del exokarst pueden tener en el endokarst. La presencia de estos elementos kársticos controla el grado de conexión y las condiciones ambientales del sistema kárstico (como por ejemplo las dolinas o acanaladuras contactadas con el sistema de fracturas). La susceptibilidad de cada unidad se ha establecido en base a sus características geomorfológicas y la actividad kárstica.

- *Lapiaz cubierto*: la existencia de una cobertera sedimentaria sobre el lapiaz, aun no siendo muy profundo, ejerce un efecto barrera para la transmisión de flujos entre el exokarst y el endokarst (Veress, 2009). Por ello, presenta una peligrosidad moderada y su dinámica produce un riesgo *bajo* para las cavidades Alkerdi 1 y Alkerdi 2, y al sistema endokárstico en general. Cabe destacar la presencia del horizonte húmico de alrededor de 10-15 cm, que favorece la acidificación del agua meteórico, facilitando la disolución de la caliza en su contacto (Barton, 2013; Pardo-Iguzquiza *et al.*, 2015).
- *Lapiaz semicubierto*: mayor tasa de infiltración por lo que estas áreas suponen un riesgo *alto* para las cavidades del sistema endokárstico.
- *Lapiaz profundo*: tiene una peligrosidad elevada debido a su gran desarrollo vertical y elevada transferencia exterior-interior, suponiendo un riesgo *muy alto* para las cavidades del sistema endokárstico en general.
- *Dolinas*: conexión directa de la superficie con el endokarst, produciría un riesgo *muy alto*.
- *Cavidades exhumadas*: son partes de la red endokárstica de un paleokarst exhumado directamente expuestas en superficie, de forma que estas áreas tienen una peligrosidad alta, y la alteración de estos medios puede producir, por tanto, un riesgo *muy alto* para las cavidades.

Mapa de susceptibilidad del endokarst

Los peligros en el interior de una cavidad kárstica vienen dados por importantes y bruscos cambios en sus condiciones físicas y ambientales. Estos pueden relacionarse con: a) caídas de bloques, por colapso o fracturación mecánica; b) zonas de intenso goteo/flujo de agua por infiltración directa desde el exterior, con un corto tiempo de residencia del agua; o c) sumideros que contactan directamente con galerías inferiores, entre otros.

Para la zonificación de la peligrosidad en el sistema kárstico se ha utilizado el mapa geomorfológico y sedimentológico del endokarst. A partir de estos, se han distinguido cinco zonas diferentes en la cavidad Alkerdi 1:

- La zona de la entrada actual y donde se sitúa la cata arqueológica. Actualmente, no se percibe prácticamente ningún proceso de sedimentación. Sin embargo, al estar cerca de la entrada, los cambios ambientales que puedan ocurrir en el exterior pueden transferirse al interior, de forma que se considera zona con peligrosidad *alta*.
- Zonas activas de formación de espeleotemas. Cualquier cambio ambiental del exterior será transmitida al sistema endokárstico a través del agua de goteo que se infiltra. Estas zonas son muy sensibles a cualquier cambio ambiental y, por tanto, entrañan una peligrosidad *muy alta*.
- Los coluviones aparecen colmatando las galerías y por tanto cortando el acceso a otras zonas del karst. Su presencia indica la existencia de conductos que permiten la entrada de materiales desde el exterior por gravedad. No son cuerpos sedimentarios estables, pueden ser reactivados debido a cambios ambientales, y por tanto, se consideran zonas de peligrosidad *alta*.
- La parte final de la cavidad está caracterizada por presentar un suelo de colada (*flowstone*) que en general parece estable y con pocas zonas de reactivación. Debido a ello, se considera una zona de peligrosidad *baja*.

Aunque todavía se encuentra en fase de exploración, la cavidad Alkerdi 2 presenta más de una docena de nuevos indicios arqueológicos en sus 1.200 m de desarrollo (pinturas y grabados, industria, hogares, etc.). El gran colapso (bloquera) que cubre el suelo de la galería, resultado de la desestabilización de las paredes y techos, pone de manifiesto el carácter inestable, y por lo tanto, peligroso de la galería, que es agravado por indicios de la existencia de otra galería por debajo de la bloquera. Por esta razón, la zona central de Alkerdi 2 presenta peligrosidad *alta* y las zonas con intenso goteo y formación de espeleotemas y los sumideros, cercanos a las pinturas y grabados, presentan peligrosidad *muy alta*.

Como se he explicado anteriormente, el mapa de Susceptibilidad Geológica resultará de la integración de los distintos mapas anteriormente descritos. Por ello, el mapa de susceptibilidad resultante tendrá valores que oscilarán del 1 al 12 (figura 2).

En el mapa de susceptibilidad se observa que las cuevas Alkerdi 1 y 2 son las zonas con valores más elevados (valores 9 a 12). Todo el macizo calcáreo tiene un índice de peligrosidad alto (valor 9). Las zonas anexas varían de valores medios (4 a 6) sobre las unidades litológicas 2 y 4, valores bajos (de 1 a 3) para las zonas situadas sobre las unidades litológicas 1 y 6.

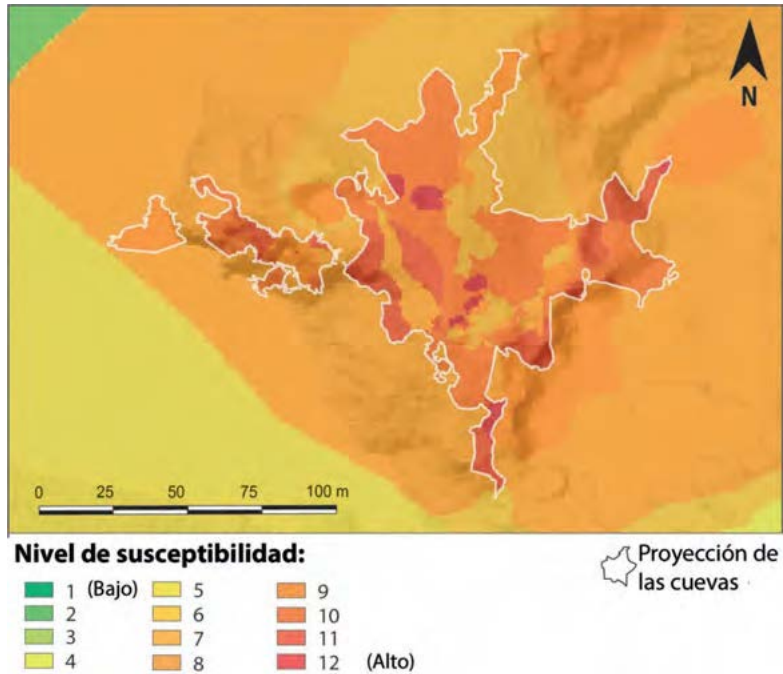


Figura 2. Mapa de susceptibilidad.

Mapa de vulnerabilidad (V)

El arte rupestre a proteger, tanto los grabados como las pinturas, es altamente vulnerable ante cualquier cambio físico y/o químico del entorno, tanto del endokarst como del exokarst. La vulnerabilidad intrínseca de las pinturas rupestres depende de la composición de los pigmentos utilizados para la fabricación y en función de esto, su sensibilidad ante los agentes de alteración será distinta. Pero dicha vulnerabilidad también puede estar condicionada por la propia fragilidad del soporte del arte parietal. Si el soporte lo constituyen formaciones de espeleotemas “colgantes”, como estalactitas, banderas o coladas, la vulnerabilidad se acentúa debido a su fragilidad, estructura cristalina y textura interna laminada. Los espeleotemas son altamente frágiles ante vibraciones ocasionadas por temblores, bien sean naturales (terremotos) o antrópicos (provocados por la actividad y las voladuras de una cantera, por ejemplo) (Gilli, 2005; Garduño-Monroy *et al.*, 2011; Akgöz y Eren, 2015). En las cuevas de Alkerdi 1 y 2 el arte parietal está realizado tanto sobre soporte de roca caliza (grabados) como de espeleotemas (pinturas).

La interacción entre las aguas subterráneas, las aguas de infiltración (pH, saturación de carbonato, etc.), las características del aire de las galerías kársticas (humedad, temperatura, CO₂), agentes biológicos y las condiciones climáticas, topográficas y geológicas del área en las que se encuentran localizadas las cuevas genera un delicado equilibrio de procesos de disolución-precipitación de carbonato. Si este equilibrio se ve alterado puede afectar drástica e irreversiblemente al arte rupestre. La cueva de Alkerdi 1 se comunica con el exterior por la puerta de entrada o ac-

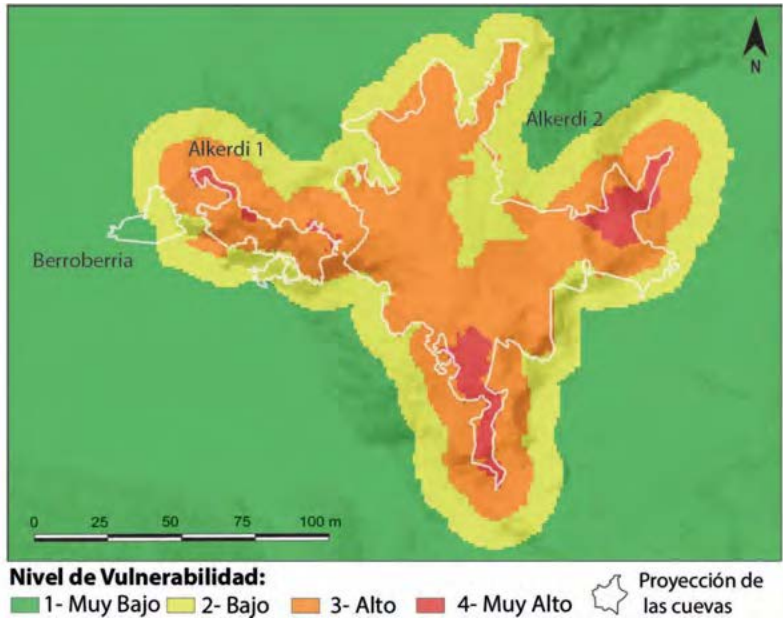


Figura 3. Mapa de Vulnerabilidad.

ceso a la cavidad. Pero es previsible que, de forma natural, la comunicación se produzca también, especialmente en periodos de altas temperaturas externas (verano) a través de otras galerías ubicadas en diferentes niveles de la cueva, y fundamentalmente a favor de las dolinas situadas en la vertical. En el caso de Alkerdi 2, la entrada es más discreta, y por tanto, la capacidad de transmisión de las condiciones ambientales externas al interior es menor. Sin embargo, una de las dolinas que está en el área de la explotación de la cantera se sitúa a 30 m de distancia de la sala del arte parietal de Alkerdi 2. En el interior de la cueva se ha observado la presencia de un cono de derrubios que proviene desde la dolina exterior, formado por clastos y abundante material de origen antrópico moderno. Desde este mismo cono de derrubio se produce la reactivación de una escorrentía que se sumerge en la sala de las pinturas y grabados de Alkerdi 2, y que afecta al relleno sedimentario sobre el que se aprecian hogares y restos arqueológicos. Estos hechos, evidencian una conexión directa entre el interior y el exterior, además de una delicada situación para la sala con arte rupestre y restos arqueológicos.

Por tanto, parece lógico atribuirle el grado máximo de vulnerabilidad a la sala donde se localizan las pinturas y grabados paleolíticos de Alkerdi 2. Y dado que los cambios en los distintos parámetros ambientales son fácilmente propagados a través de los conductos kársticos, todas las galerías que albergan arte han sido catalogadas de alta vulnerabilidad (figura 3).

Mapa de exposición (E)

La exposición es un factor que depende en gran medida de la distancia entre el bien a preservar y los peligros que pueden actuar sobre él. Los peligros ambientales del endokarst se transmiten

fácilmente a través del sistema kárstico y la exposición a estos peligros, por tanto, requiere considerar toda la cavidad kárstica como una única entidad integral. Dado que muchos de estos parámetros ambientales son regulados/modificados a través del epikarst, la exposición se incrementa cuanto más cerca de la superficie exterior esté la cavidad que contenga el elemento a proteger. Por ello, a la hora de realizar el mapa de exposición, se han considerado dos distancias; por un lado la distancia horizontal proyectada del arte a los diferentes peligros, y por otro, la distancia vertical del arte a la superficie.

Para establecer la distancia de máxima exposición horizontal, en un sistema kárstico que por definición presenta una distribución heterogénea de elementos geomorfológicos (distribución de dolinas, simas, cavidades, desarrollo del lapiaz, etc.), se ha definido y tenido en cuenta el área de afección directa sobre el bien a proteger, es decir, el área definida por la zona de influencia en la que se engloban los elementos de peligro que podrían afectar directamente al elemento a proteger. En el caso de Alkerdi 2, y para la zona de los grabados y pinturas, el área de máxima afección está delimitada por una dolina que desagua directamente a la sala de los grabados y la cavidad denominada ZEL05, situada en la plaza de la cantera, y que también conecta directamente con la cavidad de las pinturas y los grabados. El diámetro de la circunferencia que engloba ambos elementos (dolina y ZEL 05) mide en torno a los 105 m. Se ha tomado como punto del eje central la zona de arte rupestre a proteger que delimita el área de afección directa y, por tanto, de máxima exposición a los peligrosidad. Este será, por tanto, el área máxima de exposición horizontal (30.000 m² aproximadamente).

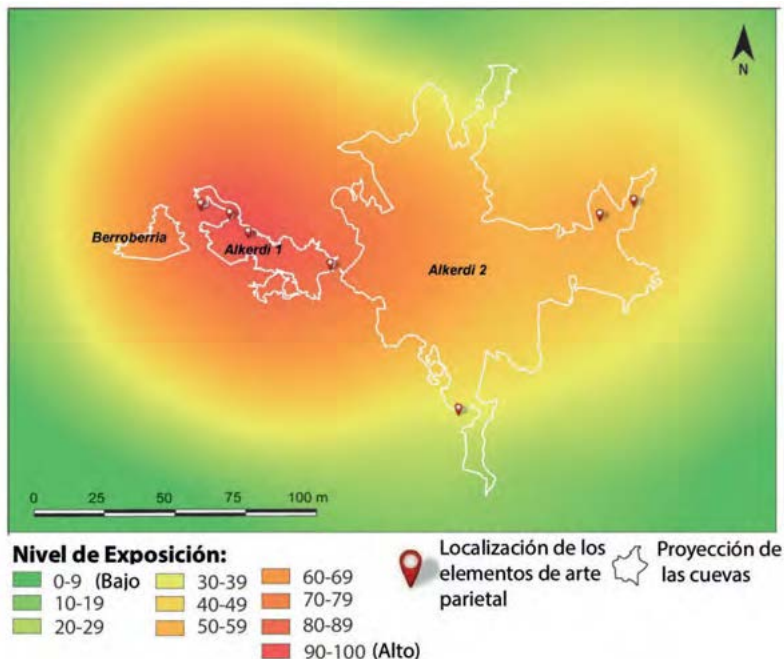


Figura 4. Mapa de Exposición basado en la combinación del nivel de exposición horizontal y vertical.

En el caso de la cueva Alkerdi 1, existe en la actualidad una distancia de protección para los grabados de 100-125 m desde la entrada de la cueva, definido mediante la declaración de BIC (Gobierno de Navarra, 1995). Sin embargo, en el presente trabajo consideramos que se debería tener como punto de referencia el propio bien a proteger y no la entrada de la cueva, es decir, la zona donde se concentran los elementos de arte rupestre, dado que la entrada puede estar situada lejos del bien a proteger e, incluso podría darse el caso, de estar fuera de la zona de afección directa. De lo anterior se ha establecido que el perímetro de protección/afección directa en este caso sea una circunferencia de aproximadamente 100 m de radio (30.000 m² aproximadamente), para el cálculo de las áreas de afección directa para todos los paneles de pinturas y grabados a lo largo del sistema kárstico.

Para calcular la distancia vertical desde los paneles con arte rupestre hasta la superficie, se han considerado las cotas máximas de las galerías donde se ubican. Se ha calculado la distancia a la superficie utilizando el modelo digital de elevaciones de la superficie del macizo de Alkerdi, y finalmente, se han invertido los valores obtenidos, ya que las distancias más grandes tendrán una exposición menor y las distancias cortas una exposición mayor.

Teniendo en cuenta el desarrollo profundo y penetrativo del lapiaz (varios metros) y el elevado desarrollo de dolinas y simas, es decir, la gran conexión entre el exokarst y endokarst, se ha considerado que la exposición a los peligros naturales es: a) máxima en aquellas cavidades con arte cuyos techos estén a menos de 25 m de distancia en la vertical desde la superficie del terreno; b) alta en aquellas zonas situadas entre 25 y 50 m; c) baja en las zonas situadas entre 50 y 75 m; d) muy baja cuando la distancia es igual o superior a 100 m o en zonas no karstificadas en superficie. Así, la exposición es máxima en las localizaciones con arte rupestre, próximas a la superficie o a las zonas de afección directa y disminuye hasta desaparecer según se aleja de estos puntos.

Mapa del riesgo geológico (R)

El objetivo del mapa de riesgo es determinar el daño que podría ser causado en el patrimonio natural y arqueológico de la zona de estudio ante los peligros naturales o, dicho de otro modo, limitar/minimizar la exposición a los peligros de aquellos bienes que se desea conservar. La magnitud del riesgo geológico total (R) será una combinación de los tres componentes del riesgo (Ayala y Olcina, 2002 y 2007; SGVE, 2008), de forma que se multiplican los tres mapas obtenidos anteriormente (susceptibilidad, vulnerabilidad y exposición). El mapa final se ha reclasificado en un mapa de colores con valores que varían desde el 1 (riesgo más bajo) al 10 (riesgo máximo). Como se puede observar en el mapa (figura 5), las zonas donde están situadas las cuevas de Alkerdi 1 y Alkerdi 2 están dentro del área de máximo riesgo, debido a que son las zonas más vulnerables (por la presencia en ellas de arte parietal) y también las más expuestas. El resto del macizo estaría clasificado con un valor bajo del riesgo.

Perímetro de protección

Del mapa de riesgos geológicos elaborado se deduce que para proteger los distintos paneles con arte rupestre del macizo de Alkerdi, el entorno de protección se debe extender, como mí-

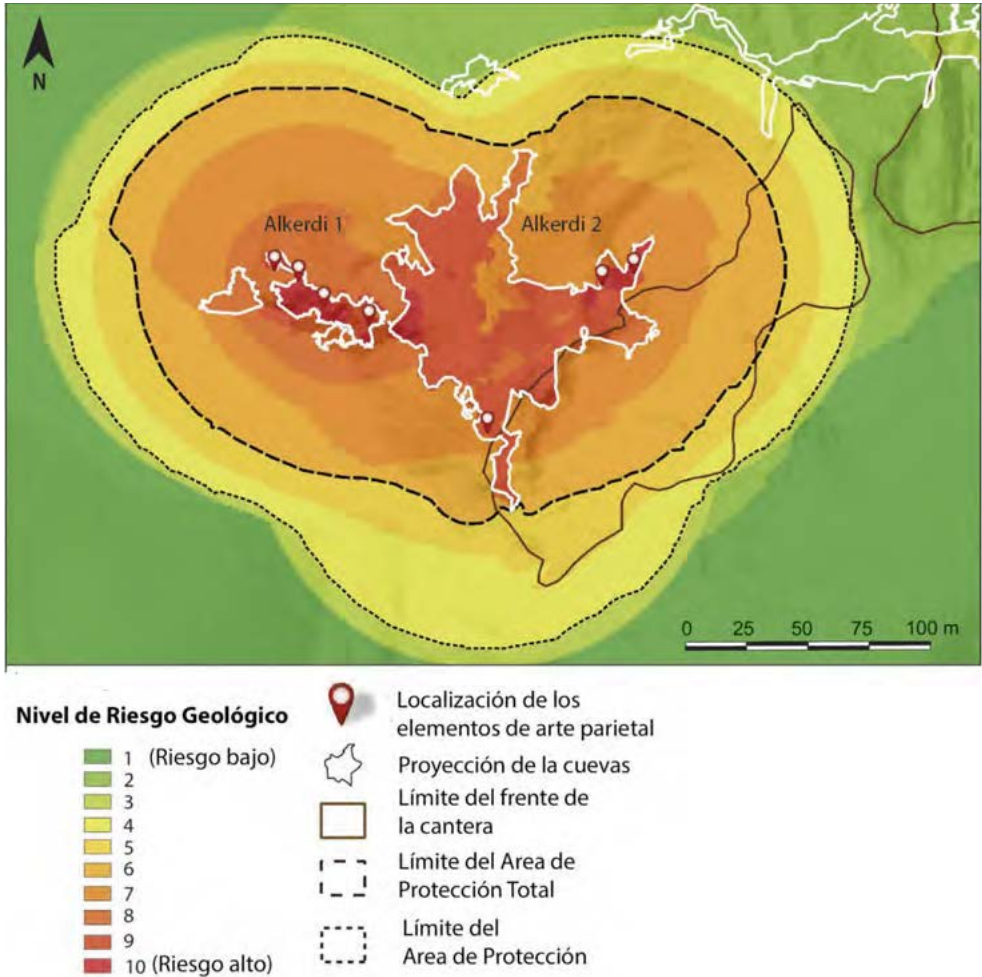


Figura 5. Mapa del riesgo geológico en el macizo de Alkerdi. Los niveles más altos de riesgo (6-10) delimitan el Área de Protección Total y los valores medios (4-5) delimitan el Área de Protección.

nimo, hasta la zona de los frentes activos de la cantera actual, dado que sólo hay 24 m de distancia entre el área de explotación de la cantera (que está dentro del área de impacto directo) y los paneles con arte rupestre (figura 5). El área de protección propuesta está basada, por tanto, en el análisis de mapa de riesgo geológico y cubre todas las cavidades, galerías y simas que pueden tener una conexión directa con las cavidades que contienen los restos de arte parietal (Alkerdi 1 y 2), así como la zona de recarga hídrica directa sobre el nivel de dichas cavidades. Así mismo, incluye el entorno inmediato de todas las zonas de acceso a la cueva (naturales y antrópicas) y aquellas zonas que influyan de forma significativa en la ventilación e intercambio de gases entre las cuevas y el exterior (dolinas, simas, fisuras abiertas, etc.).

Así, en base a los distintos niveles de riesgo definidos, el perímetro de protección, con una su-

periferal total de aproximadamente 6,4 ha reas, se ha dividido en dos partes (figura 5): una primera zona denominada Área de Protección Total (APT) que requiere el grado máximo de conservación, con absoluto control del sistema de drenaje y de las características y propiedades de la roca en las que se desarrollan las cavidades y de la cobertera edáfica suprayacente. Una segunda zona, denominada Área de Protección (AP), que abarcaría la zona del macizo rocoso y la zona kárstica contigua al APT y que requiere un alto grado de conservación que evite las actividades que puedan potencialmente dañar el sistema kárstico o aquellas que puedan reducir el volumen de roca o de cobertera edáfica.

Conclusiones

Realizar una evaluación de riesgos potenciales de forma rápida en entornos kársticos declarados BIC es esencial para plantear distintas acciones de gestión de forma casi inmediata. En el macizo kárstico de Alkerdi esta primera evaluación se ha basado en el estudio de la susceptibilidad geológica, la vulnerabilidad de los elementos que se desea proteger y la exposición de estos a los peligros.

La susceptibilidad geológica a su vez, se ha calculado en base a: i) la litología, que condiciona la porosidad de la matriz y las filtraciones del macizo kárstico; ii) el patrón estructural de sistema de fracturación, que condiciona la caída de bloques por gravedad en el interior de cavidades y/o infiltración del agua de goteo; y iii) las características geomorfológicas, tanto exokársticas como endokársticas, que determinan el flujo de sedimentos, agua y gases entre el exterior y el interior de las cavidades.

La vulnerabilidad depende tanto de la fragilidad intrínseca del BIC que se desea proteger como de la vulnerabilidad del soporte (roca, espeleotemas, sedimento arcillosos, etc.) y de los cambios ambientales que se puedan producir en la cavidad. Finalmente, la exposición del bien a los riesgos es inversamente proporcional a la distancia entre el bien a proteger y los peligros, en este caso elementos geomorfológicos (como los lapiaces y las dolinas) o los frentes de la cantera y la superficie. Todos los componentes del riesgo se han introducido en un SIG para poder calcular el riesgo final y el área de protección.

En base al mapa de riesgo calculado, se ha estimado que el área de protección debe abarcar todos los elementos geomorfológicos que pudieran tener un impacto directo sobre las cavidades que contienen pinturas y grabados, así como el área de filtración directa de agua situada sobre las cuevas. Las zonas que pudieran tener una influencia significativa en el intercambio y ventilación de las cuevas protegidas también deben ser preservadas, al menos, hasta la obtención y el análisis de datos ambientales en un periodo de tiempo lo suficientemente necesario.

Esta metodología puede ser aplicada para la evaluación de las zonas de riesgo potencial y área de protección de las cuevas que albergan arte rupestre en cualquier entorno kárstico, y su aplicación en otras zonas kársticas con arte podría validar su eficacia.

Agradecimientos

Este trabajo se ha llevado a cabo en colaboración con la Sociedad de Ciencias Aranzadi en el

contexto del proyecto *Caracterización del Macizo y sistema kárstico de Alkerdi y su perímetro de Protección*, subvencionado por el Gobierno de Navarra. Otras ayudas adicionales han sido los proyectos EHU-US'16, EHU15/18 de la Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea y el proyecto IT1029-16_GBV6 del Gobierno Vasco. Los autores quieren agradecer a Pedro A. Robledo los comentarios y sugerencias que han permitido mejorar el texto.

Referencias

- Akgöz, M. y Eren, M. 2015. Traces of earthquakes in the caves: Sakarlak ponor and Kepez cave, Mersin (southern Turkey), *Journal of Cave and Karst Studies*, vol. 77, No. 1, 63-74, Doi: 10.4311/2013ES0120.
- Allison, R.J. 2002. *Applied geomorphology: theory and practice*. Vol. 10, John Wiley and Sons, West Sussex (New York), International Association of Geomorphologists.
- Álvarez, I., Abendaño, V., Aranburu, A., Arriolabengoa, M., Bodego, A., Calvo, J.I., Garate Maidagan, D., García-García, E., Hermoso de Mendoza, A., Ibarra, F., Iriarte, E., Legarrea, J., Tapia Sagarna, J., del Val, M. y Agirre Mauleon, J. 2016. Estudio interdisciplinar del macizo kárstico de Alkerdi: rasgos geológicos, evolución kárstica y contenido arqueo-paleontológico, *Trabajos de Arqueología Navarra*, vol. 28, 193-227.
- Angulo, B., Morales, T., Uriarte, J.A. y Antigüedad, I. 2013. Implementing a comprehensive approach for evaluating significance and disturbance in protected karst areas to guide management strategies. *Journal of Environmental Management*, vol. 130 (2013) 386-396, doi:10.1016/j.jenvman.2013.08.057.
- Aranburu, A., Vadillo, I., Damas, L., García-Garmilla, P., Iridoy, P., Arriolabengoa, M., Berreteaga, A. y Olaetxea, C. 2010. Degradación de los espeleotemas de la cueva Praileaitz I (Deba, Gipuzkoa), En: J.J. Duran, F. Carrasco (Eds.), *Cuevas: patrimonio, naturaleza, cultura y turismo*. Madrid. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), 235-449.
- Ayala Carcedo, F.J. y Olcina Cantos, J. 2002. *Riesgos naturales*. Madrid, Ariel.
- Ayala, F.J. y Olcina, J. 2007. *Riesgos naturales y desarrollo sostenible: impacto, predicción y mitigación*, Vol. 10, Instituto Geológico y Minero de España, Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España.
- Barton, H.A. 2013. Biospeleogenesis. En Shroder, J.F. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*, Academic Press, San Diego, 38-56.
- Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering*. John Wiley and Sons, New York.
- Carrasco, F., Jiménez-Gavilán, P., Thode, J.M., Fiestas, M.I. y Fernández, R. 2015. Interaction between infrastructures and karst. Protekarst analysis method, *Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*, 2257-2262, doi:10.1680/ecsmge.60678.
- Casteret, N. 1933. Une nouvelle grotte à gravures dans les Pyrénées. La grotte d'Alquerdi, *XV Congrès International d'Anthropologie et d'Archéologie Préhistoriques*, 384-389.
- E. Iriarte, E., M.Á Sánchez, M.Á., A. Foyo, A. y C. Tomillo, C. 2010. Geological risk assessment for cultural heritage conservation in karstic caves. *Journal of Cultural Heritage*, 0, vol. 11, No. 3, 250-258, doi:10.1016/j.culher.2009.04.006.
- Elez, J., Cuezva, S., Fernandez-Cortes, A., Garcia-Anton E., Benavente, D., Cañaveras, J.C. y Sanchez-Moral, S. 2013. A GIS-based methodology to quantitatively de-fine an Adjacent Protected Area in a shallow karst cavity: The case of Altamira cave, *Journal of Environmental Management*, 3/30, vol. 118, 122-134. Doi: 10.1016/j.jenvman.2013.01.020.
- Ford, D. y Williams, P. 2007. Introduction to Karst. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, 1-8.
- Garate Maidagan, D. y Rivero Vilá, O. 2015. La 'Galería de los bisontes': un nue-vo sector decorado en la cueva de Alkerdi (Urdazubi/Urdax, Navarra), *Zephyrus: Revista de prehistoria y arqueología*, 75, 17-39, doi: 10.14201/zephyrus2015751739.
- Garduño-Monroy, V., Pérez-López, R., Rodríguez-Pascua, M.A., García-Mayordomo, J., Israde-Alcántara, I.,

- Bischoff, J. 2011. Could large palaeoearthquakes break giant stalactites in Cacahuamilpa Cave? (Taxco, Central Mexico) (Conference Paper). En: 2. INQUA-IGCP-567 *International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and Engineering*, Corinth, Greece, 50-53.
- Gilli, É. 2005. Review on the use of natural cave speleothems as palaeoseismic or neotectonics indicators. *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 337, No. 1, 1208-1215.
- Gobierno de Navarra. 1995. Orden Foral 156/1995, de 24 de Abril, del Consejero de Educación y Cultura, por la que se incoa expediente de declaración de Bien de Interés Cultural a favor de la zona arqueológica denominada cueva de Berroberria, sita en el término municipal de Urdazubi/Urdax (Navarra). Boletín Oficial de Navarra (B.O.N.), vol. 67, 3267.
- Jiménez-Sánchez, M., Domínguez-Cuesta, M.J., Aranburu, A. y Martos, E. 2011. Quantitative indexes based on geomorphologic features: A tool for evaluating human impact on natural and cultural heritage in caves. *Journal of Cultural Heritage*, 0, vol. 12, No. 3, 270-278, doi:10.1016/j.culher.2011.01.004.
- Junta de Andalucía, 2006. Decreto 191/2006 de 31 de octubre por el que se declara Bien de Interés Cultural, con la categoría de Zona Arqueológica, la Cueva de Nerja (Málaga).
- Lismonde, B. 2002. *Climatologie du monde souterrain (Tome 2): Aérologie des systèmes karstiques*, Comité Départemental de Spéléologie de l'Isère, Grenoble.
- Martín-Rosales, W, López-Chicano M, Romero-Bomba, E. Durán-Hidalgo, M. y Vadillo-Pérez, Iñaki. 2012. Implantación de un Perímetro de Protección para la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva, España). En: *Las cuevas turísticas como activos económicos: conservación e innovación*, Durán, J. J. y Robledo, P. A. (Eds.). Madrid. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), 129-139.
- Pardo-Iguzquiza, E., Durán Valsero, J., Luque-Espinar, J.A., Robledo-Ardila, P.A., Martos-Rosillo, S., Guardiola-Albert, C. y Pedrera, A. 2015. Karst massif susceptibility from rock matrix, fracture and conduit porosities: a case study of the Sierra de las Nieves (Málaga, Spain). *Environmental Earth Sciences*, 74, 7583-7592. Doi: 10.1007/s12665-015-4545-x.
- Robledo, P.A., Durán, J.J. y Julià, I. 2015. Los perímetros de protección de cavidades kársticas, una herramienta útil para su conservación. el caso de la cueva de Vallgornera, Islas Baleares, Mallorca, España. *VI Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias 2015 y XI Congreso Cubano de Geología*. La Habana, 543-558.
- Sánchez, M.A., Foyo, A., Tomillo, C. e 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*, 11/2, vol. 94, No. 3-4, 180-200, doi:10.1016/j.enggeo.2007.08.004.
- Secretaría General de Vivienda de España (SGVE). 2008. *Guía metodológica para la elaboración de cartografía de riesgos naturales en España*, Colegio Oficial de Geólogos, Madrid.
- Veress, M. 2009. Investigation of covered karst form development using geo-physical measurements. *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 53, No. 4. 469-486, Doi: 10.1127/0372-8854/2009/0053-0469.
- Waltham, T., Bell, F. y Culshaw, M. 2005. *Sinkholes and Subsidence, Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

O. García Menéndez, *et al.*, 2018. Aprovechamiento de las aguas de crecida del sistema kárstico de San José para recarga artificial de acuíferos, Vall d'Uixó, Castellón. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la pre-historia a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 111-122.

Aprovechamiento de las aguas de crecida del sistema kárstico de San José para recarga artificial de acuíferos, Vall d'Uixó, Castellón

O. García Menéndez⁽¹⁾, I. Morell Evangelista⁽²⁾, B.J. Ballesteros Navarro⁽³⁾ y A. Renau Pruñonosa⁽⁴⁾

(1) Universitat. Jaume I, IUPA. Av. Sos Baynat s/n 12071 Castellón de la Plana, España, ogarcia@uji.es

(2) Universitat. Jaume I, IUPA. Av. Sos Baynat s/n 12071 Castellón de la Plana, España, morell@uji.es

(3) IGME-Valencia, C/ Cirilo Amorós 42, Entreplanta, 46004 Valencia, España, b.ballesteros@igme.es

(4) Universitat Jaume I, IUPA. Av. Sos Baynat s/n 12071 Castellón de la Plana, España, arenau@uji.es

RESUMEN

Es una característica esencial de los manantiales kársticos experimentar súbitas crecidas con ocasión de eventos de lluvias intensas. El manantial de Sant Josep (Vall d'Uixó, Castellón) drena un sistema de muy baja inercia con un caudal base del orden de 200 l/s que puede convertirse en más de 10 m³/s después de fuertes precipitaciones. Este caudal se une al circulante por el vecino río Belcaire que se adentra en la Plana de Castellón hasta desembocar en el Mar Mediterráneo. Estas aguas invernales han sido aprovechadas para realizar una experiencia de recarga artificial en el área de la Rambleta, donde se ha identificado un intenso proceso de salinización de un sector del acuífero (*upconing*), como consecuencia de un prolongado uso intensivo del acuífero (sobreexplotación). En este trabajo se exponen los aspectos metodológicos, hidroquímicos e hidrodinámicos más significativos asociados a la recarga de 0,3 hm³ que se realizó a través de dos pozos totalmente penetrantes entre noviembre de 2013 y mayo de 2014.

Palabras clave: intrusión marina, Plana de Castellón, recarga artificial.

Use of the flood waters from the Sant Josep karst system for the artificial recharge of aquifers, la Vall d'Uixó, Castellón

ABSTRACT

It is an essential characteristic of the karstic springs to show sudden and intense floods during intense rains. The San Josep spring (Vall d'Uixó, Castellón) drains a very low inertia system with a base flow of the order of 200 l/s that can become more than 10 m³/s after heavy rainfall. This flow is joined to the circulating one by the neighbor Belcaire river that penetrates in Plana de Castellón until ending at the Mediterranean Sea. These winter waters have been used for an artificial recharge experience in the Rambleta area, where an intense upconing process has been identified that has salinized a large part of the aquifer, as a consequence of a prolonged intensive use of the aquifer (overexploitation). In this paper, the most significant methodological, hydrochemical and hydrodynamic aspects associated with the 0,3 hm³ recharge that was carried out through two fully penetrating wells between november 2013 and may 2014 are exposed.

Keywords: artificial recharge, Castellón plain, seawater intrusion.

Introducción

Los esquemas MAR (*Managed Aquifer Recharge*) se han aplicado con gran éxito, entre otros as-

pectos, para mitigar la intrusión marina (Jaén-Peral *et al.*, 2003, Shammas, 2008, Ortuño *et al.*, 2012, Roperó, 2012, Foreman, 2014), o como una forma de mejorar la calidad de los recursos de agua subterránea (Hionidi *et al.*, 2002, Abarca *et al.*, 2006, Armenter, 2006, Kattan *et al.*, 2010, Patel *et al.*, 2011, Zakhem y Hafez, 2012, Hernández *et al.*, 2014).

En este trabajo se aplica un enfoque multi-metodológico para evaluar la efectividad del esquema MAR en la recuperación de la calidad del agua subterránea de un acuífero detrítico salinizado. Se ha monitorizado la respuesta del sistema ante la inyección de agua dulce lo que ha permitido determinar su dinámica y las variaciones de la calidad de las aguas preexistentes (nativas), entendiendo la importancia de los procesos hidrogeoquímicos que pueden afectar a la calidad de ambas. La conductividad eléctrica (CE), los iones cloruro y nitrato, y los isótopos estables del agua (^{18}O y ^2H) se han utilizado como trazadores para establecer los grados de mezcla, los tiempos de tránsito y la evolución de la pluma del agua inyectada. Las mediciones hidroquímicas (cationes y aniones mayoritarios) se han utilizado para determinar los procesos geoquímicos asociados a la mezcla del agua de recarga (ARW) con el agua subterránea nativa (NGW), así como los procesos de interacción agua-roca.

Localización y caracterización general del área de estudio

El área de estudio se localiza en la mitad meridional de la Plana de Castellón, concretamente en la partida de La Rambleta, enmarcada, a grandes rasgos, en un triángulo cuyos vértices son las poblaciones de Nules, Vall d'Uixó y Moncófar (figura 1).

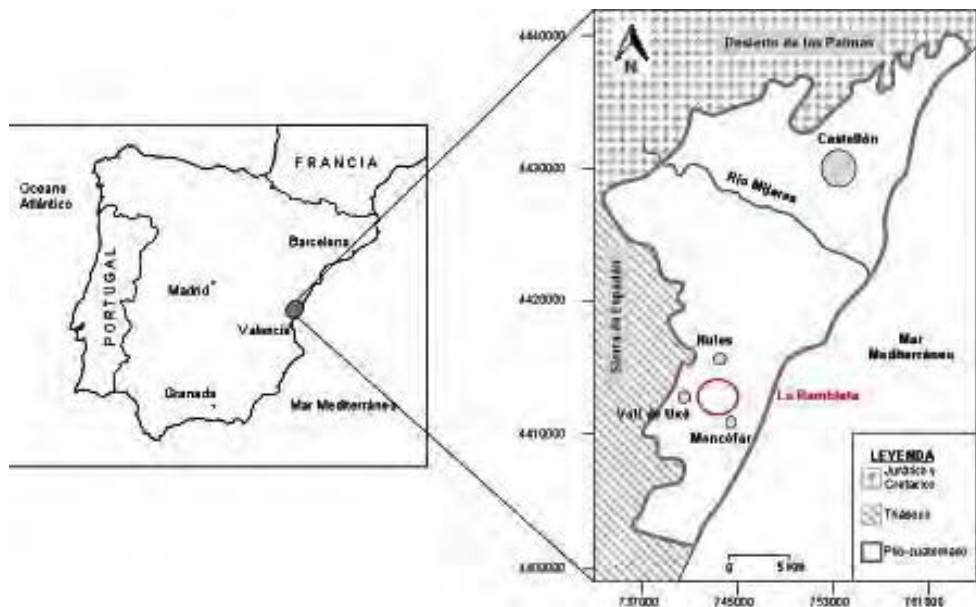


Figura 1. Mapa de situación del área de estudio.

La Plana de Castellón ocupa el extremo suroriental de la provincia de Castellón, y corresponde a una llanura aluvial de forma aproximadamente triangular con una superficie de 464 km² y cotas comprendidas entre 0 y 130 m s.n.m. Los depósitos Pliocuaternarios que la configuran dan lugar a un importante acuífero detrítico de carácter libre, con permeabilidad por porosidad intergranular, cuyo límite oriental coincide con la línea costera (MASub 080.127, Plana de Castellón). Desde el punto de vista de la administración hidrológica, el acuífero pertenece al Sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón de la Demarcación Hidrográfica de la Cuenca del Júcar.

Dispositivo de recarga

El agua utilizada en la recarga proviene de crecidas del río Belcaire, que recibe los caudales de la surgencia de Sant Josep. Esta agua es derivada por medio de un azud construido en el cauce hacia una balsa de almacenamiento cuya capacidad es de 2 hm³. Desde dicha balsa el agua es conducida a través de una tubería hacia dos pozos de recarga, denominados Recarga Este (RWE) y Recarga Oeste (RWW). Se trata de dos perforaciones gemelas de 100 m de profundidad perforadas en 500 mm, equipadas con tubería de PVC de 225 mm de diámetro interior que disponen de filtro entre 50 y 95 m y empaque de gravas entre 5 y 95 m.

La experiencia de recarga artificial tuvo lugar entre el 18 de noviembre de 2013 y el 12 de mayo de 2014 (175 días). El volumen total inyectado fue de 314.163 m³ equivalente a un caudal medio de 21,46 l/s, con un máximo de 34,30 l/s y un mínimo de 18,04 l/s. Durante este periodo y hasta octubre de 2014 (cinco meses después de cesar la recarga) se monitorizó el comportamiento de las aguas subterráneas a través de una red constituida por 32 puntos (figura 3). Además, para un seguimiento más detallado del proceso, se constituyó una red de control específica formada por tres piezómetros (W1, W2 y W3) construidos expresamente para el proyecto, así como por los pozos de control R6 (Rambleta 2), R8 (Rambleta 5), R12 (Primitiva), R15 (Rambleta 6) y R37 (Garrofera), ubicados a distancias entre los 51 y los 1.420 m (figura 2).

Los ensayos de bombeo han permitido conocer los parámetros hidrodinámicos del sector de recarga, con valores de 250-300 m²/día para la transmisividad y entre 0,015-0,05 para el coeficiente de almacenamiento, lo que corresponde a un acuífero libre con características moderadas. En cuanto a la permeabilidad, el valor estimado, para un espesor medio del acuífero de 40 m, varía entre 6,25 y 7,50 m/día.

Calidad del agua nativa y de recarga

El agua subterránea nativa del acuífero en la partida de La Rambleta tiene la clasificación de agua salobre, con valores de CE próximos a 3.000 µS/cm y TSD (Total de Sólidos Disueltos) del orden de 2.050 mg/l. Su facies es clorurada cálcico-magnésica con una concentración en cloruros de 500-750 mg/l. También se caracteriza por tener altas concentraciones de nitrato, entre 300 mg/l y 400 mg/l, y, en general, está en equilibrio respecto a los minerales carbonatados y subsaturada en relación con el yeso y la anhidrita.

Por su parte, el agua de recarga presenta una mineralización muy baja, con valores medios CE de 327 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y TSD de 239 mg/l . Las concentraciones de cloruro y nitrato son de alrededor de 20 mg/l y 1 mg/l , respectivamente, y su facies es bicarbonatada cálcica con un valor medio de bicarbonatos de 123 mg/l . También está fuertemente subsaturada respecto a los carbonatos y sulfatos, con índices de saturación inferiores a -1 para calcita ($SI_{\text{calcita}}=-1.09$), aragonito ($SI_{\text{aragonito}}=-1.24$), dolomita ($SI_{\text{dolomita}}=-2.26$), yeso ($SI_{\text{yeso}}=-2.45$) y anhidrita ($SI_{\text{anhidrita}}=-2.72$). También está claramente oxigenada, aspecto que la diferencia del agua de recarga que tiene una muy baja concentración de O_2 .



Figura 2. Localización de los puntos de control W1, W2, W3, R6, R8, R12, R15 y R37.

En la figura 3 se muestra la distribución del contenido en cloruros (abril, 2013). Los valores máximos que se registran en el sector central corresponden a un proceso de ascenso vertical del agua salina producido por la intensa explotación llevada a cabo en dicho sector en décadas pasadas y que todavía persiste parcialmente (García-Menéndez *et al.*, 2016). El objetivo de la recarga que se plantea es, precisamente, mejorar la calidad de los recursos subterráneos de esa masa salina.

Comportamiento piezométrico. Respuesta hidráulica

Los piezómetros (W1, W2 y W3) fueron equipados con dispositivos *diver* para el registro horario del nivel del agua, lo que permitió constatar el rápido ascenso experimentado por el nivel piezométrico al inicio del proceso de recarga (figura 4). En la primera hora se observan ascensos significativos entre 0,09 m (W1) y 0,45 m (W3), para después de 24 horas ser de 0,20 m (W1 y

W2) y 0,67 m (W3). Los niveles más altos se alcanzan en los tres piezómetros el 5 de febrero de 2014 (después de 79 días de inyección), con ascensos de 3,05 m (W1 y W2) y 3,52 m (W3). Las variaciones máximas se correlacionan con tasas de inyección entre 22,5 y 25 l/s, con descensos cuando los caudales caen por debajo de este rango. La correlación más alta con la velocidad de inyección se observa en el sondeo W3, que es el más cercano a los pozos de recarga. Una vez cesada ésta, se detectan descensos bruscos e inmediatos, y la piezometría del acuífero previa a la inyección se recupera entre 16 días (W3) y 17 días (W1 y W2). No obstante, el descenso también es debido al inicio de los bombeos por la campaña de riego.

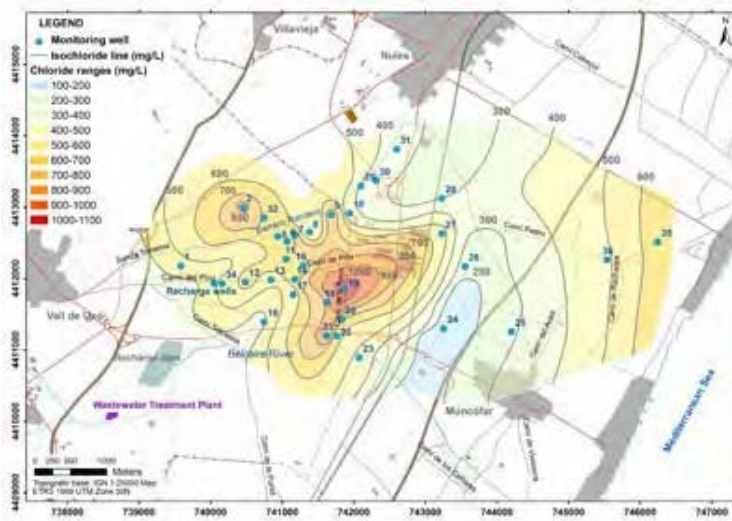


Figura 3. Mapa de isocloruros (abril 2013).

En azul los puntos de la red de control general y subrayado en rojo el sitio MAR.

Los niveles piezométricos del punto R37, a 450 m del RWE, no parecen estar influenciados por el efecto de la recarga, con una variación muy similar al piezómetro R15, que se encuentra a una distancia de 1.160 m del RWE.

Procesos hidrogeoquímicos

La inyección de agua dulce procedente de las crecidas del río Belcaire, rica en oxígeno, subsaturada (respecto a carbonato y sulfato) y rica en nutrientes, en un acuífero salobre y con menor contenido en O_2 , ha provocado cambios notables en la calidad de sus aguas con una importante mejora de la calidad. Estos cambios se ponen especialmente de manifiesto en las concentraciones de aniones y cationes principales y en los valores de CE, $\delta^{18}O$ y δ^2H .

De forma general, se obtiene una disminución importante de la salinidad en los pozos de observación W1, W2 y W3, por lo que el agua pasa a ser calificada como dulce. El 16 de mayo de

2014 (día 179) se registran valores de 555 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 680 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente, mientras que en el pozo R37, situado 450 m aguas abajo, disminuye de 3.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 2.363 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

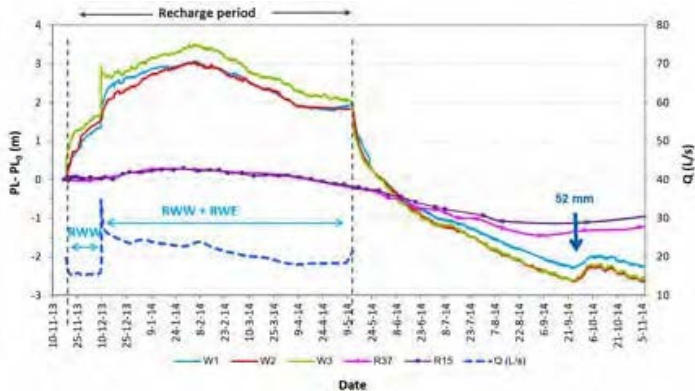


Figura 4. Variaciones del nivel piezométrico (PL) en relación con la piezometría inicial (PL_0) y el caudal de recarga (Q). Las precipitaciones se indican con una flecha.

Las variaciones temporales de la concentración de los iones principales (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+) y de CE responden a patrones similares, con una importante disminución desde los primeros días de la recarga y una dilución pronunciada después del evento de inyección (figura 5). La respuesta al inicio de las operaciones es casi inmediata en W2, con una notable mejora de la calidad en un corto período de tiempo: CE por debajo de 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ el día 7 después del inicio de la inyección, por debajo de 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ el día 11 y por debajo de 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ el día 29. En el W1 estos valores de CE se alcanzan 20-25 días más tarde y son decisivos en la disminución de la concentración de iones al inicio de la inyección en RWE (día 21).

Con respecto al W3, las disminuciones son muy rápidas al principio, ya que la CE cae por debajo de 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (día 11). Sin embargo, el proceso se ralentiza, con valores inferiores a 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y de 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (días 29 y 52, respectivamente), muy similares a los obtenidos para el W1 pero lejos de los observados en el W2 (figura 5).

Finalizada la recarga, las concentraciones iónicas y la CE se han mantenido prácticamente constantes en W2 durante 50 días, con CE de 360-370 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta el día 226. Casi cinco meses después de cesar la inyección (día 318) se registra una CE de 470 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A partir de este momento tienen lugar importantes precipitaciones en la zona y sus efectos se suman a los de la recarga. La CE permanece por debajo de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta el día 351 y, a partir de aquí, se observan cambios importantes con un ascenso apreciable de la CE (988 $\mu\text{S}/\text{cm}$ el día 428) sin exceder los 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ al final del período de control (día 512).

La interrupción de la inyección tampoco provoca cambios en la salinidad en W3. La CE permanece en torno a 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta el día 267. A partir de este momento los aumentos en la mi-

neralización se vuelven significativos, con 1.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (día 318) y cerca de 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (día 428). En el pozo W1 el cese de la recarga implica, sin embargo, un aumento inmediato y constante de la mineralización hasta el día 351, momento en el que se alcanzan los 1.700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para continuar aumentando, aunque más lentamente, hasta los 2.225 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (día 512).

Las variaciones temporales de los valores de CE en pozos ubicados a 330 m (R12), 450 m (R37), 1.080 m (R6), 1.160 m (R15) y 1.410 m (R8) del RWE se muestran en la figura 6. Los valores de CE en R6, R8 y R15 presentan una evolución muy similar, marcada por el régimen de bombeo y las condiciones climáticas. Entre octubre y diciembre de 2013 hay disminuciones significativas en la CE, probablemente relacionadas con la menor explotación de las capacidades par regadío. A partir de estos mínimos, y debido a las escasas precipitaciones invernales, la CE comienza a aumentar. Dentro de esta evolución general, el comportamiento del R37 es significativamente diferente, manteniéndose constante entre diciembre de 2013 y febrero de 2014, con descensos significativos en los meses posteriores ($\sim 1,000$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ en mayo de 2014) y con CE inferiores a los otros puntos hasta octubre de 2014. En cuanto al R12, hay una evolución similar a los primeros tres pozos hasta marzo, cuando se observa una ligera bajada de la CE, que continuó hasta junio. En cualquier caso, R12 es un pozo de irrigación con tasas de bombeo significativas en verano, por lo que el efecto de la recarga es difícil de observar

Después de un período de inyección de seis meses con más de 300.000 m^3 de agua recargada, se observan cambios significativos en la calidad de las aguas del acuífero a 84 m al norte de RWW (W2) y a 78 m este de RWE (W1). También se detectan notables disminuciones de la mineralización a 450 m al noreste (R37). No se observan cambios a distancias superiores a 1.000 m (R6, R8 y R15), lo que implica que la inyección no ha sido efectiva, y delimita sus efectos, a esa distancia.

Porcentajes de mezcla (MR). Tiempos de tránsito

El ion cloruro es un buen indicador conservativo para estudiar la inyección de agua dulce en acuíferos de elevada salinidad con ausencia de minerales evaporíticos. En el caso de La Rambleta hay una fuerte diferencia de salinidad entre el ARW y el NGW, con un factor de contraste de 30 para el ion cloruro. También los nitratos, con un fuerte contraste de 150-300, deberían permitir caracterizar el avance del agua inyectada en los pozos de observación. Menores contrastes se registran en los isótopos ^{18}O y ^2H , con factores de 7 y 3 veces, respectivamente, aunque estos parámetros se han utilizado con éxito en otras experiencias de recarga (Zakhem y Hafez, 2012). Finalmente, se han utilizado datos de CE proporcionados por los sensores instalados en los piezómetros W1, W2 y W3, que han aportado información precisa para determinar el tiempo de llegada del frente de recarga. El contraste en CE entre ARW y NGW es de 10 veces.

Si se toma como referencia la CE, la máxima relación de mezcla (MR) alcanzada en los pozos de observación es del 99% en W2, con MR por encima del 95% desde el día 71 (29 de enero de 2014) hasta el día 255 (31 de julio de 2014) (figura 7). En W1 y W3 se obtienen notables MR en el mismo período (71-255 días): 80-90% y 85-90%, respectivamente. Con respecto al R37, el MR máximo es del 36%, superando el 25% en el período comprendido entre el día 176 (13 de mayo de 2014) y el día 213 (20 de junio de 2014).

La MR se ha calculado utilizando un balance de masa de los dos componentes (ARW y NGW). Los parámetros considerados para NGW son los de los pozos de observación antes del evento de inyección. Los parámetros de ARW son los valores medios obtenidos a partir de muestras tomadas durante la inyección, a excepción de los isótopos, de los que se han utilizado los datos puntuales.

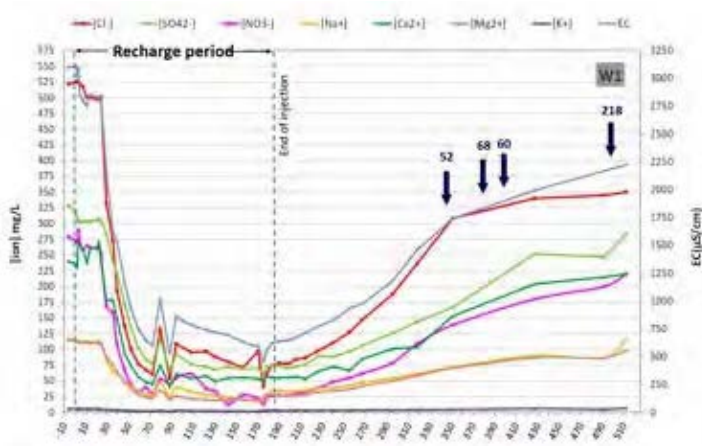


Figura 5. Variaciones del tiempo concentración de los iones mayoritarios y de los valores de CE en el piezómetro W1 durante la inyección (0-175 días) y post-inyección (176-512 días). Con flechas azules se indican las precipitaciones (mm).

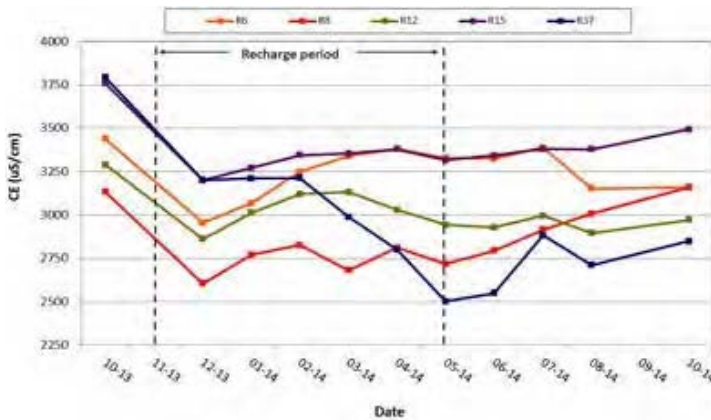


Figura 6. Variaciones de CE en pozos de control (R6, R8, R12, R15 and R37).

Las MR calculadas a partir de las concentraciones de cloruro (MR_{Cl}), nitratos (MR_{NO_3}) e isótopos estables del agua ($MR_{\delta^{18}O}$ y $MR_{\delta^{2}H}$) son bastante similares a las obtenidas con la CE (figura 7). En general, el MR_{Cl} muestra los valores más altos, y el $MR_{\delta^{18}O}$ y $MR_{\delta^{2}H}$ los más bajos.

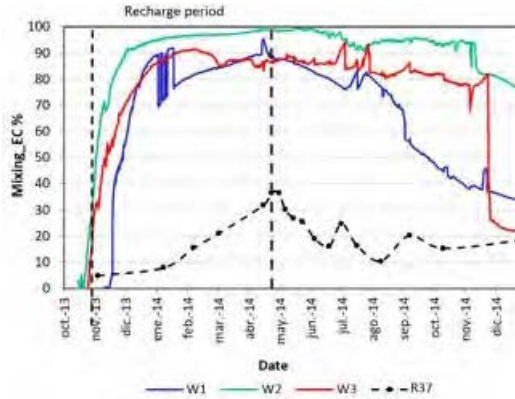


Figura 7. Mezclas (MR) en % calculadas usando valores de CE, obtenidos de CTD divers (W1, W2 and W3) y de muestras de agua subterránea (R37).

La velocidad del agua se ha determinado mediante la utilización de los porcentajes de mezcla (MR), para ello se ha considerado que el tiempo de llegada, y la velocidad real, corresponden al MR 50%, ya que el tiempo medio de llegada del trazador al centro de la masa es representativo del flujo total o de la velocidad lineal (Zakhem y Hafez, 2012), por lo que el tiempo medio de tránsito (t_{50}) se puede asignar al 50% del avance (Stuyfzand, 1998). Aplicada esta metodología, los resultados obtenidos para las velocidades reales calculadas a partir de cinco parámetros (EC, Cl⁻, NO₃⁻, $\delta^{18}O$ y δ^2H) son bastante similares en los pozos W1, W2 y W3 (tabla 1).

Procesos geoquímicos. Interacción agua-roca

Las variaciones de los iones principales son bastante similares en los tres piezómetros de control, pero se observan ciertos enriquecimientos en algunos iones, como los sulfatos y el sodio, indi-

	Distance (m)	Arrival time (days)	$V_{50\%}$ (m/d)	Mean $V_{50\%}$ (m/d)
North direction (RWW-W2)				
MR 50% (EC_Diver)	84		13.0	6.5
MR 50% (Cl)		11.2	7.5	
MR 50% (NO ₃ ⁻)		11.5	7.3	
MR ($\delta^{18}O$)		16.5	5.1	
MR 50% (δ^2H)		15.7	5.4	
East direction (RWW-W3)				
MR 50% (EC_Diver)	51		23.0	2.2
MR 50% (Cl)		20.8	2.5	
MR 50% (NO ₃ ⁻)		23.5	2.2	
MR ($\delta^{18}O$)		20.3	2.5	
MR 50% (δ^2H)		18.8	2.7	
East direction (RWE-W1)				
MR 50% (EC_Diver)	78		17.0	4.6
MR 50% (Cl)		14.0	5.6	
MR 50% (NO ₃ ⁻)		15.6	5.0	
MR ($\delta^{18}O$)		17.3	4.5	
MR 50% (δ^2H)		17.0	4.6	

Tabla 1. Tiempos de llegada y velocidades reales a partir del MR 50%. MR ha sido calculado a partir de valores de CE (CTD divers), concentraciones de Cl y NO₃⁻ y $\delta^{18}O$ - δ^2H .

cadores de la existencia de otros procesos que alteran la mezcla conservativa. Esto indica que podrían darse simultáneamente varios procesos geoquímicos: intercambio catiónico, disolución de minerales (calcita, aragonito y yeso), oxidación de minerales sulfurosos (pirita) y materia orgánica, etc. (Stuyfzand, 1998, Stuyfzand *et al.*, 2002, Vanderzalm *et al.*, 2010). Las magnitudes de los procesos geoquímicos ocurridos durante la inyección se han estimado considerando los valores *delta* (días 108 y 135). La disolución de calcita después de la inyección es de aproximadamente 0,45 meq/l, la disolución del mineral de sulfato alcanza 0,60 meq/l (tabla 2) y el intercambio de cationes se asigna a 1,10 meq/l. Los procesos de oxidación no pueden estimarse ya que el contenido de oxígeno ARW no está disponible, pero se detecta una eliminación de materia orgánica (MO) de 5 mg de O₂/l y NO₃ negativo (0,15 meq/l), lo que indica la posibilidad de que se haya producido oxidación de MO y, probablemente, de sulfuro.

Procesos geoquímicos ^a	W1	W2	W3	MAR site
Cambio catiónico	1.65	0.70	1.00	1.10
Disolución de carbonatos	0.45	0.35	0.85	0.45
Disolución de sulfatos	0.45	0.55	0.75	0.60
Oxidación (MO y sulfuros)	O ₂ ARW+0.30	O ₂ ARW+0.05	O ₂ ARW+0.10	O ₂ ARW+0.15

Tabla 2. Valores estimados para los procesos geoquímicos (en meq/l).

Conclusiones

Se ha demostrado la eficiencia de la recarga en el sector de La Rambleta con una apreciable mejora en la calidad de las aguas subterráneas y un incremento de los recursos disponibles. Esta mejora se observa en el descenso progresivo en el contenido de los iones principales, la CE y los isótopos del agua, desde NGW hacia ARW.

Se han analizado los procesos hidrodinámicos e hidroquímicos que ocurren durante la inyección de agua dulce, oxidada y subsaturada (en calcita, aragonita y yeso) en un acuífero con aguas salobres, poco oxigenadas y en equilibrio.

Durante el período de operación la dilución ha sido el principal proceso observado. Se ha constatado que sus efectos se extienden de manera muy importante hasta distancias cercanas a los 80 m, con una disminución de la salinidad del orden de 5 a 10 veces, y hasta los 450 m, en este caso con un descenso de 1,5 veces.

Los efectos de la recarga se extienden en el tiempo, al menos, durante cuatro meses, con una CE entre 500-1.500 µs/cm hasta que tuvieron lugar lluvias importantes y la recarga natural se sumó a la del mecanismo de inyección.

Finalizada la inyección, momento en el que se obtuvieron valores de CE de 350-550 µs/cm en el agua subterránea del área de recarga (entorno de 80 m), se detecta con posterioridad un constante y gradual aumento de las concentraciones iónicas hasta alcanzarse la situación existente antes del proceso de recarga.

Referencias

- Abarca, E., Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., Capino, B., Gámez, D. y Batlle, F. 2006. Optimal design of measures to correct seawater intrusion. *Water Resources Research*. Doi: 10.1029/2005WR004524
- Armenter, J.L. 2006. La recarga artificial de acuíferos en la gestión conjunta de los recursos del río Llobregat. Fernández JA, Linares L, Ruiz F (Eds). Agua y ciudad en el ámbito mediterráneo. Hidrogeología y Aguas Subterráneas 19, 181-191
- Foreman, T.L. 2014. Managed Aquifer Recharge (MAR) and Design and Construction of Hydraulic Barriers against Seawater Intrusión: the California Case. *Boletín Geológico y Minero*, 125 (2): 133-142
- García-Menéndez, O., Morell, I., Ballesteros, B.J., Renau-Pruñonosa, A., Renau-Llorens, A. y Esteller M^a. V. 2016. Spatial characterization of the seawater upconing process in coastal Mediterranean aquifer (Plana de Castellón, Spain): evolution and controls. *Environ Earth Science*, 75:728. Doi: 10.1007/s12665-016-5531-7
- Hernández, M., Gilbert, O., Bernat, X., Valhondo, C., Köck-Schulmeyer, J., Huerta-Fontela, M. y Colomer, M.V. 2014. Innovative reactive layer to enhance soil aquifer treatment: successful installation in the Llobregat aquifer (Catalonia, NE Spain). *Boletín Geológico y Minero de España*, 125 (2): 127-172
- Hionidi, M., Panagopoulos, A., Koumantakis, I. y Voudouris, K. 2002. Groundwater quality considerations related to artificial recharge to the aquifer of the Korinthos Prefecture, Greece. Groundwater quality: Natural and enhanced restoration of groundwater pollution. *IAHS publication N° 275*: 85–90
- Jaén-Peral, M., Parellada-Bezares, C., Lupiani-Moreno, E., Islan-García, A. y Riera-Molina, S. 2003. Recarga artificial en el acuífero costero de Marbella (Málaga). *Simposio sobre el agua y la ciudad sostenible: Hidrogeología urbana*. Barcelona 2003. AIH-GE
- Kattan, Z., Kadkoy, N., Nasser, S., Safadi, M. y Hamed, A. 2010. Isotopes and geochemistry in a managed aquifer recharge scheme: a case study of fresh water injection at the Damascus University Campus, Syria. *Hydrological Processes*. Doi:10.1002/hyp.7617
- Le Gal La Salle, C., Vanderzalm, J., Hutson, J., Dillon, P., Pavelic, P. y Martin, R. 2005 Isotope evolution and contribution to geochemical investigations in aquifer storage and recovery: a case study using reclaimed water at Bolivar, South Australia. *Hydrological Processes*, 19: 3395-3411
- Ortuño, F., Molinero, J., Garrido, T. y Custodio, E. 2012. Seawater injection barrier recharge with advanced reclaimed water at Llobregat delta aquifer (Spain). *Water, Science and Technology*, 66 (10): 2083-2089
- Patel, P., Desai, M. y Desai, J. 2011. Geotechnical parameters impact on artificial ground water recharging technique for urban centers. *Journal of Water Resource and Protection*. Doi:10.4236/jwarp.2011.35035.
- Ropero, J. 2012. Estudio sobre la recarga artificial en el acuífero detrítico costero del Señorío de Marbella. Trabajo fin de máster. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. http://www.cehuma.uma.es/TFM_Sobresaliente2.pdf. Accessed 11 July 2016 (último acceso febrero 2018)
- Shammas, M.I. 2008. The effectiveness of artificial recharge in combating seawater intrusion in Salalah coastal aquifer, Oman. *Environ Geol*, 55: 191-204
- Stuyfzand, P.J. 1998. Quality changes upon injection into anoxic aquifers in the Netherlands: Evaluation of 11 experiments. Peters JH (Ed.). *Proc. 3rd Int. Symp. on Artificial Recharge of Groundwater*, 283-291
- Vanderzalm, J.L., Page, D.W., Barry, K.E. y Dillon, P.J. 2010. A comparison of the geochemical response to different managed aquifer recharge operations for injection of urban stormwater in a carbonate aquifer. *Applied Geochemistry*, 25, 1350 – 1360
- Zakhem, B.A. y Hafez, R. 2012. Chemical and isotopic methods for management of artificial recharge in Mazraha Station (Damascus Basin, Syria). *Hydrological Processes*. Doi:10.1002/hyp.8446.

E. Pardo-Igúzquiza, et al., 2018. Las cuevas como fractales: un valor añadido de las cuevas turísticas para la difusión de la investigación y la educación. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 123-128.

Las cuevas como fractales: un valor añadido de las cuevas turísticas para la difusión de la investigación y la educación

E. Pardo-Igúzquiza⁽¹⁾, J.J. Durán Valsero⁽¹⁾ y P.A. Robledo Ardila⁽²⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Ríos Rosas 23, 28003 Madrid (España) e.pardo@igme.es; jj.duran@igme.es

(2) Unidad del IGME en las Islas Baleares. C/ Felicià Fuster 7, 07006 Palma de Mallorca, Illes Balears pa.robledo@igme.es

RESUMEN

Las cuevas no sólo son espectaculares paisajes subterráneos que merece la pena visitar por su belleza, sino que también son laboratorios naturales donde el científico investiga y donde el visitante puede aprender conceptos científicos y técnicos que suelen estar reservados para el experto. En este sentido, un ejercicio intelectual interesante es pensar si las cuevas son un laberinto aleatorio de pasajes, galerías y salas, o bien existe algún ordenamiento oculto que es posible descubrir al aplicar ciertos procedimientos matemáticos. En efecto, es así como se ha descubierto que los fractales, objetos matemáticos que sirven para describir la geometría de las nubes, los rayos o las costas, entre otros muchos objetos, fenómenos y morfologías naturales, sirven también para describir la geometría de las cuevas; tanto la forma individual, como la geometría de las redes endokársticas. Así se ha descubierto que las redes de cuevas son fractales tridimensionales de dimensión 1.67. Este hecho, además de una curiosidad científica, tiene varias aplicaciones, y por ejemplo, es posible estimar qué porcentaje de la red de cuevas todavía no ha sido descubierta por los espeleólogos, o puede servir para simular redes de cuevas en el ordenador que se utilizarán en la investigación de las mismas. En este trabajo se analiza el carácter fractal de las cuevas, se muestran algunos ejemplos y se especula sobre su origen y significado. Esta información puede ser interesante para el visitante curioso que no sólo se conforma con observar las maravillas del mundo subterráneo, sino que quiere comprender como funciona la naturaleza.

Palabras clave: autosimilitud, esponja de Monge, invarianza de escala, red kárstica.

Caves as fractals: an added value of show caves for the dissemination of research and education

ABSTRACT

Caves are not only beautiful underground landscapes but they also are natural labs available to research where the visitor can learn technical concepts that usually are familiar to the expert only. In this sense it is interesting to think if caves are a random labyrinth of passages or there is some hidden pattern that can be discovered by certain mathematical procedures. In fact, it has been discovered that fractals (mathematical objects that can be used to describe the geometry of clouds, lightning or coast lines) can be used to describe the geometry of both individual caves and cave networks. Thus it has been discovered that the three-dimensional fractal dimension of a cave network is 1.67. This fact is not a scientific curiosity only, but it has several applications like the estimation of the percentage of the cave network that has not been discovered by the speleologists yet, or for computer simulation of cave networks that can be used in karst research. This work analyses the fractal character of caves, given examples and speculating about their origin and meaning. This information can be of interest to the visitor that wants to understand how nature works.

Keywords: cave network, Monge sponge, scale invariance, self-similarity.

Introducción

Uno de los primeros conceptos que se enseñan al estudiante de geología es la invarianza de escala de las estructuras geológicas, el cual es muy importante en el campo de los fractales. El estudiante aprende rápidamente como es necesario colocar un objeto de tamaño conocido (como por ejemplo, una moneda o una persona) cuando se toma una fotografía de una estructura geológica de interés. Este concepto de invarianza de escala llevó a Mandelbrot (1967) a introducir el concepto de fractal. Un objeto fractal presenta irregularidades (con patrones similares) a cualquier escala que se le examine. De este modo, es clásico el ejemplo de Mandelbrot (1967) donde la longitud de una línea de costa tiende a ser infinita, pues si utilizamos un patrón de medida cada vez menor (una vara de un metro, después de 1 cm, etc.) la longitud que se obtiene es cada vez mayor pues vamos midiendo mejor las irregularidades dicha frontera entre la tierra y el mar. Si la línea de costa fuese perfectamente recta, sin irregularidades, mediría lo mismo con cualquier patrón de medida utilizado y su dimensión topológica sería uno, como corresponde a una línea recta. Sin embargo, conforme aumentan las irregularidades, la línea de costa tiende a rellenar el plano (de dimensión topológica dos) y esta complejidad se puede describir por una nueva dimensión, llamada dimensión fractal, que estará comprendida entre uno y dos. Una distribución fractal requiere que el número de objetos, con un tamaño mayor a r , siga una ley potencial:

$$N = Ar^{-D}$$

Donde A es una constante y D es la dimensión fractal.

Tomando logaritmos a ambos lados de la ecuación anterior se obtiene:

$$\ln N = \ln A - D \ln r$$

que no es sino la ecuación de una línea recta, cuya pendiente es la dimensión fractal. Por consiguiente, este hecho de ver si los puntos experimentales se alinean según una recta en un gráfico doblemente logarítmico, supone una prueba para verificar el carácter fractal de un fenómeno cualquiera. Asimismo proporciona un medio práctico y sencillo para calcular la dimensión fractal del mismo.

Las cuevas como fractales

Curl (1960, 1966) demostró hace décadas como las longitudes de cuevas en una región siguen una distribución fractal. Así, el número de cuevas N de longitud mayor que l , esto es $N(l)$, viene dada por:

$$N(l) = N(l_0) \left(\frac{l}{l_0} \right)^{-D}$$

Donde $N(l_0)$ es el número de cuevas mayor a una longitud de referencia l_0 . Curl (1986) obtuvo,

para la mayoría de los casos que examinó, un valor de D en torno a 1.4 (con valores entre 1.2 y 1.6). Curl (1986) también mostró que la distribución condicional de tamaños de elementos modulares (tramos de cuevas limitadas por pasajes menores a un determinado tamaño) también tiene una distribución fractal y obtiene un valor de 2.8 para la cueva Little Bruce Creek en Estados Unidos. Este valor de 2.8 corresponde a la dimensión fractal de una esponja de Monge que se puede ver en la figura 1A. En la figura 1B se muestra un bloque calizo donde la porosidad se puede asimilar a microcuevas que constituyen una esponja de Monge aleatoria.

Fractalidad de una red de conductos kársticos

La dimensión fractal ha sido utilizada como un parámetro morfométrico para describir redes tridimensionales de conductos kársticos (Pardo-Igúzquiza *et al.*, 2011). Otra interesante aplicación del modelado fractal es la extrapolación de la distribución potencial (con invarianza de escala) para obtener resultados fuera del rango de medidas experimentales. Así, en Pardo-Igúzquiza *et al.* (2014) se obtiene una porosidad de conductos de 0.25% para el macizo kárstico de la Sierra de las Nieves (Málaga), a partir de datos de topografía subterránea suministrados por el Grupo de Exploraciones Subterráneas (GES) de la Sociedad Excursionista de Málaga (SEM). Por otra parte, Jeannin *et al.* (2007) encuentran que la dimensión fractal típica de una red de conductos kársticos es 1.67. Muchas veces se encuentran valores menores como 1.5 ± 0.1 en Pardo-Igúzquiza *et al.* (2012) para un sistema kárstico en China, debido, posiblemente, a que no todas las

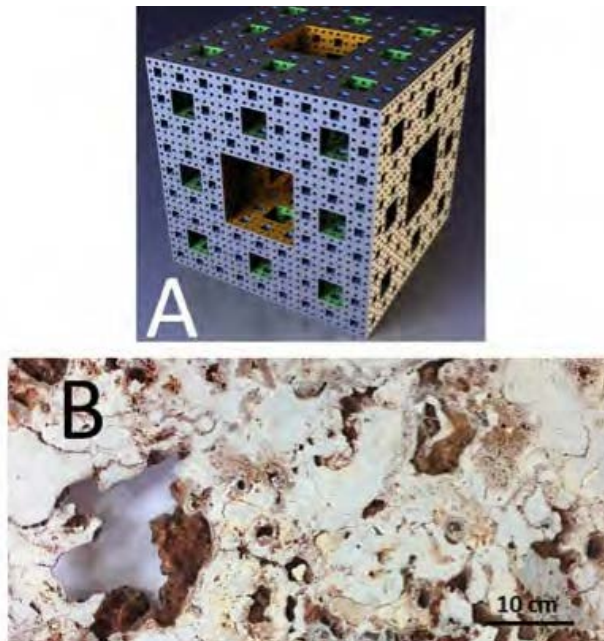


Figura 1. A: esponja de Monge después de cuatro iteraciones en su construcción fractal. Figura tomada de la Wikipedia y creada y distribuida por Niabot bajo la GNU Free Documentation License. B: esponja de Munge estocástica en un fragmento de caliza arrecifal del Mioceno Superior.

incógnitas que se descubren son exploradas por los espeleólogos. Esto posibilitaría que la dimensión fractal pudiese ser utilizada para estimar el porcentaje de una red kárstica que está todavía por descubrir. Para sima GESM, en Sierra de las Nieves (Málaga), Pardo-Igúzquiza *et al.* (2016) encuentran una dimensión fractal de 1.63 ± 0.1 que está más próximo al valor teórico y que indica un sistema bien explorado y topografiado. Otra característica interesante que se ilustra con los fractales es la universalidad de las leyes fractales donde estructuras espaciales similares aparecen a partir de fenómenos físicos muy diferentes. Así, la figura 2A muestra la proyección en planta de la red de conductos kársticos de Sakany en Francia (Cassou y Bigot, 2007; Pardo-Igúzquiza *et al.*, 2011) y la similitud (estadística) con la red del metro de Madrid. Una red de conductos (figura 2A) ha de optimizar el desalojo del agua que se infiltra en una región, la otra (figura 2B) ha de optimizar el transporte de viajeros en una ciudad.

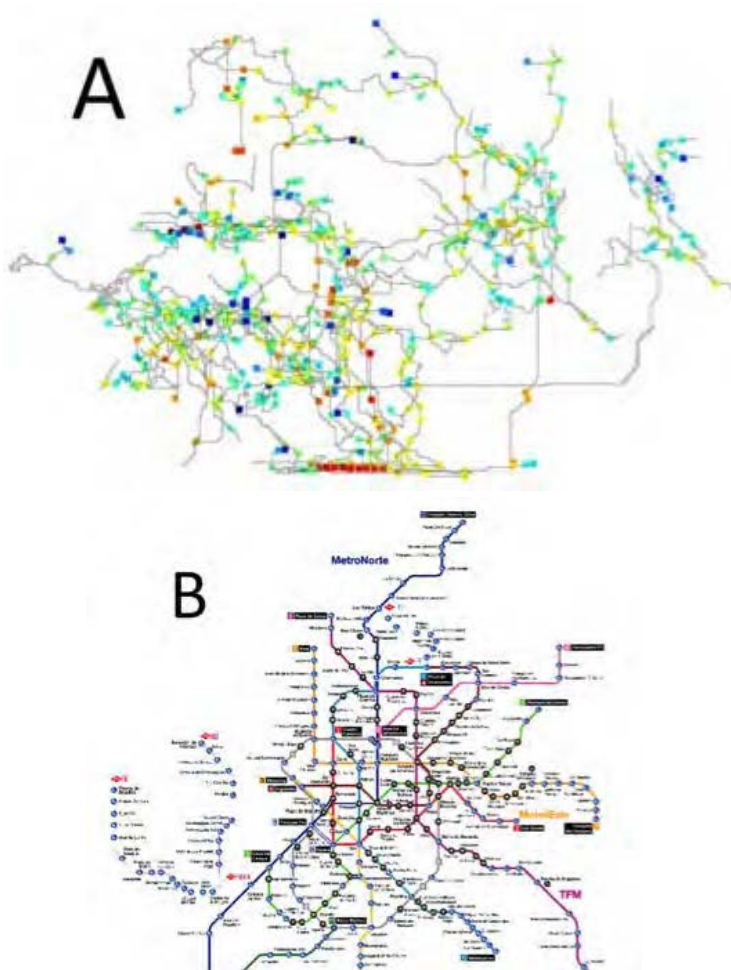


Figura 2. A: Proyección en planta de la red de conductos de Sakany (Cassou y Bigot, 2007). B: Plano del metro de la ciudad de Madrid (Consortio de Transportes Madrid, Comunidad de Madrid).

Discusión y conclusiones

Son muchos los objetos geográficos que exhiben una distribución fractal, por lo menos para un rango de escalas u órdenes de magnitud. Kor ak (1940) fue uno de los primeros en darse cuenta de esto para la superficie de lagos, área de islas y longitud de ríos, por lo que se le ha denominado "ley de Kor ak". Mandelbrot (1983) explicó el origen de esta ley mediante un proceso de fragmentación fractal, en el cual la distribución del tamaño de objetos se obtiene por un proceso iterativo de subdivisión de figuras geométricas. Se ha comentado como la "ley de Kor ak" también se cumple para las longitudes de cuevas en una región, donde la distribución de las cavidades kársticas se puede asimilar al objeto fractal teórico de una esponja de Monge. Esta ley describe como se incrementa el número de cuevas conforme se consideran las cuevas mayores a un tamaño fijo sucesivamente más pequeño. Este número no es aleatorio, ni tampoco uniforme (cuando hay el mismo número de cuevas de todos los tamaños), sino que sigue una ley potencial y por consiguiente tiene un carácter fractal. Con respecto a la dimensión fractal de una red de conductos kársticos, el valor teórico es de 1.67, que es el mismo al de un proceso de camino aleatorio tridimensional que no se cruza consigo mismo. En todos los casos, un proceso subyacente que provocaría esta distribución fractal es la fracturación del macizo recoso que tiene ella misma un carácter fractal.

La asimilación de la geometría de las redes de cuevas con fractales introduce una conexión muy sugerente de las cuevas con las matemáticas. En particular, la conexión de las cuevas con un objeto matemático, los fractales, que provoca atracción y fascinación en el público no especializado. ¿Por qué las cuevas tienen un carácter fractal? y ¿por qué las dimensiones fractales de las cuevas parecen tener valores universales? son dos cuestiones que atraerán la atención del público más curioso. Es por ello, que el concepto de fractal se puede explotar por parte de las cuevas turísticas como elemento cultural y científico que complementa el carácter fascinante de las cuevas para el hombre desde sus orígenes.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación CGL2015-71510-R, KARSTCLIMA, del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España. Nuestro agradecimiento a los espeleólogos del Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga. Queremos agradecer al Dr. Luis Moreno Merino por la revisión constructiva del presente trabajo.

Referencias

- Cassou, J.-P., Bigot, J.-Y. 2007. Le labyrinthe de la grotte de Sakany (Quié, Ariège). Actes de la 17^e Rencontre d'Octobre, Orgnac 2007, 29-36.
- Curl, R.L. 1960. Stochastic models of cavern development. *Bulletin National Speleological Society*, 22, 66-76.
- Curl, R.L. 1964. On the definition of a cave. *Bulletin National Speleological Society*, 26, 1-6.
- Curl, R.L. 1966. Caves as a measure of karst. *Journal Geology*, 74 (5), 798-830.
- Kor ak, J. 1940. Deux types fondamentaux de distribution statistique. *Bulletin Instute International Statistiques*, 30, 295-299.

- Mandelbrot, B.B. 1967. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 156, 636-638.
- Mandelbrot, B.B. 1983. *The fractal geometry of nature*: W. H. Freeman, San Francisco, 468.
- Pardo-Igúzquiza, E., Durán-Valsero, J.J. y Rodríguez-Galiano, V., 2011. Morphometric analysis of three-dimensional networks of karst conduits. *Geomorphology*, 132, 17-28.
- Pardo-Igúzquiza, E., Dowd, P.A., Xu, C. y Durán-Valsero, J.J., 2012. Stochastic simulation of karst conduit networks. *Advances in Water Resources*, 35, 141–150.
- Pardo-Igúzquiza, E., Durán, J.J., Robledo, P., Guardiola, C., Luque J.A., y Martos, S. 2014. Fractal Modelling of Karst Conduits. In: *Mathematics of Planet Earth*. E. Pardo-Igúzquiza, C. Guardiola Albert, J. Heredia, L. Moreno-Merino, J.J. Durán, J.A. Vargas-Guzmán (Eds.) Springer-Verlag, Berlin, Lecture Notes in Earth System Sciences, 217-220.
- Pardo-Igúzquiza, E., Durán, J. J., Robledo-Ardila, P., Luque-Espinar, J. A., Martos-Rosillo, S., Guardiola-Albert, C. y Pedrera, A., 2016. El sistema kárstico de la Sierra de las Nieves (Málaga, España). Un ejemplo de un karst mediterráneo de relieve alto. *Boletín Geológico y Minero*, 127 (1), 193-204.
- Jeannin, P.-Y., Groves, C. y Häuselaman, P., 2007. Chapter 3: Speleological investigations. In *Methods in Karst Hydrogeology*. N. Goldscheider y D. Drew (Eds.). Taylor y Francis, London. 264.
- Turcotte, D.L., 1986. A fractal model for crustal deformation, *Tectonophysics*, 132, 261-269.



Patrimonio geológico y minero en cuevas y minas turísticas



E. Martín-Pinto, et al., 2018. Geoparques y cuevas. Propuesta para el desarrollo de espacios naturales protegidos en el subsuelo en el marco de la UNESCO. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 131-140.

Geoparques y cuevas. Propuesta para el desarrollo de espacios naturales protegidos en el subsuelo en el marco de la UNESCO

E. Martín-Pinto⁽¹⁾, P.A. Robledo Ardila⁽²⁾, J. Moreno García⁽³⁾,
F. Denguir Bujanow⁽¹⁾ e I. Vadillo Pérez⁽¹⁾

(1) Grupo de Hidrogeología, Departamento de Geología. Campus de Teatinos, s/n. 29071. Universidad de Málaga. esthermpinto74@gmail.com, fbujanow@gmail.com, Vadillo@uma.es

(2) (1) Instituto Geológico y Minero de España, C/ Felicià Fuster s/n, 07007. Palma de Mallorca, Illes Balears; pa.robledo@igme.es

(3) Asociación ENBATA. Zurbaranbarri, 59 bis. 48007 Bilbao. azkenhesia@yahoo.es

RESUMEN

Desde que en febrero de 2004 se celebrara en París la reunión de expertos internacionales en conservación y promoción del patrimonio geológico en la que se creó la Red Global de Geoparques, han sido muchos los espacios naturales que se han acogido a esta figura. No obstante, todavía no ha habido un país, territorio o región en el mundo que haya promovido un entorno subterráneo (red de cavidades o conjuntos de cavernas) como Geoparque, aun recogiendo todos las características que define la UNESCO en la Carta de Principios de la Red de Geoparques Europeos: (1) espacios que incluye un patrimonio geológico particular; (2) permiten una estrategia de desarrollo territorial sostenible, (3) promueven el desarrollo regional o local y (4) tienen límites bien definidos y extensión para un importante desarrollo económico. Además, son lugares geológicos de importancia en términos de su valor científico, rareza, valor estético o educativo y también pueden tener un interés arqueológico, ecológico, histórico, cultural o gastronómico. En este trabajo se pretende abrir una reflexión sobre el activo que pueden suponer las cavidades en la Red de Geoparques y desarrollar propuestas con ejemplos que pueden acogerse a esta figura, dotando a UNESCO de un nuevo sistema natural en la Red Global.

Palabras clave: cavidades, Geoparque, UNESCO.

Geoparks and caves. Proposal for the development of natural protected underground areas in the framework of UNESCO

ABSTRACT

In February 2004 the establishment of the Global Geoparks Network (GGN) was created by the committee of international experts on geological heritage at the UNESCO Headquarters in Paris. Since then, a large number of natural sites have joined this Network. However, to this day, there has not yet been a country, territory or region in the world that has promoted an underground environment (Groups of caves or cavity networks) as a Geopark, even though they meet the fundamental criteria set by the UNESCO GGN Guidelines: (1) The areas must have a geological heritage of great value; (2) An effective management system that allows a sustainable socio-economic and cultural development across the territory where it is located; (3) Promote local or regional development and; (4) Have clearly defined boundaries and a large enough area for it to serve local economic and cultural development. In addition to all of this, underground environments are sites of geological importance in terms of their scientific, educational or aesthetic values and they may also have an archaeological, ecological, historical, cultural or gastronomic interest. This work aims to reflect upon the potential that underground environments have in the Global Geopark Network and to develop proposals, using examples of cavities that fulfill the criteria established by the Global Geopark Network. This provides UNESCO with a new natural system in the Global Network.

Keywords: caves, Geoparks, UNESCO.

Introducción

El concepto de Geoparque surgió con el fin de crear una herramienta para impulsar el desarrollo local y educativo de un territorio, utilizando, y a su vez protegiendo, el patrimonio natural de la zona. Un Geoparque (*Geopark*) es un territorio que presenta un patrimonio geológico notable que es el eje fundamental de una estrategia de desarrollo territorial sostenible basado en la educación y el turismo (Carcavilla y García, 2014). La declaración de un Geoparque se basa en tres principios:

- 1) La existencia de un patrimonio geológico que sirva de eje conductor.
- 2) La puesta en marcha de iniciativas de geconservación y divulgación científica.
- 3) Favorecer el desarrollo socioeconómico a escala local y regional.

Además de todo lo anterior, un Geoparque debe de tener unos límites claramente definidos y una extensión adecuada para asegurar el desarrollo económico de la zona, pudiendo incluir áreas terrestres, marítimas y subterráneas (UNESCO, 2004 y 2008). También, se valoran positivamente la existencia de recursos naturales y culturales en la zona (recursos arqueológicos, históricos, ecológicos, etc) (Carcavilla *et al.*, 2007). Es importante diferenciar un Geoparque de un espacio natural protegido (ENP), ya que el segundo está de alguna manera "limitado" al desarrollo económico debido a estrictas regulaciones, y cómo ya se ha comentado, uno de los objetivos principales de los Geoparques es impulsar el desarrollo económico de una localidad o región.

Estas premisas fundamentales se pueden aplicar perfectamente al subsuelo y la inclusión de zonas con importantes cavidades subterráneas a la red global de Geoparques sería una estrategia de interés a nivel mundial para dinamizar económicamente regiones o países que cuentan con cavidades realmente asombrosas, cómo puede ser el caso de Han Son Doong o Phong Nha en Vietnam (figura 1), la cueva de Ojo de Guareña en España o las cuevas bioluminiscentes de Waitomo o Nikau en Nueva Zelanda (figura 1).

En España, actualmente existen 11 Geoparques, nueve situados en la península, de los cuales 3 son andaluces, y 2 en las Islas Canarias: La isla de Lanzarote y la Isla de El Hierro (figura 2). Además existe un Geoparque en vías de aprobación oficial (Conca de Tremp, Lérida) y otros dos pro-

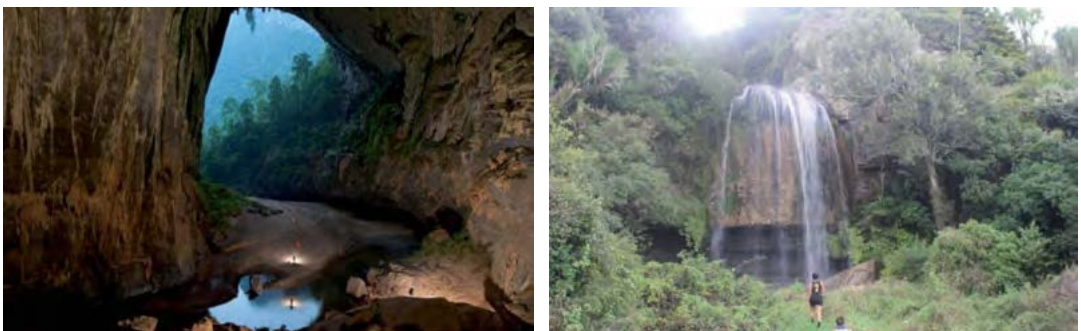


Figura 1. Izquierda, cueva de Han Son Doong en el Parque Nacional de Phong Nga-Ke Bang, Vietnam y Derecha, Paisaje kárstico en los alrededores de la cueva Nikau en Nueva Zelanda.



Figura 2. Mapa con la localización de la red de Geoparques españoles (enero de 2018).

yectos de Geoparque que están siendo evaluados para determinar su posible ingreso en la Red Mundial de Geoparques: El Geoparque de las Montañas de Courel (Galicia) y el Geoparque del Cuaternario Valles del Norte de Granada (Granada).

Las iniciativas que se ponen en práctica en los Geoparques tienen que ser planteadas por los actores sociales y empresarios de la zona y se deben vincular a los valores geológicos de su entorno para que el máximo beneficio sea en el propio territorio local del Geoparque (Carcavilla *et al.*, 2011).

De los Geoparques españoles, el más reciente es el Geoparque “Las Loras”, repartido entre las provincias de Burgos y Palencia. Fue designado como Geoparque mundial de la UNESCO en 2017 y engloba 16 municipios. Es un caso interesante ya que el territorio en el que se encuentra presenta un problema de despoblamiento de áreas rurales (menos de 15.000 habitantes) y envejecimiento de la población, por lo que la declaración del Geoparque ha ayudado a frenar esta problemática, tomando diferentes iniciativas orientadas al desarrollo del territorio (Adelcyl, 2014).

Aunque muchas veces pase desapercibido, en el subsuelo existen elementos de riqueza cultural, histórica y geológica que se combinan para dar lugar a sitios de elevado interés, y que tienen un gran potencial de desarrollo local o regional. Muchos de estos lugares cumplen sobradamente con los requisitos que establece la UNESCO para ser Geoparque. Aunque existen algunas cavidades dentro de ciertos Geoparques, sin embargo, aún no se ha declarado ninguna cavidad de grandes dimensiones como Geoparque o un territorio cuyo núcleo central sea la existencia de una gran cavidad.

En este trabajo se propone incluir algunas cavidades como un nuevo criterio para la propuesta de posibles Geoparques, y se discuten algunos ejemplos de sistemas de cavidades a nivel mundial.

Aspectos ambientales para la declaración de un posible Geoparque subterráneo

Para que una zona subterránea sea declarada como Geoparque, es necesario que cumpla con los aspectos ambientales establecidos por la UNESCO. En un Geoparque no sólo deben de resaltar los elementos geológicos que presume tener, sino que se debe utilizar todo el patrimonio natural en conjunto para promover la educación ambiental y el desarrollo sostenible del territorio. Debe de abarcar cuestiones como (UNESCO, 2015).

La evolución de procesos geológicos y la conservación del patrimonio geológico: Los Geoparques deben resaltar los procesos geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos de interés y se deben de desarrollar métodos y estudios para conservar el patrimonio geológico.

Riesgos geológicos: Además, brindan información sobre riesgos geológicos y las formas de reducir su impacto, con el objetivo de educar a la población local y a los visitantes sobre los potenciales peligros que pueden suponer los procesos geológicos de un determinado lugar.

El cambio climático: Los Geoparques mundiales de la UNESCO sirven para estudiar los efectos del cambio climático a lo largo de la historia (a través del estudio de los espeleotemas), educando a la población sobre el impacto que puede tener el cambio climático sobre una región, y proporcionar a las comunidades locales el conocimiento para mitigar los efectos.

La explotación sostenible de recursos naturales: Los Geoparques Mundiales de la UNESCO informan a las personas sobre el uso sostenible y la necesidad de recursos naturales, ya sean minados, extraídos o aprovechados del medioambiente que los rodea.

La protección de la biodiversidad: La Biosfera y la Geosfera están estrechamente relacionadas. En los Geoparques, además de conservar la geología del lugar, se llevan a cabo actividades con el fin de concienciar al público sobre la relación entre geo-biodiversidad y la importancia de su adecuada gestión.

La evolución del patrimonio cultural: El patrimonio cultural es uno de los puntos más importantes de los Geoparques. Estos deben de utilizar la conexión que ha tenido la cultura humana con el patrimonio geológico para promover la cultura de la zona (historia, arte, gastronomía, religión, etc.)

Conocimiento local: Uno de los criterios de los Geoparques Mundiales de la UNESCO es que los conocimientos, las prácticas y los sistemas de gestión locales, junto con la ciencia, se incluyan en la planificación y la administración del área.

Todas las cuestiones anteriores se pueden trasladar al subsuelo. Algún ejemplo interesante de cavidad que encaja con el perfil de un posible Geoparque es la cueva de Ojo de Guareña, situada al norte de la provincia de Burgos (España), en la Merindad de Sotoscueva (figura 3 A). En este sentido, es importante resaltar que algunas grandes cavidades gozan de una protección de



Figura 3. (A) Ermitas de San Tirso y San Bernabé a la entrada de la cueva de Ojo Guareña, (B) Acceso a la cueva de Postojna al norte del pueblo de Postojna (Eslovenia).

UNESCO por sus valores geológicos, como la cueva de Postojna, en Eslovenia, declarada Patrimonio Mundial (figura 3 B).

Teniendo en cuenta los aspectos expuestos anteriormente, y utilizando este ejemplo emblemático español de gran complejo kárstico subterráneo, planteamos la pregunta siguiente: ¿cumple Ojo de Guareña los aspectos medioambientales establecidos por la UNESCO para ser nombrado como Geoparque subterráneo? A la respuesta se puede hacer una aproximación observando la tabla 1, donde se recogen los aspectos que cumple.

El primer aspecto a considerar es el patrimonio geológico: la red de cavidades de Ojo Guareña constituye la tercera mayor red de cavidades conocida en España, la octava cavidad más grande de Europa y se encuentra entre las 20 mayores del planeta (Gulden, 2010). Los 110 km de longitud de conductos subterráneos resultan del complejo entramado de una red formada por 20 cuevas principales. Ofrece una explicación del funcionamiento dinámico y complejo de los sistemas kársticos. Este sistema endokárstico tiene un gran interés científico desde el punto de vista hidrogeológico y geomorfológico, ya que cuenta con una red kárstica desarrollada muy importante con un nivel inferior atravesado por el río Guareña (Rodríguez, 2012).

Aspectos Medioambientales	Si (✓) / No (X)
Patrimonio Geológico	✓
Riesgos Geológicos	X
Cambio Climático	✓
Desarrollo Sostenible Local	✓
Protección de la Biodiversidad	✓
Patrimonio Cultural	✓
Participación local	✓

Tabla 1. Aspectos ligados a los Geoparques que cumple la cueva de Ojo de Guareña. Aunque se ha considerado que en general no cumple el criterio de riesgos geológicos, en realidad existen procesos activos que pueden dar lugar a ciertos riesgos, como hundimientos o inundaciones.

En cuanto al estudio y concienciación del público sobre los efectos del cambio climático, en la cueva de Kaite en Ojo de Guareña, se han llevado a cabo estudios de espeleotemas con el fin de obtener series de la variabilidad climática reciente en el Norte de España (Martín *et al.*, 2004).

Además de estimular la economía local de la zona, Ojo Guareña sirve como un punto de anclaje de una población que vive de la actividad turística de la cueva, y tiene una zona de influencia socioeconómica (ZIS) de 51.100 ha que incluye una población de 3.600 habitantes. Por tanto, cumple los criterios de desarrollo sostenible local y participación de las comunidades locales.

Con respecto a la protección de la biodiversidad: La importancia de sus especies biológicas han supuesto que distintas Administraciones Públicas hayan establecido un régimen de protección general sobre el complejo kárstico al declararlo como Monumento Natural y, recientemente, a la Red Ecológica Europea Natura 2000. Según un estudio realizado por la Junta de Castilla y León junto con el CSIC, Ojo de Guareña alberga 195 especies de invertebrados de los cuáles 34 son endémicas y 32 son especies nuevas (Pérez *et al.*, 2010).

Ojo Guareña conserva un importante patrimonio histórico-artístico: Las ermitas de San Bernabé y San Tirso, y sin olvidar los hallazgos de restos prehistóricos como las pinturas paleolíticas de Cueva Palomera que han sido datadas a finales del Interestadio Tardiglacial o en la transición al Dryas reciente (Corchón *et al.*, 1996).

Por último, en relación a la participación local cabe destacar las actividades que lleva a cabo la población del entorno y el empuje mediante el turismo sostenible ofertando actividades relacionadas con la naturaleza (rutas a caballo, cicloturismo, escalada y senderismo) y la posibilidad de integrarse en costumbres de la vida tradicional de la zona, para mantenerlas vivas.

Aspectos legales a considerar en la declaración de Geoparque subterráneo

La declaración de Geoparques subterráneos supone importantes retos para nuestro ordenamiento jurídico. De todos ellos, el más específico a esta modalidad consiste en abordar la operación jurídica de desvincular el medio subterráneo de la superficie, lo que será necesario en la mayoría de los casos para garantizar que la declaración de Geoparque se circunscriba al sistema endokárstico, sin alcanzar a las fincas del exokarst, otorgando así un diferente trato y estatuto legal a cada nivel.

Sin embargo, nuestro sistema legal no está bien pertrechado para diferenciar un territorio en “niveles”, donde la calificación reside en los usos a los que están vinculados los terrenos a cada cota (en superficie y en profundidad) tal y como corresponde al Derecho. Sin duda, el art. 26 del 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 (TRLRUR) es un buen punto de partida, pero falta un verdadero desarrollo legislativo y ejecutivo por los operadores del territorio, pese a que en las modernas ciudades conviven con normalidad muy diversos usos y propiedades en la vertical sobre un mismo punto en la horizontal. A modo de ejemplo, de abajo arriba, nos podemos encontrar superpuestos, unos sobre otros, líneas subterráneas de ferrocarril, túneles de metro local, parkings subterráneos, sistemas generales de alcantarillado, calles o edificios en régimen de propiedad horizontal, puentes o pasarelas. Cada uno con su régimen legal y su propietario.

Es difícil de encontrar fuera de las ciudades una regulación clara sobre la ordenación por “niveles” o capas, y ello aunque el mundo jurídico también es obviamente tridimensional. Consecuencia de esta ausencia son los múltiples conflictos derivados de la superposición de usos que carecen de respuesta positiva, lo que genera incertidumbres que en nuestro caso inciden particularmente en dos cuestiones: la ordenación tridimensional del territorio, de forma que la cavidad del subsuelo se pueda vincular a un uso y régimen concreto (declaración de Geoparque con la normativa de protección y gestión que se determine), mientras que las fincas de la superficie sigan otro u otros diferenciados; y el régimen jurídico del derecho de propiedad de estas redes kársticas, especialmente para diferenciarlas de las fincas de la superficie, pero también para identificar a su propietario si así procede.

De la ordenación bidimensional de la superficie a la ordenación tridimensional por niveles del territorio

Actualmente, el problema reside en la extendida y acríticamente aceptada concepción bidimensional del territorio, plasmada en la elaboración por parte de las autoridades administrativas de mapas cartográficos de la superficie vinculados en exclusiva a los usos del territorio. Con ello, obviamente, esta atribución de usos afecta únicamente a la superficie, y ha servido de argumento para defender que con ello se contagia a toda la columna de roca y aire bajo y sobre este espacio; desde luego no es así o, al menos, no debiera serlo.

En la delimitación espacial y asignación de usos de los Geoparques subterráneos es preciso, y el derecho debe respaldarlo, que desgajemos jurídicamente el exokarst del endokarst y, en lo que a la ordenación territorial compete, que se puedan atribuir usos diferentes a la superficie (agrícolas, ganadores, constructivos, etc.) y al subsuelo (protección del Geoparque), de forma absolutamente independiente. Incluso debe ampararse que más abajo se pudieran llevar a cabo otros usos, como utilización de acuíferos o extracción de recursos mineros.

Esta estratificación jurídica del territorio, de forma que existan distintas vinculaciones de usos a distintos niveles, supone componer un mosaico tridimensional superpuesto de fincas y parcelas. Ello, no quiere decir, al igual que se reconoce en las ciudades, que no exista conexión entre estos compartimentos verticales. De hecho, las figuras que rigen las relaciones entre vecinos en el plano horizontal son trasladables con pocas modificaciones al plano vertical, por lo que el derecho está dotado de herramientas para garantizar la solución de los conflictos que pudieran surgir. Compatibilización de usos y delimitación del alcance jurídico del contenido de derecho de propiedad en virtud de la función social son algunas de las claves en este sentido e implican, eso sí, importantes condicionantes en el régimen de usos de sus fincas respectivas a distintos niveles. Para compensar estos condicionantes o restricciones, debe profundizarse en la búsqueda de algún tipo de vía compensatoria o indemnizatoria, incluidos beneficios fiscales.

En suma, la declaración de un Geoparque subterráneo precisa que el Derecho abrace un territorio multinivel -estratificado- en el que se prevean usos a distintas cotas reflejados en mapas tridimensionales elaborados con las herramientas informáticas actuales. Esta estratificación de usos del territorio conlleva, consecuentemente, la existencia de superposición de fincas. Ello conduce a otra cuestión: despejar la pregunta de si el propietario de la finca lo es a su vez, y en virtud de su título, de la cavidad abajo situada, y en caso negativo identificar quién es su titular.

No cabe duda de que el art. 26.1.a TRLS prevé expresamente la superposición de fincas, aunque no despeja la pregunta de dónde se fija la linde entre ellas. En el caso del derecho, se ha propuesto que el criterio para diferenciar capas o estratos se ampare en la conocida teoría del interés de Ihering, lo que supone que el alcance físico de la finca llegará hasta donde sea preciso para garantizar los usos que tenga legalmente reconocidos por el planeamiento o por las autoridades sectoriales, no más allá. Ello, nos sitúa en un terreno de difícil concreción, pero que es posible determinar caso a caso. En aplicación de ello, por poner un ejemplo, el lindero vertical de una finca superficial vinculada a uso ganadero no alcanzará a una cavidad localizada metros más abajo.

Eso quiere decir que en términos generales, aunque con sus cuestiones particulares (puntos de entrada al sistema, por ejemplo), la declaración como Geoparque de un sistema kárstico subterráneo no se patrimonializará en los propietarios de las fincas que un plano bidimensional “manche” como ámbito del Geoparque. Sus derechos se verán afectados no en cuanto al alcance físico, ya que la cavidad estará extramuros de su finca, sino en cuanto al contenido de sus facultades demaniales, que se verán afectadas por la aparición, en muchos casos *ex novo* para el derecho, de un nuevo “vecino” bajo ellos que deberán respetar y que generará esas consecuencias derivadas de las relaciones de vecindad a las que hemos referido.

Despejada la primera parte de la cuestión, queda la siguiente: si este sistema es independiente de la parcelación de superficie, ¿a quién pertenece? La doctrina experta jurídica abraza casi todo el espectro de posibilidades. Algunos defienden que son dominio público, aunque no coinciden en señalar si estatal, autonómico, provincial o local; otros postulan que las cavidades no tiene propietario mientras no estén vinculadas a un uso o se ocupen efectivamente, como exige el Código Civil como método para adquirir la propiedad. En cualquier caso, éste no debiera ser el parámetro más importante, y sí la correcta definición de los fines y objetivos en la declaración de Geoparque acompañado de un régimen legal que se ha de gestionar correctamente.

Fronteras y conflictos: la declaración de un Geoparque transfronterizo, un reto mundial

Tal y como se ha expuesto en el apartado anterior, la declaración de Geoparque supone adoptar y admitir una serie de medidas ligadas a la ordenación y uso del territorio. Como un ejemplo emblemático, que cumple con todos estos requisitos que determina UNESCO, podrían citarse los cenotes de la Península de Yucatán. En este caso concreto y si lo enfrentamos con el ejemplo propuesto anteriormente destacan dos aspectos muy importantes que darían lugar a una profunda revisión y reflexión en relación a la declaración de un posible Geoparque subterráneo. Por un lado, establecer los límites del Geoparque. La Península de Yucatán es un vasto territorio de más de 125000 km² y conjuga tres estados de México (Yucatán, Campeche y Quintana Roo) y dos países más, Guatemala y Belice. Sin duda, articular una estructura geopolítica entre tres estados supone una dificultad añadida pero a la vez, también supone un reto para los interesados y la propia UNESCO, ya que plantea varias incógnitas ¿Podría un Geoparque subterráneo ser transfronterizo? ¿Cómo se conjugan legislaciones de tres países diferentes que comparten un mismo patrimonio para declarar una figura de este calibre? y ¿supone la extensión del territorio por debajo de la superficie un problema para la declaración de Geoparque, con independencia de su titularidad?. Por otro lado, un Geoparque subterráneo transfronterizo seguramente podría suponer una oportunidad para algunos países iberoamericanos, donde parece evidente que el

desarrollo de las economías locales y regionales es necesario. La declaración de una figura bajo el auspicio de la UNESCO, como es un Geoparque subterráneo, impulsaría activamente un segmento como el geoturismo que, con toda seguridad, dinamizaría la actividad socioeconómica de estas áreas a la vez que, conservaría el importante valor patrimonial a todos los niveles que caracterizan estas regiones del Planeta.

Conclusiones

Desde el punto de vista medioambiental existen numerosos ejemplos en España y en el resto del mundo donde la riqueza endokárstica justifica, al menos, el estudio de las grandes cavidades subterráneas como propuestas de posibles Geoparques subterráneos. Los criterios establecidos por la UNESCO para que una zona sea declarada Geoparque (existencia de patrimonio geológico como eje conductor; iniciativas de geconservación y divulgación científica y desarrollo socioeconómico a escala local y regional) se cumplen en muchos lugares del planeta con riqueza endokárstica.

Además de los requisitos medioambientales, hay que establecer los requisitos legales que amparen el marco dentro del cual hay que gestionar esta figura de protección/ desarrollo. De todos ellos, el más específico consiste en constituir como figura jurídica desvinculada el territorio exokárstico del endokárstico, es decir, la superficie del medio subterráneo. Eso garantizaría que la declaración de Geoparque se pudiera circunscribir al sistema endokárstico, otorgando, por tanto, un trato jurídico diferenciado y un estatuto legal a cada nivel.

Referencias

- ADELACYL, 2014. <http://www.adelacyl.org/buenaspracticass/works/geoparque-las-loras/>
- Camacho Pérez, A.I., Temiño Fernández, C., Cabeza Sanz, B. y Puch Ramírez, C. 2010. El Monumento Natural de Ojo Guareña (Burgos, España): un hotspot de biodiversidad acuática. *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*, 621-636.
- Carcavilla, L., Belmonte, A., Durán, y J.J. Hilario, A. 2011. Geoturismo: concepto y perspectivas en España. *Enseñanza de las Ciencias de La Tierra*, 19.1, 81-94.
- Carcavilla, L. y García Cortés, A. 2014. *Geoparques. Significado y Funcionamiento*. Informe Inédito. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, 7.
- Corchón, M.S., Valladas, H., Bécares, J., Arnold, M., Tisnerat, N. y Cachier, H. 1996. Datación de las pinturas y revisión del arte Paleolítico de Cueva Palomera (Ojo Guareña, Burgos, España). *Zephyrus*, 49, 37-60.
- Gulden, B. 2010. <http://www.caverbob.com/wlong.htm>
- Martín Chivelet, J., Turrero, M.J., Muñoz, M.B., y Domínguez Villar, D. 2004. Los speleotemas como indicadores de Cambio Climático. *Cubia*, 7, 29-32.
- Moreno, J. 2015. Los distintos estatutos jurídicos del subsuelo, IVAP: 413 p.
- Robledo, P.A. y Durán Valseiro, J.J. 2011. Geoturismo y Cavidades: Perspectivas en las Islas Baleares, España. *31º Congreso Brasileiro de Espeleologia*, Ponta Grossa, 189-200.
- Rodríguez Noriega, J. 2012. *Patrones de composición físico-química y de distribución de la fauna estigobia en el sistema hidrológico del Monumento Natural de Ojo Guareña, Burgos, España*. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid. 20-29.
- UNESCO, 2015. https://www.azoresgeopark.com/media/docs/ggn_brochure_2018_1.pdf

F. Fernández Amo, *et al.*, 2018. Ruta geominera entre los lugares de interés científico minas de Santa Marta y minas de Burguillos del Cerro (Badajoz, Extremadura). En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 141-152.

Ruta geominera entre los lugares de interés científico minas de Santa Marta y minas de Burguillos del Cerro (Badajoz, Extremadura)

F. Fernández Amo⁽¹⁾, R. Pagés Rodríguez⁽²⁾ y M. Dorado Martínez⁽³⁾

(1) TECMINSA, S.L., C/ Estatuto de Autonomía, s/n Santa Marta de los Barros, Badajoz (España), francis@tecmineras.com

(2) Dirección General de Turismo, Junta de Extremadura, Mérida, Badajoz (España). Av. Comunidades s/n. rafael.pages@juntaex.es

(3) Minas de Logrosán, Carretera de Guadalupe s/n. Logrosán, Cáceres (España). minasdelogrosan@gmail.com

RESUMEN

Las minas de Santa Marta (Santa Marta, Badajoz) son cinco minas de vanadio y plomo que se explotaron a principios del siglo XX. Presenta numerosas singularidades geomineras que han motivado su declaración como LIC (Lugar de Interés Científico) de Extremadura. Las minas Garandina y Constante suman más de 1 km de galerías que actualmente se encuentran en proyecto para su rehabilitación, y en ellas se pueden contemplar: espelotemas, filones mineralizados, fallas, pliegues, geodas, gossan con minerales de vanadio como la calderonita, etc. En el exterior de las minas destaca un castillete de mampostería, hornos, aljibes, lavaderos o un poblado minero con más de treinta viviendas. Las minas de Burguillos del Cerro (Burguillos del Cerro, Badajoz), son tres minas de hierro que tienen un recorrido subterráneo de unos 1300 m, donde se pueden observar filones mineralizados, fallas, pliegues, espeleotemas, surgencias de aguas ferruginosas, railes, vagonetas mineras, castillete con las jaulas mineras, etc. En el exterior se conserva en buen estado: las instalaciones de aprovechamiento, la ermita de Santa Bárbara y las escombreras que albergan un rico patrimonio mineralógico que ha sido declarado, junto con las minas, Lugar de Interés Comunitario (LIC) de Extremadura. El objetivo es crear una ruta por los buenos accesos y corta distancia entre ambas poblaciones. A lo largo de esta ruta los visitantes, además de conocer ambos espacios, podrán disfrutar de un rico patrimonio geológico, natural y cultural, como puede ser: el yacimiento paleontológico del Cámbrico de Alconera, la Ruta de los Jaspes en Feria, los conjuntos monumentales de Zafra y Feria o el rico patrimonio natural de las Sierras de Alconera y La Calera, la dehesa de encinas de Burguillos del Cerro o la Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) Complejo Lagunar de La Albuera. Un patrimonio singular, atractivo y diverso, unido por el turismo subterráneo de las minas de Santa Marta y Burguillos del Cerro.

Palabras clave: Extremadura, minas, ruta geominera.

Geomining route between the places of scientific interest Santa Marta Mine and Burguillos del Cerro Mine (Badajoz, Extremadura)

ABSTRACT

The mines of Santa Marta (Santa Marta, Badajoz) are five vanadium and lead mines that were exploited at the beginning of the twentieth century. They present numerous geomining singularities that have motivated its declaration as LIC (Place of Scientific Interest) of Extremadura. The Garandina and Constante mines cover in total more than 1 km of galleries which are currently in project for rehabilitation, and along them we can see: karst formation, mineralized reefs, faults, folds, geodes, gossan with vanadium ores as calderonita, etc. Outside the mines a stone s headframe, furnaces, cisterns, laundries or a mining town with more than thirty houses stand out. The mines of Burguillos del Cerro (Burguillos del Cerro, Badajoz), are three iron mines that have an underground route of about 1300 m, where we can see mineralized

reefs, faults, folds, speleothems, upwelling of ferruginous waters, rails, mining trolleys, a mining head frame with mining cages, etc. The exterior is preserved in good condition: the facilities of exploitation, the hermitage of Santa Bárbara and the mining dumps that house a rich mineralogical patrimony that has been declared, together with the mines, LIC of Extremadura. The objective is to create a route, by the good accesses and short distance between the two villages In addition to visiting both spaces, visitors can enjoy a rich geological, natural and cultural heritage along this route such as: The paleontological site of the Cambrian of Alconera, the route of the Jaspers in Feria, the monumental villages of Zafra and Feria or the rich natural patrimony of the Sierras of Alconera and La Calera, the dehesa of quercus of Burguillos del Cerro besides the Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) Complejo Lagunar de La Albuera. A unique, attractive and diverse heritage, united by the underground tourism of the mines of Santa Marta and Burguillos del Cerro.

Keywords: Extremadura, mines, geomining route.

Localización geográfica

Las minas de Santa Marta y de Burguillos del Cerro se ubican en las localidades que les dan nombre. El área que comprende el antiguo distrito minero de Santa Marta está enclavada a 45 km al sudeste de Badajoz, más concretamente se sitúa en los términos municipales de Santa Marta de los Barros y Villalba de los Barros. Las minas de Burguillos del Cerro se sitúan a 76 km al sudeste de Badajoz.

Minas de Santa Marta, lugar de interés científico

Las minas de Santa Marta se declaran LIC de Extremadura por la singularidad mineralógica, por el rico patrimonio geológico y minero que alberga, y por la situación de riesgo de expolio y degradación que corre este patrimonio natural.



Figura 1. Localización geográfica.

En el contexto geológico se ubican en el dominio de Ossa-Morena, dentro del Dominio Norte de la Antiforma Monesterio – Olivenza. En este dominio el yacimiento encaja en la unidad estratigráfica Gneises de Azuaga y Anfibolitas de las Mesas. El yacimiento es de tipo *stockwork* asociado a una cúpula de gabros granatíferos. Dentro de las galerías de la Garandina y Constante, se observa el control estructural de la mineralización a favor de fallas y fracturas que han servido como “canales o conductos” por donde han circulado los fluidos mineralizadores en varias etapas, estas zonas actúan como una “trampa estructural” y han favorecido el depósito y concentración de los metales en determinados segmentos o partes de las mismas.

El conjunto minero de Santa Marta, junto con su entorno, reúne todos los condicionantes (singularidad, importancia y autenticidad), para realizar una visita que posee un alto valor patrimonial, geológico, natural y turístico. Los elementos patrimoniales de interés científico, educativo y geoturístico, que se encuentran en la zona a modo de resumen son los que se detallan a continuación.

Patrimonio geológico

En el interior de las minas de Santa Marta se puede contemplar un potente gossan de vanadio, con un espesor que supera los 40 m de potencia, constituyendo este yacimiento una singularidad geológica y didáctica en el ámbito de nuestro continente y habiendo sido objeto de estudio, investigación y explotación desde finales del siglo XIX.

El yacimiento de Santa Marta presenta una de las gamas más extensa de minerales secundarios de Pb-Zn-V de Europa destacando, por su elevado interés patrimonial y mineralógico, la vanadinita y la calderonita.

En las minas de Santa Marta se descubrió la calderonita, siendo éste el primer mineral descubierto a nivel mundial en Extremadura. Se trata de uno de los minerales más raros del mundo, ya que sólo está presente en contados yacimientos mundiales, siendo las Minas de Santa Marta donde aparecen los mejores cristales de esta especie mineral en Europa.

Las vanadinitas de Santa Marta son muy reconocidas por mineralogistas a nivel europeo, en estas minas se encuentran los mejores ejemplares, por la variedad de hábitos y colores de vanadinita de Europa; se conservan espléndidos cristales de vanadinita en el Museo Geominero de

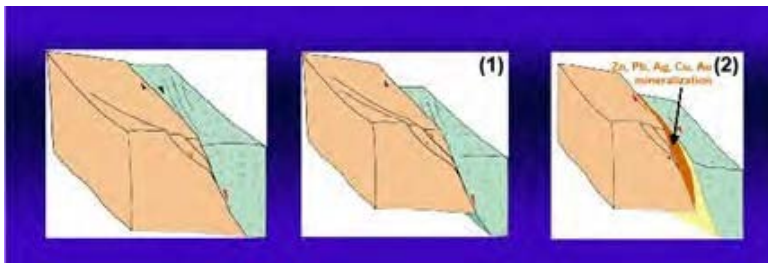


Figura 2. Control estructural de la mineralización.



Figura 3. Calderonita. Minas de Santa Marta (foto: Luigi Chiappino).

España (ubicado en la sede del Instituto Geológico y Minero de España), aunque las mejores muestras de vanadinita se pueden observar en el Museo de Geología de Santa Marta “José María Fernández Amo”.

Así mismo, dentro de las galerías y en el entorno, se pueden observar diferentes formaciones y estructuras de interés geológico como son los espeleotemas de carbonatos y sulfatos de hierro y cobre en la Mina Garandina, superficies de fallas, afloramientos del plutón de gabro granatífero, neoformación de hidrocincitas, rozenitas, smithsonitas y alunitas en el interior de las minas, paleocauces fluviales en el mioceno continental de Tierra de Barros, etc.

Elementos patrimoniales y culturales asociados

En las minas de Santa Marta hay dos que presentan condiciones óptimas para su acondicionamiento para visitas turísticas, con un recorrido superior a los 500 m, estas minas son la mina Garandina y la Mina Constante.

En la mina Garandina se explotó el vanadio hasta 1905, su entrada es a través de un plano inclinado y tiene un recorrido de unos 150 m, se distinguen cuatro tramos de galerías dispuestos

irregularmente y siempre siguiendo la dirección del filón. La visita a estas minas es espectacular por el colorido de las paredes de las galerías y sobre todo por el patrimonio geológico que alberga, en el que destacan espelotemas de carbonatos y sulfatos de cinc, hierro y cobre, geodas, espejos de falla, diques de calcita espática, cristales de tamaño centimétrico de vanadinita recubiertos de smithsonita, manantiales, filones mineralizados, etc.

La mina Constante es la más grande de Santa Marta, tiene un total de 2,7 kilómetros de galerías abiertas y unos 500 m de galerías rellenas. Se trata de la mayor explotación de vanadio de Europa y una de las minas de plomo-cinc más grandes del suroeste ibérico. Está prevista la visita de al menos 400 m de galerías, todas ellas de fondo plano, excepto la entrada en la que existe un importante plano inclinado. Alberga un rico patrimonio geológico y minero en el que destacan los filones mineralizados, gossan de vanadio, espejos de falla, manantiales, cámaras de explotación, cueles mineros, railería, vagonetas, etc.

Instalaciones mineras de exterior

En el exterior de las minas se encuentran varias instalaciones mineras que han permanecido en mejor o peor estado de conservación tras más de un siglo de deterioro. Destaca el castillete del Pozo Maestro de la mina Constante que es de mampostería, también tiene interés por su patri-

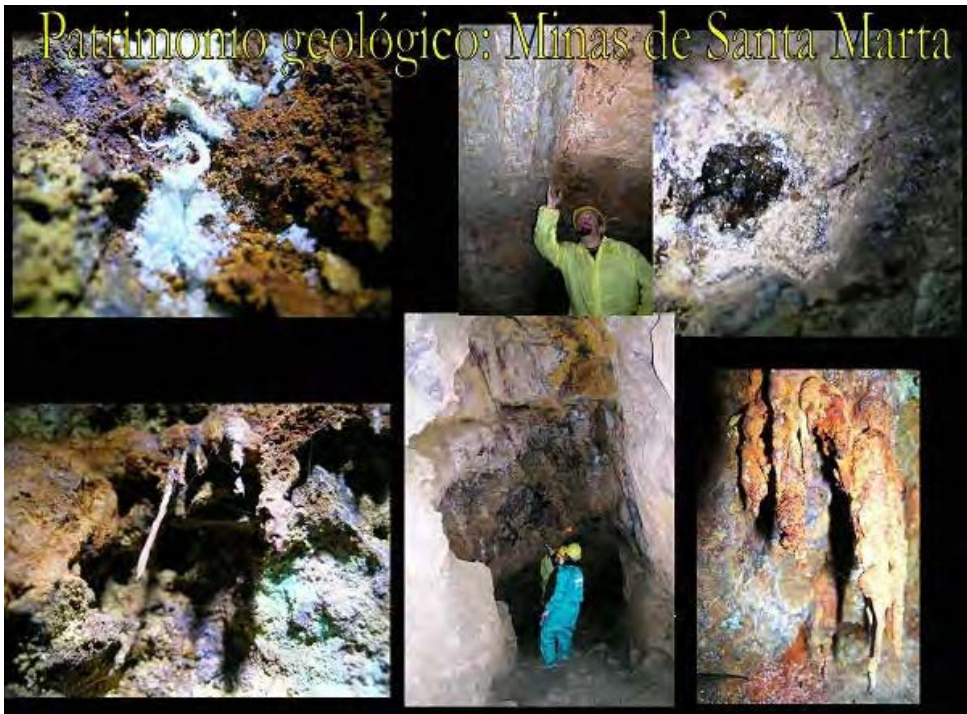


Figura 4. Patrimonio geológico en el interior de las minas de Santa Marta.



Figura 5. Castillete del Pozo Constante. Minas de Santa Marta.

monio industrial los hornos de sulfuros que son mampostería, se conservan así mismo numerosos lavaderos, almacenes y escombreras donde se pueden localizar aún singulares ejemplares del patrimonio mineralógico de Santa Marta.

Otros valores

Además de las minas e instalaciones mineras destaca en el espacio protegido el poblado minero de Los Llanos, es un conjunto de 24 edificaciones, 8 de ellas en estado ruinoso siendo el resto recuperables. En buen estado de conservación se encuentra la Casa del Facultativo de Minas, la cantina, las oficinas de la mina, la cuadra de mulas o el sótano-almacén. Se conservan así mismo hasta 6 calles con las aceras primitivas, y algunas de las casas aún tienen las cocinas de leña, hornos, pozos y retretes.

A todo este espacio, hay que unir el MUGEMISA, Museo Geológico y Minero de Santa Marta, que alberga la colección pública geológica y minera más importante de Extremadura, donde a la misma vez que se pueden ver minerales, rocas y fósiles de todo el mundo se puede aprender geología a través de talleres como: paleontología, mineralogía, vulcanología y bateo de oro y

plata. Así mismo, hay que añadir que este entorno se enclava dentro de una Zona de Especial Protección para las Aves, y en las inmediaciones de la mina se puede observar una avifauna representativa de las llanuras cerealista y pseudoesteparias con presencia de avutardas, sisones, aguiluchos cenizos, etc.

Minas de Burguillos del Cerro, lugar de interés científico

Geológicamente, la mina Monchi se ubica en la Zona de Ossa-Morena, más en concreto se localiza dentro del Dominio Norte de la Antiforma Olivenza – Monesterio. Dentro de este dominio el yacimiento se localiza asociado a la Formación Carbonatada Cámbrica de la Sierra del Cordel, que está afectada por la intrusión ígnea del batolito de Burguillos del Cerro, (Fernández y Rebo-llada, 2005).

El yacimiento minero es de tipo Skarn que a consecuencia del metasomatismo de fluidos ricos en boro y tierras raras ha originado una paragénesis mineralógica singular con la presencia de minerales como vonsenita, allanita o axinita. Las minas de Burguillos del Cerro albergan una serie de elementos y figuras de interés geológico, patrimonial minero y natural, por las que han merecido su declaración como lugar de interés científico de Extremadura, y que a continuación se resumen.

Mina Monchi

La mina Monchi es la mina de hierro más grande Extremadura, tiene hasta 10 plantas y se llegó a explotar hasta los 340 m de profundidad. Se van a acondicionar cuatro galerías del Nivel 0, en total unos 500 m longitudinales. A lo largo de los 500 m se pueden observar numerosos elementos de interés geológico como pueden ser: mineralizaciones de skarn, espejos de falla, espeleotemas (estalactitas, banderas y coladas), geodas, xelonitos, etc. En lo que respecta al patrimonio minero, destaca la presencia del castillete de interior, railería, cuadro de mandos de las jaulas mineras, tuberías de desagüe, vagonetas mineras, cámaras de explotación, coladeros, cueles mineros, e incluso utensilios manuales, cascós, vestimenta de mineros, etc.

Mina Aurora

La mina Aurora cuenta con unas 4 plantas aunque tan sólo se acondicionará la primera. Se trata de una galería principal con otras dos perpendiculares, que se abre a través de una bocamina parcialmente inundada. La mala accesibilidad, por el lago interior de la entrada, ha permitido una buena preservación de la mina Aurora. A lo largo de los 400 m de recorrido de la Mina Aurora se pueden observar numerosos elementos de interés geológico como pueden ser manantiales de aguas ferruginosas, filones de magnetita, geodas con cristales de siderita, cristales de calcita con hábito “diente de perro”, superficies de falla, espeleotemas (estalactitas, velos y coladas), etc. En lo que respecta al patrimonio minero, destacan los más de 400 metros de galerías de fácil habilitación para la visita: cámaras de explotación, coladeros, cueles mineros, utensilios manuales, vestimenta de mineros, etc.

Nueva Aurora

La mina Nueva Aurora cuenta con unas 3 plantas que se han explotado hasta mediados de los años 70 del siglo XX. Aunque tan sólo sería visitable la primera planta, se trata de una galería principal con otras tres perpendiculares, que se abre a través de una bocamina, parcialmente soterrada, por el desprendimiento de parte de la entrada de la bocamina. La mala accesibilidad ha permitido una buena preservación de la mina Nueva Aurora. A lo largo de los 450 m de recorrido de la Mina Nueva Aurora se pueden observar numerosos elementos de interés geológico como pueden ser filones de magnetita de cuatro metros de potencia, cristales de ferroactinolitas, superficie de decenas de metros recubiertas de cristales de yeso de neoformación, superficies de falla, espeleotemas (estalactitas, velos y coladas), etc. En lo que respecta al patrimonio minero destaca las cámaras de explotación, coladeros, cueles mineros, barrenas, arcos de sostenimiento, etc.

Elementos patrimoniales culturales asociados

Junto a la bocamina de Monchi aún se pueden contemplar los raíles dirigidos a las diferentes tolvas existentes. El mineral era conducido ya por vagonetas de volquetes hasta dos tolvas con dos pequeños molinos que machaban el mineral hasta un tamaño apto para la venta, de estas



Figura 6. Patrimonio geológico. Minas de Burguillos del Cerro.



Figura 7. Castillete en el interior de la Mina Monchi. Minas de Burguillo del Cerro.

tolvas caían en una “piscina” de acumulación y posteriormente era transportado por cintas a otras dos tolvas donde cargaban los camiones el mineral. Destacar así mismo la importancia del castillete minero de exterior situado en la Sierra del Cordel, justo encima del Pozo Maestro de la Mina Monchi. Este castillete es el más moderno de la mina, es un castillete de hierro de unos 12 m de altura, en buen estado de conservación.

Además de las tres minas mencionadas en la Sierra del Cordel, se pueden localizar hasta 6 registros mineros abandonados y una corta minera de hundimiento, en esta corta se observa una superficie de falla de unos 100 m², desde el ámbito mineralógico destacan los cristales octaédricos de magnetita de más de dos centímetros de arista, o espectaculares cristales de granates melanitos. Desde el punto de vista botánico, en la corta se ha observado especies protegidas de orquídeas, además es refugio de una pareja de búhos reales, otros animales protegidos que se han observado en este entorno son: lagarto ocelado, culebra de escalera, o la oropéndola. Por último mencionar la existencia de un conjunto de viviendas junto a la entrada a la Mina Consuelo, entre las que destaca la ermita de Santa Bárbara.

Ruta geomínera entre las minas de Burguillos del Cerro y Santa Marta

Entre las minas de Santa Marta y Burguillos del Cerro hay una distancia de 50 km que transcurre por los términos municipales de Zafra, Alconera y Feria, además de las localidades de origen y

destino de esta ruta. Además del interés turístico cultural y rural que tienen las cinco poblaciones, existen varios espacios en estos 50 km que albergan elementos y formaciones geológicas de interés.

Ruta de los jaspes

Entre los municipios de Santa Marta y Zafra, en la carretera N-432, a la altura del pk 54,800, en el término municipal de Feria parte un camino en dirección nordeste, que va paralelo en algunos tramos con el Arroyo de la Albuera. En los depósitos fluviales depositados en las márgenes de dicho arroyo se observan numerosos cantos y bloques de jaspes y hematites, que presentan una amplia gama de colores y texturas, y tienen la suficiente calidad ornamental para poder ser tallados, jaspes verdes, leopardos y los clásicos rojos aparecen entremezclados con cantos de oligistos micáceos provenientes de la erosión de una formación metavulcanítica del Cámbrico inferior que aflora a unos 6 km al oeste de este espacio.

Si continuamos la misma carretera a la altura del pk 56,100 en unas tierras de labor se localizan unas bolas de color gris oscuro, se trata de nódulos de sílex, en cuyo núcleo se encuentra tapizado por multitud de cristales cúbicos de pirita. A unos dos kilómetros al noroeste de estas tierras de labor, aflora un yacimiento paleontológico con presencia de braquiópodos, trilobites, bivalvos, gasterópodos, corales rugosos y más restos fósiles del Cámbrico inferior.



Figura 8. Jaspe rojo en bruto y pulido de la Ruta de los Jaspes (Feria, Badajoz).

Yacimiento paleontológico de Alconera

Entre las localidades de Burguillos del Cerro y Zafra se encuentra el municipio de Alconera donde se han explotado, desde época romana, varias canteras de mármol del Cámbrico inferior. En las canteras ubicadas en el pk 14,200 de la carretera Ex101, enfrente de las instalaciones de la Cementera de Alconera, se observan abundantes organismos coloniales pertenecientes a los arqueociátidos, un grupo de poríferos con esqueleto laminar perforado y carentes de espículas, además de los restos de un antiguo arrecife coralino.

Otros valores

Además de las minas de Santa Marta y Burguillos del Cerro, y de los diferentes espacios con valores paleontológicos y petrológicos, existen otros espacios en el entorno que pueden resultar interesantes para el visitante, si quieren ampliar la visita. Un claro ejemplo de ello es la ZEPA Complejo Lagunar de La Albuera, que se encuentra a unos 12 km al noroeste de Santa Marta. Entre las localidades de Santa Marta y la Albuera se localiza uno de los escasos ejemplos de cuencas endorreicas de Extremadura, numerosas lagunas de variado tamaño que albergan una nutrida colonia de avifauna acuática (grullas, flamencos, espátulas, cigüeñas negras, grullas, ánade real, etc).

Conclusiones

El turismo geomínero y el subterráneo han tenido un auge significativo en esta última década y presentan un futuro muy prometedor. Es por ello, que se hace necesario la valorización del patrimonio geológico y minero de una serie de espacios que presentan singularidades patrimoniales dignas de ser protegidas, valorizadas y visitadas.

En este último año se han declarado como Lugar de Interés Científico de Extremadura dos espacios mineros separados por tan sólo 50 km, las minas de Santa Marta y las de Burguillos del Cerro, y lo han hecho por el rico patrimonio geológico y minero que albergan. Entre ambos espacios los visitantes podrán visitar casi 2 km de galerías subterráneas donde podrán observar una mineralogía singular, formaciones geomorfológicas y estructurales de interés o un rico patrimonio minero en buen estado de conservación, todo ello dentro un marco natural marcado por la dehesa y una rica fauna y flora.

El objetivo perseguido, es que los visitantes no sólo acudan a ambos espacios, sino que se haga una ruta con varias paradas para poder disfrutar de un patrimonio geológico, natural y cultural diferente y atractivo.

Por último, mencionar que las obras en las diferentes minas para valorizarlas y poder visitarlas están actualmente en fase de proyecto y a lo largo del año 2018, se acondicionarán las minas Monchi de Burguillos del Cerro y Garandina de las Minas de Santa Marta. Se trata de obras sencillas ya que las minas seleccionadas para su acondicionamiento están en buen estado de conservación y no tienen excesivos problemas geotécnicos, son tramos secos y no requieren de

labores complejas de sostenimientos o de instalaciones de paso para que sean visitables. El resto de minas que tienen prevista su acondicionamiento: Nueva Aurora en Burguillos del Cerro y Constante en Santa Marta, están en fase de proyecto y valoración, si bien no se prevé que la inversión económica a realizar para abrir estas tres minas sea muy elevada, por lo que es un proyecto viable a corto plazo. Cada una de las cuatro minas tiene singularidades y valores patrimoniales diferentes y la visita a las cuatro lejos de ser repetitiva resulta complementaria, pudiendo en un futuro no muy lejano poder visitar más de 2 km de galerías mineras donde se podrá contemplar un patrimonio geominero singular, diferente y fascinante.

Referencias

- Fernández Amo, F.J. y Rebollada Casado, E. 2005. Mina "Monchi". *Libro de Patrimonio Geológico de Extremadura*. Junta de Extremadura, Mérida, 245-255.
- Fernández Amo, F.J, Carvajal Gómez D.J., Rebollada Casado E. y Merino Márquez, R. 2006. Aprovechamiento social del grupo minero Monchi (Burguillos del Cerro, Badajoz). *IV Seminario sobre recursos geológicos, ambiente e ordenamento do territorio*. Vila Real (Portugal).
- Fernández Amo, F.J. 2009. *Proyecto de Puesta en Valor del Patrimonio Geominero de Santa Marta*. (Junta de Extremadura).
- Garrido Mareca, J. 1923. Nota sobre algunas formas cristalinas de vanadinita de Santa Marta. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*. 56-6.
- Gonzalez del Tanago, Soledad Fernández Santín, Ángel Laiglesia, Jordi Rius 2003. Calderonita, un nuevo vanadato de hierro y plomo perteneciente al grupo de la Brackebuschita. *American Mineralogist*. 1703-1706.
- Palacios Medrano, T. 2005. *Yacimientos paleontológicos de Alconera*. Libro de Patrimonio Geológico de Extremadura. Junta de Extremadura, Mérida. 205-213.

M.P. Dorado Martínez, et al., 2018. Los museos geomineros asociados a cavidades en Extremadura (España). En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 153-160.

Los museos geomineros asociados a cavidades en Extremadura (España)

M.P. Dorado Martínez⁽¹⁾, F.J. Fernández Amo⁽²⁾ y R. Pagés Rodríguez⁽³⁾

(1) Minas de Logrosán, Ayuntamiento de Logrosán, Logrosán, Cáceres (España) museo.logrosan@hotmail.com

(2) TECMINSA, S.L. Santa Marta de los Barros, Badajoz (España) francis@tecmineras.com

(3) Dirección General de Turismo, Junta de Extremadura, Mérida, Badajoz (España) rafaelpages@cuevasturisticas.es

RESUMEN

La recuperación y acondicionamiento de minas y cuevas naturales para visitas turísticas en Extremadura en la última década está generando una red de museos geológicos y mineros asociados a estas cavidades. Pionero en este ámbito es el Museo Geominero de Santa Marta de los Barros (MUGEMISA), en la provincia de Badajoz, que alberga seguramente la colección de rocas, minerales y fósiles más completa de Extremadura. Aunque las galerías de las Minas de Santa Marta todavía no están accesibles al público, se está recuperando el antiguo poblado minero de Los Llanos en el que probablemente se situará el museo en un futuro próximo. De la gran colección del MUGEMISA han partido donaciones que han generado el resto de los museos en las cavidades turísticas extremeñas. La primera aportó la base para el Museo de Logrosán convertido en el actual Museo Geológico y Minero Vicente Sos Baynat y ubicado en el complejo minero turístico de la Mina Costanaza. Otras donaciones similares han dado lugar a la creación de los museos de Fuentes de León y Burguillos del Cerro en la provincia de Badajoz. El primero como complemento al complejo kárstico turístico ya activo y el segundo como aliciente a la puesta en valor y apertura al público de la Mina Monchi. La función de estos espacios museísticos es principalmente didáctica como apoyo a la interpretación del patrimonio geológico y minero. Integran petrología, mineralogía, paleontología y minería con ejemplares de todo el mundo para explicar los procesos desde lo general a lo local. Pero son además un atractivo estético. Para este fin destacan las salas negras en las que se exponen cientos de ejemplares fluorescentes que admiran al público al convertirse en un inesperado espectáculo de luz y color que aporta valor a la visita turística.

Palabras Clave: cuevas, Extremadura, minas, museos, turismo.

Geomining museums associated to cavities in Extremadura (Spain)

ABSTRACT

The recovery and conditioning of mines and natural caves for tourist visits in Extremadura in the last decade is generating a network of geological and mining museums associated with these cavities. Pioneer in this area is the Geological and Mining Museum of Santa Marta de los Barros (MUGEMISA), in the province of Badajoz, which probably shelter the most complete collection of rocks, minerals and fossils of Extremadura. Although the galleries in Santa Marta Mines are still not accessible to the public, the old mining town of Los Llanos is being recovered, and the museum will probably be located there in the near future. From the large collection of MUGEMISA, split donations which generated the rest of the museums in Extremadura tourist caves. The first provided the basis for the Museum of Logrosán that has become the current Vicente Sos Baynat Geological and Mining Museum and is located in the tourist mining complex of the Costanaza Mine. Other similar donations have led to the creation of the museums of Fuentes de León and Burguillos del Cerro in the province of Badajoz. The first as a complement to the tourist karst complex already active and the second as an incentive to the enhancement and openness to the public of the Monchi Mine. The function of these museum spaces is mainly didactic as support for the interpretation of geological and mining heritage. They integrate petrology, mineralogy, paleontology and mining with specimens from all over the world to explain processes from the general to the local. But

they are also an aesthetic attraction. For this purpose are specially the black rooms in which hundreds of fluorescent specimens are exhibited and admire the public becoming an unexpected spectacle of light and color that adds value to the tourist visit.

Keywords: caves, Extremadura, mines, museums, tourism.

Introducción

En 1982 la colección recogida y sistematizada por D. Vicente Sos Baynat a lo largo de cuarenta años de estudio, se convirtió en el Museo de Geología de Mérida (Sos, 2013). Fué el primer museo geológico de la región y el único hasta 2002 en que se inaugura el museo del granito en Quintana de la Serena (Badajoz). En la provincia de Cáceres no ha habido hasta ahora ningún museo específico dedicado a la geología, sólo las colecciones de Ciencias Naturales de algunos centros educativos incluían muestras mineralógicas, petrológicas o paleontológicas; ninguno se ha dedicado tampoco a la minería (González y Baratas, 2013). Sin embargo, en la última década, la recuperación para usos turísticos de cuevas naturales y espacios mineros en Extremadura está generando una red de museos geológicos y mineros asociados a estas cavidades.

El museo geomínero de las Minas de Santa Marta

El museo de Santa Marta de los Barros, en la provincia de Badajoz (figura 1), se inaugura en el año 2001, en este año el geólogo local, Francisco J. Fernández Amo, dona al pueblo de Santa Marta 4.000 ejemplares de minerales, rocas, fósiles y utensilios mineros. En el año 2010 se traslada a las dependencias del museo etnográfico, ocupando cuatro salas, el museo se pasó a denominar "José María Fernández Amo". Hoy en día, el MUGEMISA se ha convertido en la primera colección geológica y minera de Extremadura. Las distintas colecciones se exponen en distintas áreas:

- Mineralogía: los fondos del museo ascienden a unos 4.000 minerales, destacan la colección de vanadinitas y calderonitas de Santa Marta, topacios y aguamarinas del Valle de la Serena, casiteritas de Logrosán, piratas y magnetitas de Burguillos del Cerro y Jerez de los Caballeros. De España destacan las piratas de Navajún, los yesos de Fuentes de Ebro, cerusitas, celestinas, cuarzos, etc. Del resto del mundo destacan xilópalos, turmalinas, ceolitas, apofilitas, etc. Muchos de los minerales de la colección son excepcionales por su rareza y calidad y otros simplemente vistosos por la belleza de sus formas y colores. En el año 2011 se solicitó la cesión en custodia de parte de la colección de Sos Baynat al ayuntamiento de Mérida, el cual accedió y en la actualidad se muestran cincuenta de los mejores ejemplares de casiteritas, cuarzos, oro, fosforitas y wolframitas en una vitrina dedicada al ilustre geólogo.
- Paleontología: la Consejería de Cultura y Turismo de la Junta de Extremadura cedió en el año 2011 en custodia de la colección de fósiles vegetales del Bosque Petrificado de Extremadura, excepcional colección por su importancia paleontológica, se trata de numerosos restos vegetales correspondientes a un depósito en fondo pantanoso de ejemplares de calamites, sigillaria, lepidodentron, etc, esta colección es una ventana abierta al Carbonífero de Extremadura. También la Universidad de Extremadura ha cedido muestras de fósiles de la re-

gión. Además de estas colecciones, en la sección paleontológica del MUGEMISA se muestran fósiles y espacios expositivos acerca de la historia de la tierra.

- Sala Negra / Luz Pétrea: se trata de una sala de unos 25 m², en la que se exponen más de 500 minerales fluorescentes; esta sala es la más visitada y uno de los grandes atractivos del museo, debido al impacto visual por la enorme variedad cromática de estos minerales y sobre todo por lo llamativo de sus colores, esta sala fue creada en el año 2011 y ampliada en diciembre de 2017.
- Minería: se ha recreado una sección de mina, con su vagoneta y utensilios minero incluidos. Destacan la colección de lampistería y cascos mineros, así como un bastón de facultativo alemán de principios de siglo.
- Talleres/Aulas divulgativas: es uno de los principales atractivos del museo, en las instalaciones anexas al museo se organizan diversos talleres entre los que destacan el bateo de concentrados minerales, mineralogía, paleontología, vulcanología, magnetismo y recientemente un taller de pintura pétrea donde los visitantes pueden fabricar sus propios pigmentos a partir de diversos minerales y rocas.

Las visitas al museo son conjuntas con las visitas a las instalaciones y poblado minero de Santa Marta. Durante este año 2018 se realizaron las obras de acondicionamiento para visita el interior de la Mina Garandina, una de las cinco minas del conjunto minero de Santa Marta, declarado recientemente Lugar de Interés Científico de Extremadura.

El museo geominero Vicente Sos Baynat

Es el único museo geológico y minero de la provincia de Cáceres y se encuentra situado en Logrosán dentro del Complejo Minero de La Costanaza. El origen fue un pequeño museo en el



Figura 1. Museo geominero de Santa Marta de los Barros (Badajoz).

centro de la población donde se expuso una pequeña colección de minerales, rocas y fósiles que Técnicas Mineras de Santa Marta llevó a la Feria de la Mujer que entonces se celebraba en la localidad y que fue después donada por la empresa al ayuntamiento. Al mismo tiempo, comenzó el proyecto de rehabilitación de la Mina Costanaza.

En 2012 la mina se abrió al público y en 2014 la colección, significativamente aumentada principalmente por donaciones, se trasladó al complejo minero ubicándose en un antiguo almacén de herramientas rehabilitado junto al Centro de Interpretación de la mina. Ese año se inauguró el museo que se ha dedicado a la figura del profesor Vicente Sos Baynat (figura 2).

La exposición tiene un recorrido circular que comienza por una vitrina biográfica sobre Sos Baynat en la que se encuentran ejemplares, algunos autografiados, de la obra del profesor sobre la geología y mineralogía de Logrosán y Extremadura así como la publicación de los hallazgos arqueológicos de D. Vicente que hoy conforman la colección Sos Baynat de arqueología que alberga el Museo Nacional de Arte Romano de Mérida al que él mismo la confió. El resto del museo está dedicado a la paleontología, petrología y mineralogía, con especial atención a la geología del Geoparque y de la localidad de Logrosán, así como a la minería local.

Actualmente, los fondos cuentan con unos dos mil ejemplares de minerales, rocas y fósiles entre los que se cuenta la colección de Miguel Ángel de San José, de la que se pretende editar un catálogo específico y que actualmente no se encuentra en exposición. Otras doscientas piezas más, entre las relativas a la minería de Logrosán y el material de laboratorio, además de mapas, planos y documentación de las minas de Logrosán, completan la colección. Sólo unas ochocientas piezas se encuentran expuestas al público en la actualidad.

Parte de estos fondos se exponen en otros centros de la localidad. Algunas piezas recrean el que fue laboratorio de las minas convertido en la actualidad en centro de interpretación del fosfato dentro del complejo minero. Otras se expondrán pronto en el centro de interpretación del Cerro de San Cristóbal, situado a los pies del mismo, y que se pretende sea el punto de partida para



Figura 2. Museo geológico y minero Vicente Sos Baynat, Logrosán (Cáceres).

las rutas turísticas a este lugar de interés geológico. En él ilustrarán los paneles de geología del stock granítico, arqueominería y minería contemporánea del estaño. Otra parte de los fondos se exponen en una cámara subterránea situada en la antigua trinchera minera decimonónica como fluorescencias.

Museo geológico de Fuentes de León

Este proyecto surge de la donación de la empresa TECMINSA, S.L. al pueblo de Fuentes de León y pretende ser un complemento a las visitas al complejo kárstico de Fuentes de León (Badajoz). Se trata de dos exposiciones: una ubicada en el centro de recepción de las cuevas donde se exponen unas 900 muestras de minerales, rocas y fósiles, entre las que destaca un exposición sobre formaciones kársticas.

En el exterior, complementando el recorrido entre las cuevas visitables, se expone un museo de rocas y minerales de gran tamaño al aire libre. Esta segunda exposición denominada "El Jardín de las Rocas" se compone de más de 100 rocas de gran tamaño procedentes fundamentalmente de Extremadura (figura 3).

Museo geológico de Burguillos del Cerro

Situado en el casco antiguo de la localidad de Burguillos del Cerro (Badajoz) dentro de la antigua Casa del Corregidor, este museo (figura 4) cuenta con una exposición de más de ochocientos



Figura 3. Jardín de rocas. Museo geológico de Fuentes de León (Badajoz).



Figura 4. Museo geológico de Burguillos del Cerro (Badajoz).

ejemplares de minerales, rocas y fósiles de todo el mundo. Además, dado su importante pasado minero, con decenas de explotaciones de hierro en su término municipal, conserva y expone un gran número de planos de las minas, extensa documentación, herramientas y sobre todo los restos del antiguo laboratorio de la Mina Monchi.

A lo largo de 2018 se efectuarán las obras de acondicionamiento de la mina Monchi para su visita turística y este museo es un reclamo y punto de partida a la interpretación y posterior visita a las minas.

Función didáctica de los museos asociados a cavidades

La principal función de estos espacios museísticos es la didáctica como apoyo a la interpretación del patrimonio geológico y minero (Rebollada *et al.*, 2016). Ayudan a la comprensión del entorno desde lo general a lo local. Entender la diferencia entre rocas y minerales es esencial para valorar las diferentes explotaciones mineras y las formaciones kársticas. Para la mayoría del público son útiles las visitas guiadas en las que se explican los procesos geológicos ilustrándolos mediante los ejemplares expuestos en las vitrinas y la panelería. Para el público infantil se desarrollan además talleres de identificación de rocas y minerales, catalogación de réplicas de fósiles, bateo de oro, elaboración de réplicas de minerales y fósiles en yeso o recreaciones de excavaciones paleontológicas que fomentan la afición y suponen un mayor contacto con los objetos a través de la manipulación y la observación directa.

Todos los museos cuentan con muestras de meteoritos, minerales nativos, sulfuros, óxidos, sales, silicatos, rocas ígneas cristalinas y volcánicas, sedimentarias, metamórficas, rocas y minerales industriales de Extremadura y por supuesto ejemplares relativos a las cavidades a las que están asociados y a las localidades en las que se ubican. Cuentan también con vitrinas didácticas en las que se muestran los sistemas y hábitos cristalinos, el color, la raya, el brillo, la escala de dureza, características ópticas, magnetismo, luminiscencia. Algunos, como el MUGEMISA, exponen una



Figura 5. Una de las baldas de la vitrina de usos de los minerales. MUGEMISA, Santa Marta de los Barros (Badajoz).

vitrina dedicada a los usos de los minerales (figura 5) en la que se muestran algunos ejemplares y su utilización cotidiana (polvos de talco y talco mineral, filamentos de bombilla y wolframita, etc).

Función estética de los museos

Dado que estos museo se encuentran asociados a cavidades destinadas a las actividad turística es importante también la función estética. A los visitantes les gusta encontrar exposiciones en las que son elementos primordiales la belleza y los elementos sorprendentes. En este aspecto, es importante que los ejemplares, al menos muchos de ellos, sean minerales bien cristalizados,



Figura 6. Sala Negra. Mina Costanaza, Logrosán (Cáceres).

realzar el color y el brillo mediante una buena iluminación y contar con piezas sorprendentes como ópalo melanito, okenita, rosa del desierto, lavas cordadas, petróleo crudo, dientes de tiburón o amonites piritizados.

Sin embargo, las exposiciones que más éxito están teniendo en este sentido son las de fluorescencias. Tanto el MUGEMISA de Santa Marta como el Sos Baynat de Logrosán cuentan con salas en las que este tipo de ejemplares se exponen en salas negras con luz ultravioleta.

Más de quinientos ejemplares en una sala del MUGEMISA y cerca de doscientos en el antiguo polvorín subterráneo situado en la trinchera de la Mina Costanaza de Logrosán (figura 6) deleitan al público con un espectáculo de luz y color natural. Emisiones de luz violeta de fluorita, blanca de calcita espática, roja de corindón, verde de autunita o amarilla de wernerita son algunas de las maravillas que se pueden admirar en estas salas oscuras.

Referencias

- González Bueno, A. y Baratas Díaz, A. 2013. *Museos y Colecciones de Historia Natural. Investigación, educación y difusión*. Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Segunda época, Tomo XI.
- Rebollada Casado, E., Dorado Martínez, M. P., Piñas Encinar, F., Fernández Amo, F. J. y Subirán Reyes, J. 2016. El Museo Geológico-Minero Vicente Sos Baynat en la Mina Costanaza de Logrosán: nuevo recurso educativo del Geoparque Villuercas Ibores Jara. *Actas IX Congreso Internacional sobre Minería y Metalurgia Históricas en el SW Europeo. Nuestras raíces mineras*. Madrid. 477-486.
- Sos Paradinas, A. 2013. *Biografía del Profesor Dr. D. Vicente Sos Baynat*. Universitat Jaume I de Castellón. Publicaciones de la Diputación de Castellón. Castellón de la Plana. 218-223.

P. Orche Amaré, et al., 2018. Las minas de agua de Carmona (Sevilla): un valioso recurso patrimonial oculto en la campiña sevillana. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 161-178.

Las minas de agua de Carmona (Sevilla): un valioso recurso patrimonial oculto en la campiña sevillana

P. Orche Amaré^(1, 2, 3), J. Millán Naranjo⁽³⁾ y J.M. Román Rodríguez^(3, 4)

(1) Servicio de Minas. Dirección General de Industria, Energía y Minas. Junta de Andalucía. C/ Albert Einstein, 4 - 3ª planta. 41092 Isla de la Cartuja - Sevilla (España)
mariap.orche@juntadeandalucia.es

(2) Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero (SEDPGYM). Dpto. Energía y Combustibles, despacho 416. E.T.S. Ingenieros de Minas y Energía. Universidad Politécnica de Madrid. C/ Ríos Rosas, 21. 28003 Madrid (España)

(3) Asociación Andaluza de Exploraciones Subterráneas (AAES). Glorieta de Pío XII, 4. Utrera (Sevilla, España)
jominara@telefonica.net

(4) Servicio de Arqueología. Ayuntamiento de Carmona. C/ San Ildefonso, 1 (Casa Palacio Marqués de las Torres). 41410 Carmona (Sevilla, España)
juanmarroman@hotmail.com

RESUMEN

Gracias a los trabajos efectuados por espeleólogos pertenecientes a la Asociación Andaluza de Exploraciones Subterráneas (AAES) en el subsuelo de Carmona (Sevilla), ha sido posible el descubrimiento de diferentes minas de agua, excavadas en calcarenita y formadas por kilómetros de galerías. Su estado de conservación, en la mayoría de los casos, es excepcional, lo que atiende a su ubicación extramuros. Como consecuencia de la estratégica ubicación de Carmona, encaramada en un cerro que forma parte de Los Alcores y domina una fértil vega que se extiende por la Campiña, ha sido un territorio codiciado por las distintas civilizaciones que se han asentado en Andalucía, y, por consiguiente, se han encontrado vestigios de una ocupación prácticamente continua desde la Prehistoria hasta la actualidad. El período histórico que ha dejado una impronta más valiosa ha sido la época romana. A día de hoy, Carmona cuenta con diversos yacimientos arqueológicos abiertos al público, como la necrópolis o el anfiteatro, que son visitados anualmente por miles de turistas. Sin embargo, en general, las minas de agua, también romanas, eran prácticamente desconocidas hasta fechas recientes. Miembros de la AAES llevan desde hace tiempo explorando estas minas de agua, empleando las técnicas utilizadas en espeleología. Su labor divulgativa, en las redes sociales y en la propia población de Carmona, ha permitido acercar a sus habitantes una parte oculta de su patrimonio y consiguió llamar la atención de la Administración local, de tal manera que en agosto de 2016 ambas entidades suscribieron un convenio de colaboración, con la finalidad de explorar, catalogar y poner en valor las minas de agua existentes en el subsuelo de la localidad. La participación del Servicio de Arqueología del Ayuntamiento de la ciudad está proporcionando la dimensión arqueológica de los hallazgos, permitiendo ponerlos en relación con el resto del patrimonio carmonense.

Palabras clave: calcarenita, época romana, mina de agua, patrimonio subterráneo, puesta en valor.

The water mines of Carmona (Seville): a valuable heritage resource hidden in the Sevillian countryside

ABSTRACT

Due to works carried out by cavers from the Andalusian Association of Underground Explorations (AAES) in the subsoil of Carmona (Seville), it has been possible to discover different water mines, excavated in calcarenite and formed by kilometers of galleries. Its state of conservation, in most cases, is exceptional, which can be explained thanks to its location outside the walls of the city. As a result of the strategic situation of Carmona, perched on a hill that is part of Los Alcores

and dominates a fertile plain that spreads across the Campiña, it has been a coveted territory for the different civilizations that have settled in Andalusia, and, consequently, vestiges of an almost continuous occupation since Prehistory to the present have been found. The historical period that has left a more valuable mark has been the Roman era. To date, Carmona has several archaeological sites open to the public, such as the necropolis or the amphitheater, which are visited annually by thousands of tourists. However, in general, water mines, also Roman, were virtually unknown until recently. Members of AAES have been exploring these water mine for some time, using the techniques used in speleology. His informative work in social networks and in the population of Carmona, has allowed to bring their inhabitants a hidden part of their heritage and managed to draw the attention of local government, so that in August 2016 both entities signed an agreement of collaboration, in order to explore, catalog and enhance the existing water mines in the subsoil of the town. The participation of the Archeology Service of the City Council is providing the archaeological dimension of the findings, allowing them to be related to the rest of the historical heritage of Carmona.

Keywords: calcarenite, enhancement, roman era, underground heritage, water mine.

Introducción

El agua siempre ha constituido un preciado bien para cualquier población y actividad humana. En este sentido, la ciudad de Carmona no iba a ser una excepción, máxime teniendo en cuenta que ocupa un promontorio en mitad de la campiña sevillana. El azaroso pasado carmonense, así como su privilegiada posición estratégica, le han permitido atesorar un valioso patrimonio histórico, que anualmente recibe miles de visitantes. Una mina de agua es una galería drenante, que es un tipo de captación y canalización de agua subterránea consiste en “un túnel realizado por debajo de la superficie terrestre con el objetivo de captar y extraer el agua de las capas freáticas, para que fluya al exterior por la acción de la gravedad” (Antequera et al., 2014), para fines de abastecimiento urbano, industrial o agrícola. Estas galerías están excavadas con técnicas similares a las utilizadas en minería.

Aunque algunas minas de agua ya eran conocidas, las exploraciones llevadas a cabo en los últimos años por la AAES en el subsuelo del municipio carmonés, han revelado la existencia de una red kilométrica de abastecimiento hidráulico a base de minas de agua horadadas sobre los materiales rocosos sobre los que asienta.

Cada día aumenta el auge por visitar elementos culturales mezclados con una cierta dosis de aventura. En este sentido, adentrarse en el siempre misterioso subsuelo, con la intención de conocer un vestigio arqueológico como es una mina de agua que mantiene todavía las marcas de los picos que excavaron sus galerías o las oquedades en que sus constructores colocaban las lámparas con que alumbraban, resulta de lo más sugerente para una ciudad, como Carmona, que fundamenta su oferta turística en la exhibición de su rico e interesante patrimonio histórico.

Situación geográfica

Carmona es una ciudad de la provincia de Sevilla, que pertenece a la Comunidad Autónoma de Andalucía. Su superficie está comprendida dentro de la hoja 985 “Carmona” del Mapa Topográfico Nacional de España a escala 1:50.000, editado por el Instituto Geográfico Nacional (IGM), así como en la hoja 985-1-1 del Mapa Topográfico de Andalucía a escala 1:10.000, publicado por el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía.

Carmona está situada al Este de la capital andaluza y muy próxima a ésta. La distancia entre Carmona y Sevilla es de 28 km, y entre Carmona y Córdoba, de 95 km, estando estas tres poblaciones comunicadas por la autovía A-4. Curiosamente, el tramo que une estas tres antiguas ciudades andaluzas, que también lo fueron en época romana, bajo los nombres de *Hispalis*, *Carmo* y *Corduba*, es prácticamente coincidente con el de la Vía Augusta, la calzada romana más larga de Hispania, con una longitud aproximada de 1.500 km, que iba desde los Pirineos hasta Cádiz, bordeando el Mediterráneo.

Atendiendo a criterios paisajísticos, muy influenciados por su naturaleza geológica, se considera que Carmona, junto con los términos municipales, también sevillanos, de El Viso del Alcor, Mairena del Alcor y Alcalá de Guadaíra, conforman "Los Alcores". Se trata de una elevación en forma de meseta inclinada de poca altura que destaca en medio de la Depresión del Guadalquivir, y debe su denominación al vocablo de procedencia árabe "alcor", que significa "colina" o "collado".

Contexto geológico

Carmona se encuentra enmarcada en plena Depresión del Guadalquivir. Dicha depresión se sitúa entre la Meseta, al Norte, y las Cordilleras Béticas, en su margen más meridional. La Depresión del Guadalquivir inició su formación en el Mioceno, a causa de un surco marino profundo que acabó convirtiéndose en una fosa, que se rellenó de importantes cantidades de materiales. En el Cuaternario se vio afectada por una fase erosiva generada por el sistema fluvial que controla el río Guadalquivir. Desde el punto de vista estructural, la zona se caracteriza por la disposición horizontal o subhorizontal de los sedimentos. Una formación de calcarenitas, areniscas y limos arcillosos (nivel permeable), que se extiende desde Carmona hasta Alcalá de Guadaíra, descansa encima de otra formación de margas azules y grises con calcarenitas (nivel impermeable). Sobre estos materiales afloran las terrazas del Guadalquivir dispuestas escalonadamente desde las calcarenitas y hacia el cauce actual. La potencia del paquete permeable es variable: mientras que en las inmediaciones de Carmona sobrepasa los 30 m de espesor, en Alcalá de Guadaíra es muy superior a los 60 m (IGME, 1988).

En el ámbito hidrogeológico, es preciso mencionar la masa de agua subterránea Sevilla-Carmona (MAS 05.47), que está ubicada, en su totalidad, dentro de la provincia sevillana (figura 1 y 2). Se extiende desde el municipio de Carmona, al Norte, hasta los de Utrera y Los Palacios y Villafranca, al Sur. Sus límites geográficos son: al Noroeste, el río Guadalquivir; al Noreste, el aluvial del río Corbones; y al Suroeste, el río Guadaíra lo divide en dos sectores morfológicamente diferentes: el primero, y más importante, está formado por las calcarenitas de Carmona, fácilmente identificable por el característico escarpe topográfico de Los Alcores, mientras que el segundo, de facies más arenosa, alcanza una mayor extensión lateral, formando una extensa llanura en la que se asientan las poblaciones de Dos Hermanas, Utrera y Los Palacios y Villafranca, encontrándose en el entorno de estas dos últimas su límite suroeste. El área que comprende los materiales aflorantes correspondientes al acuífero, con los límites descritos, es del orden de 1.380 km². Sin embargo, los materiales que revisten un mayor interés desde el punto de vista hidrogeológico son las calcarenitas de Carmona, resultando que la superficie permeable de las mismas es de aproximadamente 150 km². No obstante, considerando el conjunto de la formación con

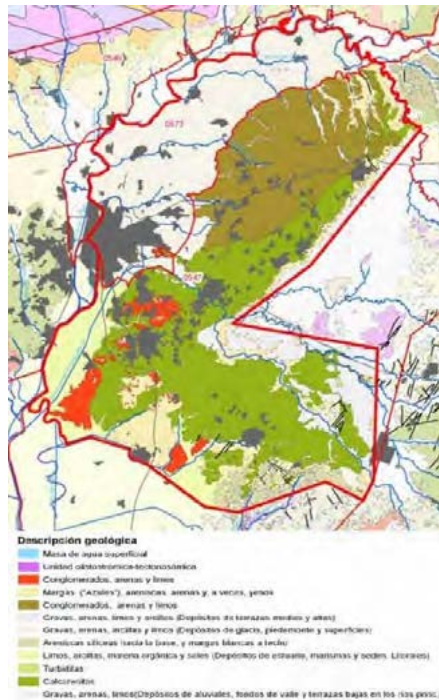


Figura 1. Esquema geológico de la MAS 05.47. Sevilla-Carmona (CHG).

sus cambios de facies (calcarenitas de Alcalá de Guadaíra, de Dos Hermanas y arenas y arcillas de Utrera), el total de la superficie de afloramiento está en torno a 530 km². En conjunto, constituyen un acuífero permeable por porosidad y fisuración que funciona en régimen libre. El drenaje subterráneo se realiza parcialmente desde las calcarenitas de Carmona hacia el río Guadaíra, aunque la mayoría del mismo se produce hacia las terrazas del río Guadalquivir y, en última instancia, a dicho río. El acuífero se recarga fundamentalmente con agua de lluvia (IGME, 1988; IGME y DS, 2003).

Contexto histórico y antecedentes de abastecimiento hidráulico en Carmona

Las primeras evidencias de ocupación antrópica en el área de Carmona se remontan al Paleolítico, hace, al menos, medio millón de años. Aunque por las características de estas poblaciones no existan estratigrafías arqueológicas de esta cronología en el territorio carmonense, son numerosos los yacimientos paleolíticos identificados en el término por la presencia, a nivel superficial, de grandes cantidades de útiles fabricados de piedra, así como de restos de su talla. Casi todos los yacimientos paleolíticos registrados en el área de Carmona se localizan sobre las terrazas del Guadalquivir, al Norte del municipio y próximos a los cursos fluviales, donde se concentrarían los recursos y se garantizaría el suministro de agua (Caro, 2006).

Igualmente, en el término de Carmona se han identificado algunos yacimientos arqueológicos

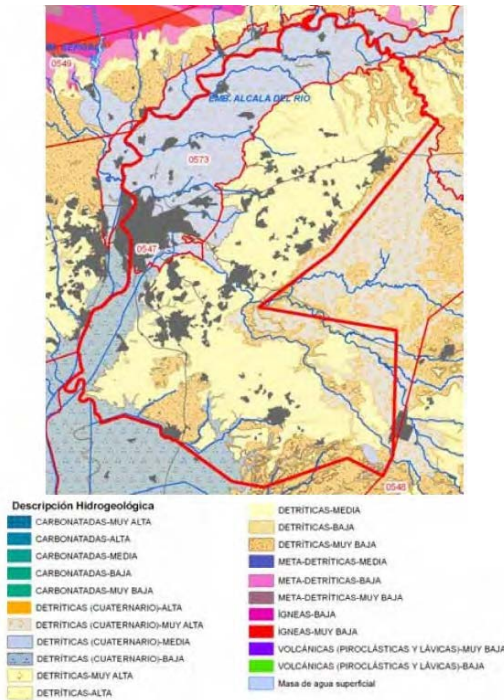


Figura 2. Esquema hidrogeológico de la MAS 05.47. Sevilla-Carmona (CHG).

correspondientes al Neolítico (Galera *et al.*, 2009: 78), situados en las proximidades de los cursos fluviales y en terrenos idóneos para la agricultura.

A principios del III milenio a. C. comienza el Calcolítico o Edad del Cobre, período bien representado en la comarca de Los Alcores, en donde el número de asentamientos se dispara y, por primera vez, se ocupa de manera estable la meseta escarpada y de contorno irregular sobre la que se asienta la actual ciudad de Carmona. El enclave se localiza en el punto más oriental y elevado de la cornisa alcoreña, dominando tanto las terrazas fluviales como la vega de Carmona, territorios de gran valor agrícola. Además de la fertilidad de la comarca y de las ventajas para el control y la defensa derivados de su ubicación, la presencia de agua en el subsuelo y su ubicación estratégica, en un nudo de comunicaciones existente desde la Antigüedad, provocan que desde época calcolítica hasta la actualidad el sitio haya estado ocupado casi sin interrupción.

Al comenzar la Edad del Bronce, durante el II milenio a. C., las condiciones climáticas empeoraron, lo que, sin duda, influyó en un descenso demográfico. En la ciudad son numerosas las intervenciones arqueológicas en las que se han registrado niveles de esta etapa, aunque sus características apuntan a que fue un poblamiento de menor intensidad, pero más extendido por toda la meseta carmonense. En distintas excavaciones realizadas se documentaron parcialmente estrechas zanjadas abiertas sobre la roca, excavadas en el sentido de la pendiente natural, por lo que podrían constituir las estructuras con funcionalidad hidráulica más antiguas exhumadas hasta el momento en la ciudad (Román, 2002; 2003; 2008).

A principios del I milenio a. C., se inicia la Edad del Hierro, que, en esta zona, está dividida en dos etapas, la primera vinculada a la cultura tartésica y la segunda a la cultura turdetana. La llegada progresiva de colonos orientales, sobre todo fenicios, supone una profunda transformación en el mundo indígena de finales del Bronce que derivó en lo que hoy se conoce como “cultura tartésica”, reflejo de la fusión de ambas culturas. Por primera vez, se detecta en el registro arqueológico de Carmona un sector edificado con estructura urbana bajo el actual barrio de San Blas, que será el germen de la ciudad actual (Belén et al., 1997). Tras el colapso del mundo tartésico, a mediados del siglo VI a. C., comienza la etapa turdetana, caracterizada en Carmona por un crecimiento hacia el Sur del núcleo urbano, lo que parece ser indicio de un aumento demográfico. En la calle San Teodomiro, se registró parcialmente una canalización, bien construida y asociada a una potente edificación turdetana, que podría corresponder al más antiguo sistema de alcantarillado documentado en la ciudad, si bien no es posible determinar si de uso público o privado (Román y Vázquez, 2003).

En el año 206 a. C., las tropas romanas, tras su victoria sobre el ejército cartaginés en Iliipa, ubicada hoy día en el municipio sevillano de Alcalá del Río, ocuparán el territorio de Carmona. La conquista llevará consigo la mayor transformación registrada en la ciudad y, posiblemente, su momento de mayor esplendor. Durante los dos primeros siglos de ocupación, coincidiendo con la etapa republicana, *Carmo* jugará un papel fundamental en el contexto de los conflictos bélicos entre romanos e indígenas y, posteriormente, en las guerras civiles entre romanos. Su situación estratégica en el valle del Guadalquivir y su carácter casi inexpugnable convertirá la ciudad en una de las principales bases militares del mediodía peninsular, lo que aparece reflejado en distintos textos latinos, uno de los cuales fue escrito por el mismísimo Julio César. Sin embargo, del registro arqueológico se desprende que el núcleo urbano apenas experimentó crecimiento, e incluso pudo decrecer durante los siglos II y I a. C., y que las técnicas constructivas y los materiales asociadas a la población tampoco registraron apenas cambios. Será con el cambio de era, a partir de época de Augusto, cuando la ciudad y su territorio experimenten una profunda metamorfosis, resultando las huellas de esa romanización evidentes incluso en nuestros días. Así, se registrará una explosión demográfica que propiciará la expansión del núcleo urbano, triplicando su extensión, siguiendo un modelo ortogonal hacia el sur y el este, ocupando por primera vez toda la superficie de la meseta (Lineros y Román, 2012). En este contexto se acometerán, además, los mayores proyectos de construcciones públicas y monumentales de la ciudad, para dotar a *Carmo* de todas las edificaciones que debía tener una ciudad romana de importancia, como templos, necrópolis (figura 3), teatro, anfiteatro (figura 4), circo, hórreo o termas.

Uno de los campos en el que se experimentará un mayor desarrollo en la ciudad, será el hidráulico. Las inversiones en infraestructuras públicas o el empleo de nuevas técnicas y materiales harán posible que, por ejemplo, *Carmo* disponga de una red de alcantarillado (Lineros y Román, 2011) que, tras su abandono hacia el siglo III d. C., no volvería a ser reemplazado por completo hasta el siglo XX. Son numerosas las estructuras hidráulicas que han sido documentadas en las excavaciones, principalmente cloacas, atarjeas o cisternas, aunque también se han encontrado fuentes, pilones, piscinas, pozos o grandes depósitos. Con respecto a los sistemas de suministro de agua, se han documentado un elevado número de cisternas, que en la mayor parte de los casos abastecerían edificaciones domésticas (Lineros y Román, 2011; Conlin, 2001). En las excavaciones también se han registrado varios pozos de planta rectangular, pero en casi todos los casos se encontraban colmatados por capas de sedimentos o vertidos, por lo que no pudieron



Figura 3. Necrópolis de Carmona fechada en torno al siglo I a. C. (Nueva Acrópolis Granada).



Figura 4. Anfiteatro de Carmona datado en el siglo I a. C. (Televisión Carmona).

vaciarse por completo. De hecho, cabe la posibilidad de que algunos de estos pozos correspondan realmente a lumbreras de minas de agua.

Resultados de la exploración del subsuelo de Carmona gracias al convenio de colaboración entre el Ayuntamiento de Carmona y la AAES

En 1984, la transferencia de las competencias en materia de patrimonio del Estado a la Junta de Andalucía (Presidencia del Gobierno, 1984), propició que al año siguiente comenzase en Carmona un modelo de arqueología urbana gestionado desde el Ayuntamiento y que sigue en vigor en la actualidad (Belén y Lineros, 2001). El equipo municipal de arqueología desarrolló un sistema metodológico pionero y ha realizado numerosas intervenciones en la ciudad desde entonces, lo que ha repercutido en el gran volumen de información existente sobre la dinámica histórica del yacimiento. Esta información ha servido de base para el establecimiento de las cautelas arqueo-

lógicas asignadas a todos los inmuebles de la ciudad y reflejadas en el Plan Especial de Protección del Patrimonio Histórico de Carmona (Galera et al., 2009).

Por su parte, la AAES es una entidad sin ánimo de lucro, cuyos fines son promover y apoyar la exploración subterránea y su divulgación en Andalucía, para lo cual emprenderán las medidas:

- Colaborar con organismos, instituciones y universidades en la investigación, divulgación y conocimiento del medio subterráneo.
- Organizar y promocionar jornadas divulgación mediante charlas y proyecciones audiovisuales del medio subterráneo.
- Apoyar y subvencionar con todos los medios económicos que se consigan a los grupos espeleológicos que realicen exploraciones subterráneas.

En agosto 2016 el Ayuntamiento de Carmona, por medio de su Servicio de Arqueología municipal, y la AAES firmaron un convenio de colaboración, dirigido a formar un equipo multidisciplinar para la exploración y estudio de las minas de agua de la localidad. El equipo formado a raíz de ese convenio está compuesto por varios espeleólogos, un geólogo, un ambientólogo y un arqueólogo. Entre los trabajos que ya se han realizado, cabe destacar los que siguen: exploración, datación, topografía (figura 5), desobstrucción, fotografía, buceo, vídeo, charlas divulgativas y visitas guiadas.

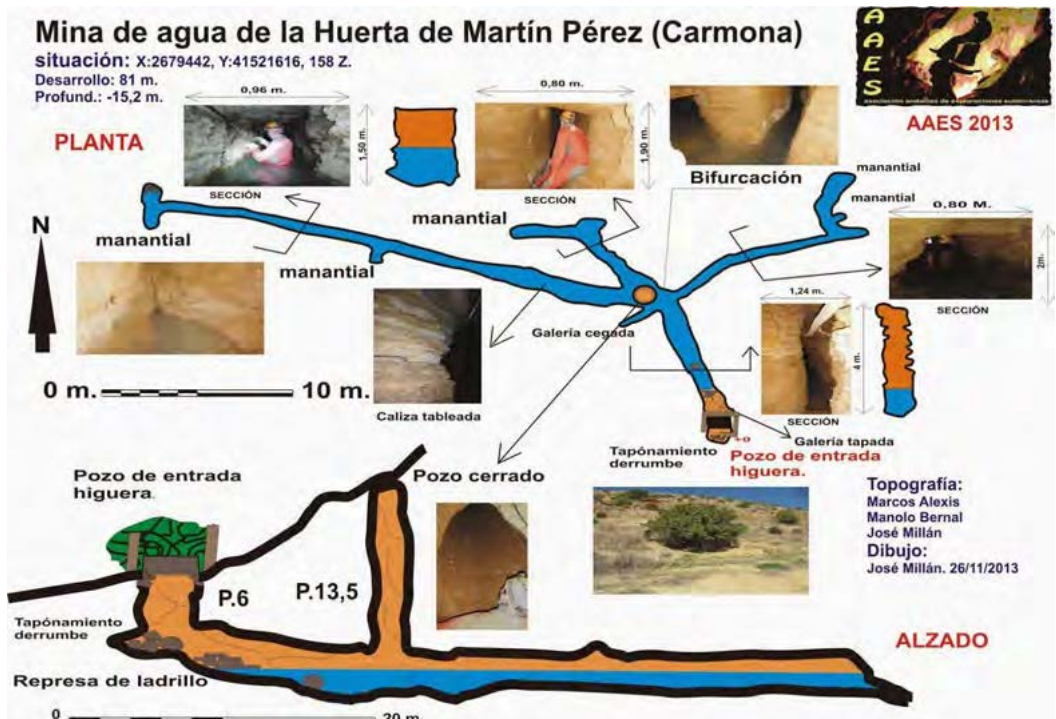


Figura 5. Topografía de la mina de agua de la Huerta de Martín Pérez (AAES).

Minas de agua catalogadas en Carmona

En la tradición oral de los habitantes de Carmona, especialmente entre los más mayores, siempre han estado presentes los relatos sobre la existencia de túneles y conducciones subterráneas, que han llegado casi a convertirse en un mito popular. Aunque sobre algunos de estos espacios hipogeos existían referencias escritas, noticias orales, e incluso se habían planteado hipótesis sobre sus cronologías, trazados y finalidad, hasta la fecha no se habían realizado exploraciones y estudios sistemáticos que dieran a conocer el verdadero alcance de este patrimonio casi desconocido. Los resultados preliminares de los mismos han superado con creces las expectativas iniciales, poniéndose de manifiesto la existencia de una impresionante red de galerías y pozos en el subsuelo carmonense, destinada a la captación y canalización de las aguas subterráneas. De esta obra de ingeniería hidráulica se han identificado, hasta el momento, un total de catorce minas de agua, repartidas tanto por el ámbito urbano como por el rural, de las que se han podido investigar con mayor detalle las que se exponen a continuación (figura 6).



Figura 6. Situación de las principales minas de agua exploradas en Carmona (elaboración propia a partir de Google Earth).

Mina de agua del Pozo del Molino de Viento

Se trata de una pequeña galería de captación situada en la base de un gran pozo-noria reexcavado sobre un pozo romano situado en las afueras de Carmona. Los numerosos restos aparecidos en la zona parecen indicar que debió dar servicio a una gran villa de naturaleza rural. Su interés

radica en la constatación del uso privado en época romana de simples pozos de agua equipados con pequeñas galerías captadoras de agua.

Mina de agua del Cortijo de Trigueros

Se ubica en las proximidades de la ciudad y está relacionada con un potente asentamiento rural romano e islámico, así como con un sistema de canales y cisternas desaparecidas a día de hoy. Afortunadamente, se dispone de una topografía completa realizada en el año 1986, ya que actualmente se encuentra parcialmente destruida. Es una mina de unos 200 m de longitud y una estructura ramificada, conforme a la que varias galerías que aportan el agua de diferentes manantiales convergen en la galería principal, que funciona como colector.

Mina de la Huerta de Martín Pérez

Constituye una interesante mina de unos 100 m de longitud (figura 5). Está excavada en un afloramiento de caliza tableada, lo que le confiere una morfología singular. Se encuentra relacionada con un importante asentamiento romano de época Alto imperial y medieval. Se localiza a las afueras de la ciudad de Carmona, al Noroeste, junto a la Vía Augusta. Esta situación, junto a la principal vía de comunicaciones, la convierte en un punto de agua estratégico; de hecho el pozo principal de la mina aparece protegido por estructuras defensivas. Se distribuye en varias galerías de corto desarrollo, alimentadas por pequeños manantiales, que se unen en una galería colectora (Millán, 2013-2014).

Mina de agua del Puerto de Brenes o de la Fábrica de Anís

Fue construida justo a la entrada Noroeste de la ciudad de Carmona. Está asociada a un potente asentamiento romano Alto imperial donde existieron grandes termas, curtidurías y puede que incluso molinos hidráulicos. Se desconoce su longitud total, ya que actualmente se encuentra taponada y sólo se han podido explorar 388 m, si bien las últimas investigaciones apuntan a que sus galerías puedan adentrarse varios kilómetros en el casco urbano de Carmona. Tiene la peculiaridad de estar excavada en dos niveles que recogen las aguas de dos manantiales a diferentes cotas que convergen en un pozo-colector. En épocas recientes ha sido el soporte hidráulico de molinos harineros situados en el mismo puerto, el principal de ellos convertido actualmente en una destilería (Millán, 2015).

Mina de agua de Alcaudete

Se localiza entre las poblaciones de El Viso del Alcor y Carmona. Se trata de una infraestructura excepcional por mor de sus extraordinarias dimensiones y del buen estado de conservación que presenta: posee varias galerías laterales que en total suman un desarrollo de más de 5 km, apreciándose claramente diferentes fases constructivas a lo largo del tiempo, destinadas a aumentar los caudales de agua. Se asocia a un gran complejo molinero construido en el siglo XVII, pero cuyos orígenes podrían remontarse a la construcción de la propia mina, probablemente el siglo I de nuestra era. No se ha podido demostrar, hasta la fecha, que forme parte del sistema de abastecimiento de una ciudad, como sería de esperar a la vista de una obra de estas dimensiones.

Mina de agua del Alcázar del Rey Don Pedro o de la Puerta de Córdoba

Nace 30 m por debajo del alcázar, que actualmente aloja el Parador Nacional de Carmona, discurriendo desde ese punto hasta la Puerta de Córdoba, abasteciendo así a una de las puertas principales de la *Carmona* romana. En la Edad Media fue utilizada y modificada para dar servicio a la fortaleza. Está compuesta por una galería principal, a la que se suma, al menos, una galería lateral de captación. No se ha podido reconocer por completo, a causa de obstrucciones por derrumbes, pero se calcula que tenía un desarrollo no inferior a los 600 m (Millán, 2018).

Mina de agua de San Antón

Es muy conocida popularmente, puesto que ha formado parte importante del abastecimiento de Carmona desde época romana hasta casi nuestros días. Discurre bajo el casco urbano de Carmona, desde la plaza de la Alameda de Alfonso XIII, donde nacen sus aguas y estuvo antiguamente la fuente pública, hasta la barriada de Los Pintores, situada en las afueras de la población. Está conformada por una galería principal de más de 1 km y varias galerías laterales de captación de agua. Su longitud original debía de superar los 2 km, estando parcialmente taponada en la actualidad. Sus galerías son muy espectaculares en algunos tramos, debido a la existencia de bellas formaciones calcáreas (figura 7) (Millán, 2017).



Figura 7. Galería de la mina de agua de San Antón con formaciones típicas de las cuevas naturales (Millán, 2018).

Características generales de las minas de agua investigadas en Carmona

La investigación de diversas minas de agua en un territorio acotado, como es el término municipal de Carmona, ha permitido definir una serie de características comunes a todas ellas. La técnica de excavación de estos entramados de galerías es excepcionalmente precisa y apenas experi-

menta variaciones de una mina a otra, lo que invita a interpretar que todas ellas estén construidas durante un mismo período histórico. A tenor de las evidencias morfológicas y arqueológicas, lo más probable es que las minas de agua se construyeran durante el período de ocupación romana, hace unos 2.200 años. En este sentido, resulta del máximo interés mencionar que recientemente, durante la excavación arqueológica realizada en la Plaza de Julián Besteiro, bajo la dirección de uno de los autores del presente trabajo, se han descubierto dos lumbreras de una mina que abastecía el edificio termal encontrado en superficie. Este hallazgo es de gran relevancia, ya que por primera vez puede asociarse una mina a una estratigrafía arqueológica, lo que permite datar con precisión la infraestructura (de época de Augusto) o conocer la función de la mina (suministro de agua a las termas).

A continuación, se describen de manera sucinta las principales características puestas de manifiesto en las exploraciones subterráneas (Millán, 2016).

Herramientas. No se ha encontrado ningún útil de los muchos utilizados por los mineros romanos en las diversas tareas que debían realizar para avanzar en la excavación de labores subterráneas, tales como picos, mazas, piquetas, punterolas, cuñas, picos-martillos, etc. Sin embargo, sí que han quedado las marcas dejadas por las herramientas de arranque en las paredes de las galerías, que aportan una valiosa información sobre el utensilio empleado, así como sobre el sentido de avance de la excavación (figura 8).



Figura 8. Marcas de herramienta de arranque en un hastial de la mina de agua del Puerto de Brenes (Orche, 2015).

Labores verticales. Las lumbreras o *spiramina* son pozos verticales utilizados para proceder a la construcción de las galerías, tanto para acceder al subsuelo, como para realizar el desescombro; y como registro y para favorecer la ventilación, una vez excavada la galería (Traianvs). Normal-

mente, tienen sección rectangular, variando sus dimensiones de 1,30-1,50 m (excepcionalmente, 2 m) de largo a 0,90-1 m de ancho, aunque en algunas ocasiones también pueden ser de planta circular. El brocal del pozo generalmente se haya revestido, para fortificar el tramo arcilloso que existe sobre la calcarenita, pues son materiales más blandos que ésta. Su espesor puede llegar a ser considerable, superando los 3 m. Si este nivel de arcillas es estrecho, el revestimiento se hacía con piedras irregulares procedentes de la excavación y amontonadas en hileras sin ningún tipo de argamasa, mientras que, si es ancho, se realizaba con piedras labradas y perfectamente encajadas, e incluso con ladrillos. Hasta ahora no se ha observado el uso de mortero en ningún caso.

La caña de las lumbreras está equipada con mechinales en el lado corto, en los que se irían colocando travesaños de madera, al objeto de poder desplazarse por el pozo. Su profundidad varía como consecuencia de las pendientes del terreno, al objeto de que el suelo de la galería fuera prácticamente horizontal, de modo que se ha apreciado una variación de 30 m en las proximidades de los manantiales de cabecera a 3 m en las zonas próximas a la salida.

Labores horizontales. Se han observado diferentes metodologías constructivas: algunas minas (preferentemente las situadas en entornos rurales) parecen construidas partiendo de un manantial que se iba minando desde la surgencia hasta el nacimiento; otras son largas galerías excavadas a modo de acueducto, manteniendo un rumbo constante y, por lo general, perpendicular al sentido de circulación preferente de los veneros de agua que, de esta manera, se iban captando, al ser interceptados bien por la galería principal, bien por galerías secundarias que parten con rumbos perpendiculares a dicha galería principal; y otras, normalmente secundarias, han seguido galerías naturales o "protoconductos", dando lugar a un trazado muy irregular con frecuentes quiebros, reflejo del conducto preexistente. En cualquier caso, las minas se excavaban con el objetivo de alcanzar caudales de agua suficientes y constantes para la actividad a la que se destinaban. Por ello, cuanto mayores caudales se perseguían, mayor desarrollo habían de tener.

Independientemente de su sistema constructivo, todas las galerías tienen un denominador común: discurren con la mínima pendiente, que, conforme a las normas de ingeniería hidráulica romana y tal como dejó escrito Vitrubio, no debía ser superior a un cuarto de pulgada cada 100 pies, es decir, del 0,021%. La aplicación de estos valores de pendiente tan restringidos se justifica de cara a garantizar que el agua circulase por gravedad y sin apenas velocidad, a fin de minimizar el desgaste y el arrastre de lodos y arenas.

La galería principal de la mina solía ser excavada por dos equipos de mineros siguiendo un rumbo constante y picando en sentidos opuestos entre lumbreras contiguas, hasta que se produjera el cale, normalmente en un punto intermedio entre ambas. En los cales, o puntos de encuentro de los dos equipos de excavadores, se corregían los errores de rumbo y de profundidad, para corregirla para lograr la continuidad de la galería, por lo que pueden identificarse fácilmente, gracias a los quiebros o cambios de altura de la galería, aparte de por el hecho de que los lucernarios pasan a la pared contraria y las huellas de herramientas cambian de sentido. Algunas galerías, sin embargo, fueron excavadas en un único sentido, manifestándose los errores de rumbo en la conexión con la lumbrera siguiente. En estos casos, la profundidad se corregiría en la propia lumbrera, lo cual sería factible si las lumbreras se encontraran a la misma cota, es decir, situadas sobre un terreno llano. Normalmente, el lado largo de la lumbrera está perfectamente alineado con la galería, para poder seguir el rumbo de excavación más fácilmente. Cuando no ocurre así, es debido a cambios de rumbo.

El frente de excavación era ejecutado por un solo operario que abría la galería con una anchura estandarizada de entre 0,55 y 0,65 m (unos 2 pies romanos), aunque en casos excepcionales podía alcanzar 0,80 ó 0,90 m. La altura de la galería suele rondar entre 1,50 y 1,80 m, si bien puede llegar a duplicarse, condicionada por la nivelación del lecho de la galería, el seguimiento de protoconductos o la intersección de materiales blandos y poco estables.

Revestimiento de las labores horizontales. En ocasiones la mina de agua había de atravesar materiales blandos o grandes cavernamientos, que constituía un riesgo para la estabilidad de la galería y para quienes trabajaban y transitaban por ella. Para soslayar estos problemas, sus constructores efectuaron obras de revestimiento, encaminadas a reforzar e impermeabilizar las galerías. El refuerzo se realizaba mediante la colocación de muros de mampostería, ladrillo o *te-gula* (teja gruesa de forma plana, utilizada preferentemente en tejados, que contaba con sendos rebordes laterales, empleados para encajar los *imbrices*) (Traianvs), así como mediante la construcción de bóvedas de mampostería o ladrillo apoyadas sobre dichos muros. La impermeabilización se conseguía gracias a la utilización del *opus signinum* (tipo de mortero constituido por cal y ladrillo muy molido) (Traianvs) (figura 8). El uso de estas técnicas constructivas resulta fundamental para datar estas redes de captación de aguas subterráneas como romanas.

Iluminación. Se realizaba mediante pequeñas lamparillas conocidas como “lucernas” (figura 9), fabricadas de barro o hierro, alimentadas con aceite y colocadas en los denominados “lucerna-

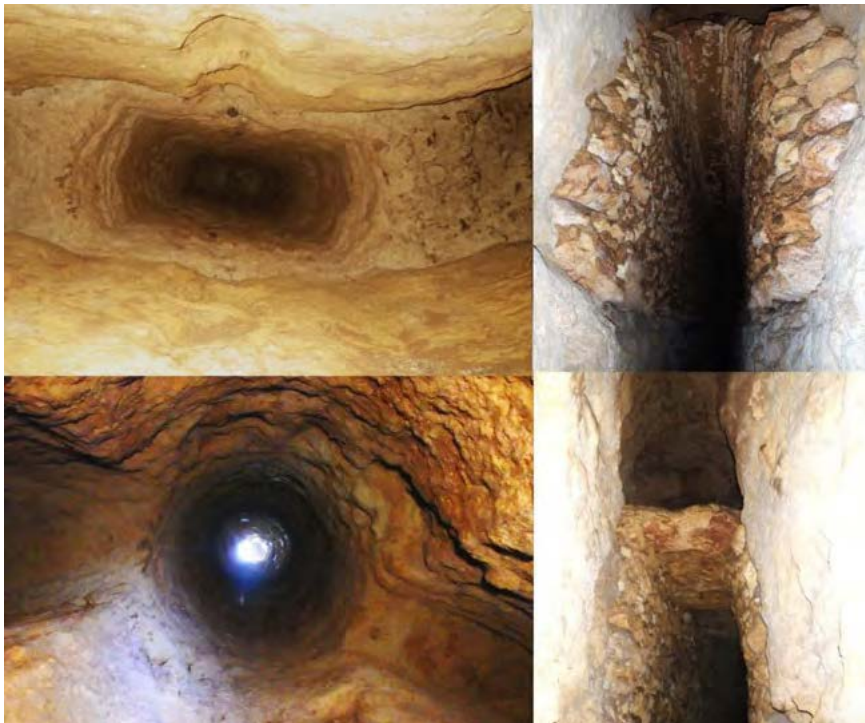


Figura 9. A la izquierda, lumbreras o spiramina. A la derecha, fortificación de labores (Millán, 2015-2017).

rios”, pequeñas oquedades excavadas en la pared a la altura de la cabeza (a entre 1,60 y 1,75 m del suelo), cuyas dimensiones dependían del tamaño de la lucerna que alojaban. A día de hoy, algunos lucernarios aún conservan las marcas de hollín de la llama.

Los lucernarios se distribuían a lo largo de las galerías, variando, por lo general, la distancia entre dos consecutivos entre 0,60 y 0,80 m, aunque circunstancialmente se podía ver reducida a apenas 0,10 m. Se ha constatado que la separación entre lucernarios es función del tamaño de los mismos y, por tanto, de la lamparita de aceite colocada en ellos.

Dado que el tamaño de la lucerna es el único parámetro que afecta a su duración, suponiendo que todos los operarios contaran con lucernas de la misma capacidad y atendiendo a textos clásicos, como los de Plinio el Viejo, quien señalaba que “el tiempo que la lamparilla de aceite tardaba en agotarse equivalía a la jornada de trabajo de los mineros romanos”, se podría establecer el número de peonadas invertidas en la construcción de una galería. La afirmación de Plinio ha podido ser corroborada en el transcurso de las investigaciones, pues se ha constatado que en los tramos en que la roca es más dura, los lucernarios están más juntos de lo habitual, lo que concordaría con un avance más lento.

En todas las minas exploradas se han hallado unas hornacinas o huecos excavados a aproximadamente 1 m sobre el lecho de la galería, habitualmente en el lado derecho según el sentido de excavación y separadas entre 8 y 12 m, así como en la base de las lumbreras. Su función pudiera haber sido albergar vasijas llenas de aceite con las que recargar las lucernas.

Puesta en valor de las minas de agua carmonenses

Carmona es uno de los destinos turísticos más importantes de la provincia de Sevilla, como consecuencia de los valores patrimoniales que reúne, pues cuenta con numerosos edificios históricos, un casco antiguo bien conservado y excelentes vistas a los paisajes en su entorno. Su oferta turística, que incluye desde visitas a distintas iglesias, el museo de la ciudad, el Conjunto Arqueológico, integrado por una necrópolis y un anfiteatro romanos, de los siglos I y II d. C., o las Puertas de Sevilla y Córdoba, hasta rutas rurales de distinto tipo por su término, como la de la Cueva de La Batida; y la disponibilidad de numerosos establecimientos hosteleros, como restaurantes u hoteles de distintas categorías. Por todo ello, Carmona recibe un importante número de turistas, tanto extranjeros como nacionales, durante todo el año, que generan una considerable cantidad de ingresos para la ciudad.

La ampliación de la oferta turística favorecería este sector, básico para la economía local. Un nuevo atractivo para los visitantes serían, sin duda, las minas de agua que se están investigando en todo el término municipal. En este sentido, conviene destacar la expectación que han despertado en la propia ciudad y la creciente demanda ciudadana para su visita que han generado las actuaciones divulgativas llevadas a cabo. Por una parte, los resultados de las exploraciones fueron dados a conocer en octubre del año pasado, en el marco del XX Aniversario de la Ruta Bético-Romana, por medio de una conferencia-audiovisual titulada “Las minas de agua romanas de Carmona”, realizada entre la AAES y el Servicio Arqueológico municipal. Y, por otra, se abrió al público una sala del Museo de la Ciudad, con una exposición de paneles explicativos, hallazgos y vídeos, que contó con una gran afluencia de público.

Sin embargo, aunque se trata de un producto muy atractivo, hay dos cuestiones que deben prevalecer ante todo: la conservación de las minas y la seguridad de los visitantes. Además de los valores históricos o arqueológicos, estas infraestructuras también presentan valores geológicos, biológicos e hidrogeológicos muy sensibles a posibles cambios o agresiones. Por otro lado, las minas no dejan de ser estructuras subterráneas antiguas que acarream diferentes dificultades: el acceso a estas minas, en la mayoría de los casos a través de pozos verticales, suele ser complicado y peligroso y han de usarse técnicas espeleológicas, que la mayoría de los posibles visitantes no dominan; los espacios son muy estrechos y confinados, lo que impediría el acceso a grupos numerosos y dificultaría cualquier operación de emergencia en caso de que hubiese cualquier incidencia; algunos de los sectores de las minas presentan paredes muy inestables y con riesgo de colapso; y el pie de las galerías se encuentra inundado y, al paso de las personas, el agua se va enturbiando hasta no poder ver dónde se pisa. A ello hay que añadir que se ha podido comprobar *in situ* que las minas de agua son estructuras delicadas que, al margen de irse degradando por su propia naturaleza, han sufrido agresiones causadas por diferentes obras y reformas que no han contado con el suficiente seguimiento y cuidado. Por tanto, previamente a la apertura de cualquier tramo de estas minas sería necesario la redacción de un proyecto, en el cual se valoren los riesgos tanto para los visitantes como para la conservación de las estructuras y se estudie en profundidad su viabilidad, pues, al margen de los problemas técnicos que puede conllevar la puesta en valor de una mina de agua, es preciso tener presente otra dificultad añadida, derivada de la ubicación de estas infraestructuras hidráulicas en terrenos de titularidad privada. Asimismo, dado que el acondicionamiento para fines turísticos de una mina de agua sería una obra novedosa en la Comunidad Autónoma de Andalucía, habría que realizar un estudio jurídico previo, para proceder diligentemente. La gestión de estas visitas debería realizarse desde el ámbito público, sin perjuicio de que luego pudieran otorgar la concesión de la explotación turística a empresas privadas.

El Ayuntamiento de Carmona prevé la posibilidad de crear un centro de interpretación dedicado en exclusiva a las minas de agua que recorren su subsuelo. Se ubicaría en la calle Joaquín Costa, punto en el que, precisamente, convergen hasta cuatro minas de agua, algunas de gran interés y recorrido. Asimismo, está valorando las posibilidades que ofrece cada mina, de cara a su acondicionamiento, con la intención de abrir al público alguna de ellas.

Conclusiones

Los sobresalientes resultados obtenidos hasta la fecha en relación con el conocimiento del ingente patrimonio hidráulico subterráneo de Carmona han puesto de manifiesto la importancia de que la iniciativa privada, encarnada por la AAES, y los poderes públicos, representados por el Ayuntamiento de Carmona por medio de su Servicio de Arqueología, sumen esfuerzos en pos de la preservación del patrimonio histórico. En este sentido, para proseguir con el desarrollo de los trabajos resulta fundamental que se mantenga la estrecha colaboración entre la AAES y el Ayuntamiento carmonés.

Cabe destacar que esta actividad refleja la vertiente científica de la espeleología y es totalmente consecuente con los fines estatutarios de la AAES.

A pesar de los éxitos cosechados, resulta de vital importancia continuar con los trabajos de exploración y catalogación de las minas de agua, a fin de que la Administración local, como garante

de la conservación del patrimonio histórico de su territorio, logre conocer de forma precisa la ubicación de las galerías bajo el trazado urbano y rural y el estado de conservación de estas infraestructuras hidráulicas, de modo que pueda articular herramientas para su protección y, en última instancia, plantear su puesta en valor, incrementando así la oferta turística de la ciudad.

Los hallazgos realizados han posibilitado adscribir el origen de las minas de agua a época romana, adelantando notablemente la cronología que investigaciones anteriores habían establecido. También han permitido la caracterización de las minas de agua de Carmona, aportando así valiosa información sobre su construcción, trazado y dimensiones.

La información recopilada, los planos trazados, las fotografías tomadas, los vídeos hechos y demás productos de las exploraciones deben ser puestos en valor, como de hecho ya ha ocurrido en las conferencias y exposiciones realizadas en Carmona, que han contado con un gran interés y afluencia de público. Toda esta documentación podría constituir la base y quedar depositada en un centro de interpretación dedicado a las minas de agua de la localidad alcoreña. También podría dar lugar a publicaciones.

Por último cabe destacar el interés de la ciudadanía carmonense por conocer su patrimonio oculto, lo cual supone un importante estímulo para que el patrimonio hidráulico subterráneo de su ciudad sea preservado y puesto en valor.

Agradecimientos

Este proyecto no habría sido posible sin la colaboración de las siguientes personas, a las que los autores desean dar las gracias sincera y encarecidamente:

- Por su contribución en los trabajos de exploración y topografía: Fran Algaba, Eugenio Belgrano, Manuel Bernal, Miki Bernal, Jan Christoph, Antonio González, Julio Guijarro, José Millán, Enrique Peña, Marcos Alexis Portillo, Francisco Zambrano, Antonio y Pino.
- Por su asesoramiento y análisis arqueológico: Mark Hunt Ortiz y Juanma Román.
- Por la autorización o gestión de los permisos para acceder a las minas: Felipe Blázquez, Gregorio Cabeza, José Antonio Domínguez, Ángel Escamilla, José Antonio Escamilla, Juan Galocha, Ana Gómez, Diego Madroñal, Eduardo Mencos, José Romero y Armando Rueda.
- Por su colaboración: Ayuntamiento de Carmona y miembros del SEPRONA de Carmona.

Referencias

- Antequera, M., Iranzo, E. y Hermosilla, J. 2014. Las galerías drenantes en España: cuantificación y clasificación tipológica de los sistemas horizontales de captación de aguas subterráneas. En: *Irrigation, Society, Landscape. Tribute to Thomas F. Glick*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Belén, M. et al., 1997. Arqueología en Carmona (Sevilla). Escavaciones en la Casa-Palacio del Marqués del Sotillo. Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía. 334.
- Belén, M. y Lineros, R. 2001. 15 años de Arqueología en Carmona. En: *Carmona Romana. Actas del II Congreso de Historia de Carmona*. Universidad de Sevilla y Delegación de Cultura del Excmo. Ayto. de Carmona.

- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG). *Demarcación hidrográfica del Guadalquivir. Primer ciclo de planificación 2009-2015. Plan Hidrológico del Guadalquivir 2009-2015. Plan Hidrológico aprobado por R. D. 255/2013. Anejo nº 2 - Inventario de Recursos. Apéndice IV - Recursos de las masas de agua subterráneas. Recursos de la M.A.S. 05.47 Sevilla-Carmona.*
- Caro, J. A. 2006. Yacimientos e industrias achelenses en las terrazas fluviales de la depresión del Bajo Guadalquivir. Secuencia estratigráfica, caracterización tecnocultural y cronología. En: *Carel, Carmona, Revista de Estudios Locales.*
- Conlin, E. 2001. El abastecimiento de agua en la Carmona romana. En: *Actas del II Congreso de Historia de Carmona. Carmona Romana, 203-217.*
- Conlin, E. y Jiménez, A. 2012. *Aproximación al mundo rural romano en el territorio de Carmo.* Romvula, 11, 27-57.
- Galera, V., Gayoso, A. y Jiménez, A. 2009. *Plan especial de protección del patrimonio histórico de Carmona.* Memoria. Introducción. Información y diagnóstico.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1988. *Mapa Geológico de España. E. 1:50.000. Hoja 985. Carmona. Memoria. 2ª serie - 1ª edición.* Madrid: Centro de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y Diputación de Sevilla (DS). 2003. *Atlas hidrogeológico de la provincia de Sevilla,* 119-124.
- Linerós, R. y Román, J. M. 2012. Sobre el origen y formación del urbanismo romano en la ciudad de Carmona. En: *Hispaniae Urbs. Investigaciones Arqueológicas en Ciudades Históricas.*
- Linerós, R. y Román, J. M. 2011. Carmo. En: Remolà, J. A. y Acero, J. (Coords.) *La gestión de los residuos urbanos en Hispania. Xavier Dupré Raventós (1956-2006). In Memoriam.* Instituto de Arqueología de Mérida. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 2011, 93-122.
- Matías, R. 2004. Ingeniería minera romana. En: *II Congreso de las Obras Públicas Romanas.* Tarragona: Fundación de la Ingeniería Técnica de Obras Públicas, 157-189.
- Millán, J. 2013-2014. La mina de agua de la Huerta de Martín Pérez (Carmona, Sevilla). *Gota a Gota*, n.º 3 (2013-2014), 52-57.
- Millán, J. 2015. La mina de agua del Puerto de Brenes o de la Fábrica de Anís (Carmona, Sevilla). *Gota a Gota*, n.º 7 (2015), 14-27.
- Millán, J. 2016. *La minería hidráulica romana en Los Alcores sevillanos.* En: *Actas EspeleoMeeting Ciudad de Villacarrillo.* Villacarrillo, 81-88.
- Millán, J. 2017. La mina de agua de San Antón (Carmona, Sevilla). *Gota a Gota*, n.º 14 (2017), 40-58.
- Millán, J. 2018. La mina de agua del Alcázar del Rey don Pedro (Carmona, Sevilla). *Gota a Gota*, n.º 15 (2018), 5-13.
- Peña, J. M. 2010. Sistemas romanos de abastecimiento de agua. En: *V Congreso de las Obras Públicas Romanas.* Córdoba: Fundación de la Ingeniería Técnica de Obras Públicas, 249-281.
- Presidencia del Gobierno. Real Decreto 864/1984, de 29 de febrero, sobre traspaso de funciones y servicios del Estado a la Comunidad Autónoma de Andalucía en materia de cultura. Publicado en: *Boletín Oficial del Estado (BOE)* n.º 113, de 11 de mayo de 1984, 12926-12971. España.
- Román, J. M. 2002. *Informe-memoria de la excavación arqueológica de urgencia en el solar n.º 6 de la Plazauela Romera, Carmona (Sevilla).* En: Delegación de Cultura de la Junta de Andalucía y en Museo de la Ciudad de Carmona.
- Román, J. M. 2003. *Informe-memoria de la excavación arqueológica de urgencia en el solar n.º 12 de la calle Pedro I, Carmona (Sevilla).* En: Delegación de Cultura de la Junta de Andalucía y en Museo de la Ciudad de Carmona.
- Román, J. M. 2008. *Prehistoria en el Picacho: excavación arqueológica preventiva en Ronda del Cenicero, Carmona (Sevilla).* En: *Anuario Arqueológico de Andalucía 2008.*
- Román, J. M. y Vázquez, J. 2003. *Estructuras prerromanas en el barrio de San Blas: I. A.U. en el solar n.º 51 de la calle San Teodomiro de Carmona (Sevilla).* En: *Anuario Arqueológico de Andalucía 2003.*
- Traianvs. Pequeño vocabulario de términos latinos usados en el trabajo [en línea]. Disponible en: <http://www.traianvs.net/italica/glosario.htm> ser un lujo de las clases privilegiadas.

P. Orche Amaré, et al., 2018. Visitas guiadas a la mina de hierro La Lima: una aproximación a la minería de El Pedroso (Sevilla) entre finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 179-196.

Visitas guiadas a la mina de hierro La Lima: una aproximación a la minería de El Pedroso (Sevilla) entre finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX

P. Orche Amaré^(1, 2, 3) y F. Cornello Mancha⁽⁴⁾

(1) Servicio de Minas. Dirección General de Industria, Energía y Minas. Junta de Andalucía.

C/ Albert Einstein, 4 - 3ª planta. 41092 Isla de la Cartuja - Sevilla (España). mariap.orche@juntadeandalucia.es

(2) Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero (SEDPGYM). Dpto. Energía y Combustibles, despacho 416. E.T.S. Ingenieros de Minas y Energía. Universidad Politécnica de Madrid. C/ Ríos Rosas, 21. 28003 Madrid (España)

(3) Asociación Andaluza de Exploraciones Subterráneas (AAES). Glorieta de Pío XII, 4. Utrera (Sevilla, España)

(4) Lima Aventura. C/ La Lima, s/n. 41360 El Pedroso (Sevilla, España). limaventura2@gmail.com

RESUMEN

Sierra Morena ha sido un territorio tradicionalmente minero. Sin embargo, en la Sierra Norte de la provincia de Sevilla el relato de este pasado vinculado a la actividad extractiva y metalúrgica ha sido olvidado por sistema, salvo considerables excepciones, como la constituida por la celeberrima mina de plata de Guadalcanal, habida cuenta de la riqueza de sus minerales, descubiertos en 1555. Sin llegar a alcanzar la notoriedad de esa explotación argentífera, en la serranía del Norte de la provincia sevillana existen otras minas de diferentes épocas y sustancias que ayudan a conformar esa historia minera, a la vez que suponen un valioso activo para acercar la minería, tanto a cielo abierto como subterránea, a la ciudadanía. Tal es el caso de la mina La Lima, en el término municipal de El Pedroso. Sus labores se encuentran dispersas por un cerro que tiene idéntica denominación, y que fue explotado principalmente entre las postrimerías del siglo XIX y los albores del siglo XX. En dicha colina se dispusieron distintas infraestructuras de transporte para llevar el mineral extraído hasta la estación de ferrocarril de El Pedroso, desde donde se expedía con destino al Puerto de Sevilla, para ser embarcado. Además del soberbio entorno natural serrano, que ha logrado camuflar algunos de los trabajos mineros, el aspecto más atractivo de la visita a la mina lo constituye el acceso a labores subterráneas. En el presente trabajo, se pretende dar a conocer la historia de la mina La Lima, así como aportar una visión desde la perspectiva de la puesta en valor del patrimonio geológico y minero existente en la propia explotación de la mina, al objeto de enriquecer la experiencia de los visitantes, y, por último, garantizar que el recorrido se efectúe con las máximas condiciones de seguridad.

Palabras clave: mina, patrimonio geológico y minero, puesta en valor, seguridad, visita guiada.

Guided visits to La Lima iron mine: an approach to mining in El Pedroso (Sevilla) between the end of the 19th century and the beginning of the 20th century

ABSTRACT

Sierra Morena has been a traditionally mining territory. However, in the Sierra Norte of the province of Seville the story of this past linked to extractive and metallurgical activity has been repeatedly forgotten, except for considerable exceptions, such as that constituted by the famous silver mine of Guadalcanal, due to the richness of its minerals, discovered in 1555. Without reaching the notoriety of this mining exploitation, in the Northern highlands of the province of Seville there are other mines from different eras and substances that help to shape this mining history, at the same time that they represent a valuable asset to bring both open-pit and underground mining closer to the public. Such is the case of La Lima mine, in the municipality of El Pedroso. Its workings are dispersed along a hill that has the same name, and that

was exploited mainly between the end of the 19th century and the dawn of the 20th century. In this hill, different transport infrastructures were arranged to take the extracted mineral to El Pedroso railway station, from where it was sent to the Port of Seville, to be shipped. In addition to the superb natural mountainous environment, which has managed to camouflage some mining workings, the most attractive aspect of the visit to the mine is to access to underground workings. In the present paper, it is intended to present the history of La Lima mine, as well as provide a vision from the perspective of the enhancement of the geological and mining heritage existing in the mine, in order to enrich the experience of the visitors, and, finally, to guarantee that the route is carried out with the maximum security conditions.

Keywords: *enhancement, geological and mining heritage, guided tour, mine, security.*

Introducción

Durante buena parte del siglo XIX y aproximadamente la mitad del siglo XX, el nombre de la población sevillana de El Pedroso estuvo estrechamente vinculado al beneficio del hierro. La actividad minero-siderúrgica en El Pedroso se caracterizó durante el siglo XIX por la existencia de una única empresa: la Compañía de Minas de El Pedroso y Agregados, que cambiaría en varias ocasiones de denominación, pero no de objeto. Se constituyó en 1817, cuando un grupo de comerciantes andaluces decidió emprender una aventura empresarial novedosa en tierras andaluzas: una iniciativa privada dedicada a la explotación de las menas ferríferas en el término municipal de El Pedroso, en la provincia de Sevilla, para abastecer una fábrica siderúrgica de su propiedad, emplazada en las inmediaciones de las minas. Tras su cierre y durante la última década del siglo XIX y las primeras del siglo XX, la única relación que la mencionada compañía minera tuvo con la minería y la siderurgia, fue para incrementar su nómina de concesiones mineras y arrendarlas, así como para arrendar igualmente la fábrica de la que era titular. En este sentido, la actividad de la referida empresa se enmarcaría perfectamente en la tendencia general de la minería desarrollada en El Pedroso en el siglo XX.

Al contrario de lo acontecido en el siglo XIX, en que la actividad minera en El Pedroso había tenido una única protagonista, que era titular de los derechos mineros y explotadora de las minas; en el siglo XX aparecerían una serie de actores dispuestos a explotar las menas ferríferas pedroesas. Se registró actividad en las minas de forma intermitente entre la referida última década del siglo XIX y el primer cuarto del siglo XX, si bien las últimas minas que estuvieron en operación lo hicieron aisladamente entre 1958 y 1969. La explotación de las minas de El Pedroso se verificó gracias a un binomio, en el que un término de la ecuación eran los nativos que ostentaban la titularidad de las concesiones mineras, mientras que el otro estaba representado por empresarios y empresas mineras forasteras que las arrendaban para explotar el mineral, aportando sus capitales y conocimiento, pero, como contrapartida, en general, se limitaban a cargar ese mineral arrancado en vagones de ferrocarril con destino al puerto de Sevilla, al objeto de expedirlo a los lugares de los que procedían, sin que se generase ningún valor añadido en el lugar de producción, a diferencia de como había ocurrido en el siglo XIX.

Una de las minas que fue objeto de esta explotación a comienzos del siglo XX fue la que se desarrolló en el cerro de La Lima, que tuvo una vida tan fugaz como intensa, tal y como revelan las labores mineras y los restos de infraestructuras que se pueden observar hoy en día repartidas por dicha colina.

Localización geográfica de El Pedroso y del cerro de La Lima

La villa de El Pedroso es una pequeña localidad perteneciente al municipio del mismo nombre. Se encuentra situada en las coordenadas (37,840828; -5,765046), a una altitud de 408 m s.n.m. Dista 65 km de Sevilla capital y puede ser considerada como la puerta de entrada de la comarca de la Sierra Norte sevillana (figura 1). Su situación al Noreste de la provincia de Sevilla, en la sierra homónima que constituye el enlace entre Sierra Morena y el Valle del Guadalquivir, confiere a su paisaje una fisonomía especial, con montañas alomadas de escasa altura, siendo la más elevada el cerro de La Lima con 678 m s.n.m. Dichas montañas son ricas en minerales, sobre todo hierro. En algunas zonas aparecen afloramientos graníticos, que igualmente le dan al paisaje un aspecto peculiar (Ayuntamiento de El Pedroso).

En el entorno de El Pedroso se pueden diferenciar dos zonas de explotación de hierro: una al norte del núcleo urbano, que se corresponde con la sierra de El Pedroso y que es un terreno montañoso, con una altitud media de unos 650 m s.n.m.; y otra al sur de la población, que comprende un terreno relativamente llano, con una altitud promedio de alrededor de 350 m s.n.m. (figura 2).

Encuadre geológico de El Pedroso

El término municipal de El Pedroso se localiza geológicamente en el sector occidental de la Zona de Ossa-Morena, que constituye una de las regiones del Macizo Hespérico, uno de los tres do-



Figura 1. Localización geográfica de El Pedroso (óvalo rojo) (Visor Iberpix del IGN, a partir del MTN 1:1.000.000).



Figura 2. Localización geográfica del cerro de la Lima, al noroeste de El Pedroso (Visor Iberpix del IGN, a partir del MTN 1:50.000).

minios geológicos, o grandes grupos de afloramientos, de la Península Ibérica. Las características de las rocas del Macizo Hespérico permiten diferenciar cinco zonas, de norte a sur: Cantábrica, Asturoccidental-Leonesa, Centroibérica, Ossa-Morena y Sudportuguesa. De una forma sencilla, se podría considerar la zona de Ossa-Morena como un conjunto de sedimentos marinos paleozoicos, depositados sobre una antigua placa tectónica de carácter continental, que fue aplastada y comprimida en la Orogenia Varisca entre otras dos placas tectónicas, una de naturaleza continental al Norte (zona centroibérica) y otra, la del Sur (zona Sudportuguesa), parte oceánica y parte continental. El movimiento de estos bloques fue una aproximación de una a otra con colisión posterior de las placas (Gil, 2017).

En el término de El Pedroso se encuentran sectores de seis unidades geológicas: Dominio Olivenza-Monesterio, en el que intruyó el Batolito de El Garrotal, la Unidad de Benalija, el Dominio de Cumbres Mayores, en el que intruyó el Batolito de El Pedroso, y la Cuenca post-orogénica del Viar. Concretamente los yacimientos de hierro pedroseños se emplazarían en la Unidad Benalija, cuyos afloramientos habitualmente se presentan dispuestos en estructuras sinclinales y limitados por fracturas. En el municipio de El Pedroso las formaciones sedimentarias que componen esta unidad son la Formación Torreárboles, constituida por conglomerados y arcosas masivas (Formación Torreárboles Basal) y pizarras, grauvacas y arcosas (Formación Torreárboles Superior), con volcanitas y pizarras; y la Formación Capas de Campoallá, constituida por una alternancia irregular de pizarras, areniscas y calizas, que en la parte superior está formada por calizas y dolomías masivas. Estas rocas tienen una edad correspondiente al Cámbrico Inferior (Boixereu et al., 2011).

En las inmediaciones de la población de El Pedroso existen yacimientos estratiformes al norte y lentejonares (tipo "skarn") al sur (Anónimo, 2011) (figura 3: el registro nº 896 se corresponde con el yacimiento estratiforme explotado por la mina La Lima).

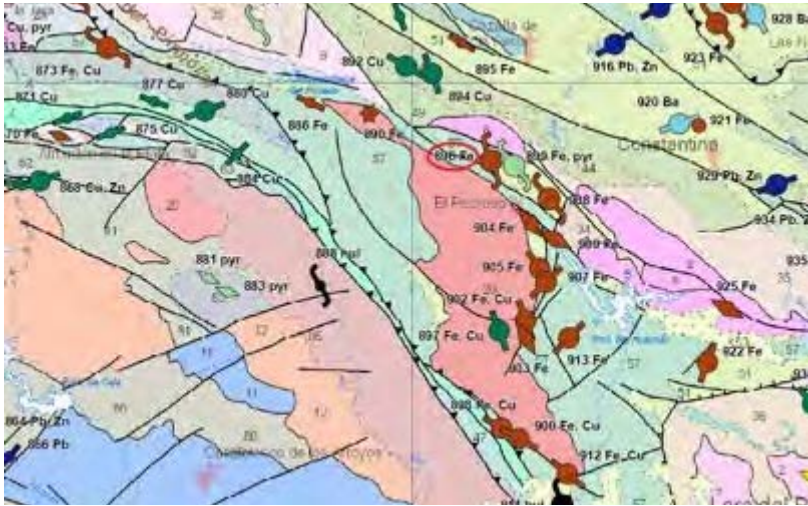


Figura 3. Detalle del entorno de El Pedroso, tomado del mapa metalogénico de Andalucía, publicado originalmente a escala 1:400.000 (IGME, 2011).

Apuntes históricos sobre la explotación de la mina La Lima

El origen de la mina La Lima se encuentra en la concesión minera que lleva su nombre, aunque con anterioridad se solicitaran otros derechos, que resultaron finalmente caducados en 1885, a consecuencia de no haberse satisfecho el impuesto del canon de superficie (García, 2014). En agosto de 1872 Guillermo Cappember, de profesión ingeniero de minas y domiciliado en Córdoba, solicitó por escrito ante el Gobernador Civil de la provincia de Sevilla una concesión denominada "La Lima", por ubicarse en el cerro de ese mismo nombre, de 12 pertenencias, equivalente a 12 hectáreas de extensión, para la extracción de minerales de hierro, puestos de manifiesto en una calicata. Al publicarse en el Boletín Oficial de la provincia de Sevilla la solicitud, atendiendo a la legislación vigente en materia de minería, la sociedad Pastor, Zabalza y Compañía, creada para construir la línea de ferrocarril de Mérida a Sevilla (Zulueta *et al.*, 2008), se opuso al otorgamiento del derecho minero a favor de Cappember en los terrenos que eran propiedad de Félix Zabalza Tajonar, uno de los socios de la compañía (figura 4). A pesar de las alegaciones, el 23 de junio de 1873 se procedió a la demarcación de las 12 pertenencias solicitadas, expidiéndose el título de propiedad a favor de Cappember el 30 de agosto de ese mismo año (García, 2002).

Tras la muerte de Cappember, la Asociación Minera apareció en escena, alegando haberse constituido para explotar, entre otras, las minas del finado. Felipe Barón y Murphy, director de la entidad, procedió en 1883 a ceder la explotación de la mina La Lima a la sociedad Morris y Compañía ("Morris and Company Limited"), con sede en Glasgow (Inglaterra, Reino Unido), habiendo sido admitida dicha cesión por el Gobernador Civil de la provincia de Sevilla. Se ignora si esta compañía inglesa ejerció en alguna medida los derechos de explotación, pero lo que sí se sabe es que, ante el impago del preceptivo canon de superficie, el derecho minero fue sacado a concurso, y el 10 de noviembre de 1890 fue adjudicado a Félix Zabalza. Este derecho minero



Figura 4. Félix Zabalza Tajonar (García, 2014).



Figura 5. Cable aéreo de La Lima (cortesía de Chaves).

vino a sumarse a los títulos de otros que le fueron concedidos fundamentalmente entre 1884 y 1888, todos ellos superpuestos a los terrenos del cerro de La Lima. Zabalza cedió estos derechos a Carlos Arnaud Carballido, casado con su hija Manuela (García, 2002 y 2014).

El 1 de julio de 1889 Carlos Arnaud, representado por su abogado, que no era otro que su suegro, firmó en Sevilla un acuerdo con el abogado que a su vez representaba al comerciante inglés llamado Johann Gustaf Charles Pontus Kleman, domiciliado en la calle Queen Anne's Gate, número 9, de Westminster, en Londres. Dicho acuerdo tenía como finalidad el arrendamiento de una serie de derechos mineros ubicados en el término de El Pedroso, al objeto de explotar en

ellos mineral de hierro. Dicho acuerdo fue enmendado el 15 de abril de 1891 por medio de otro contrato (*Iberian Iron Ore Company Limited*).

El día 4 de agosto de 1893 Kleman firmó en Londres un acuerdo con la Compañía de Hierros Ibéricos ("*Iberian Iron Ore Company Limited*"), al objeto de que ésta se subrogara en los acuerdos alcanzados por aquél para la explotación del cerro de La Lima. A finales de ese año se ultimaron las gestiones para el traspaso (García, 2014).

En 1892, en plenas negociaciones, Zabalza falleció, pero ello no fue óbice para que continuaran. Ante las vicisitudes para organizar la herencia, tras la defunción de Félix y su esposa, así como de tres de los seis hijos del matrimonio, los herederos que quedaban vivos se constituyeron en la sociedad Miguel Zabalza Lizaur y Hermanos. Carlos Arnaud participaba en la sociedad por medio de su esposa Manuela (García, 2007). Dicha sociedad expuso ante el Gobernador Civil los motivos del retraso en la formalización mediante escritura de la titularidad de la concesión heredada de su padre, solicitando que dicha titularidad les fuese reconocida oficialmente, lo cual se resolvió favorablemente (García, 2002). Desde ese momento dicha sociedad fue la arrendadora de las concesiones mineras.

En 1894 los ingleses construyeron un embarcadero de mineral en los terrenos conocidos como "Zahurdas de Patillas", posteriormente denominado "Explanaciones" (Ferrocarriles de España). Allí se cargaba la mena ferrífera en vagones que se dirigían a la estación de ferrocarril de El Pedroso, que enlazaba con la línea férrea de Mérida a Sevilla, dando salida al mineral por el puerto hispalense con destino a Inglaterra. El volumen de producción debió aconsejar la construcción de un cable aéreo, para unir la mina La Lima con las Zahurdas de Patillas (García, 2002).

Entre 1896 y 1899 el ingeniero noruego Nordal Preus y Brun, vecino de Málaga, fue el apoderado y gerente de la Compañía de Hierros Ibéricos. En 1896 esta empresa inició la campaña de adquisición de terrenos para la construcción del cable aéreo y el desarrollo de la mina (figura 5) (García, 2002 y 2007).

A mediados de 1899 Nordal Preus fue cesado y José Bouza Regidor, vecino de Madrid, fue nombrado nuevo gerente de la compañía. El primero hubo de entregar al segundo los efectos de la misma mediante el oportuno inventario, así como los documentos mercantiles, además del apunte de las deudas que la citada empresa había contraído por impago de jornales y materiales, desde el 12 de enero al 31 de mayo de 1899 (García, 2007). Muy probablemente Bouza fuera un administrador judicial, pues entre 1900 y 1901 la Compañía de Hierros Ibéricos fue denunciada en los tribunales londinenses por los titulares de acciones, dejándose la empresa en manos de un liquidador llamado G. Sneath, al no contar desde las fechas señaladas con ningún representante.

Ante el incumplimiento del contrato por parte de la Compañía de Hierros Ibéricos, los herederos de Félix Zabalza interpusieron también una demanda, que se resolvió con un auto del Juzgado de Primera Instancia del partido judicial de Cazalla de la Sierra, fechado el 7 de enero de 1908, mediante el cual se embargaban a la empresa inglesa todos los bienes dedicados a la explotación y transporte de la mina La Lima, pasando a manos de los hijos de Zabalza. Entre esos bienes se encontraban los siguientes: el cable aéreo, 34 castilletes de madera donde se apoyaba, el taller,

el almacén, una máquina de vapor de 4 caballos de fuerza, 142 cubas para el transporte de mineral, la estación de descarga, 766 metros de vías del apartadero, 86 raíles, 95 vías estrechas para la carga de mineral, 2 plataformas de vagonetas grandes, 50 serones de esparto y 1.000 toneladas de mineral de hierro en la explanación del taller, además de herramientas y repuestos (García, 2002).

Los socios de la empresa Miguel Zabalza Lizaur y Hermanos no tardaron en encontrar un nuevo interesado en el mineral de La Lima. Así, el 19 de octubre de 1908 suscribieron un contrato de arrendamiento de las concesiones que daban acceso a la explotación del mineral de la referida mina, incluyendo el cable aéreo y demás infraestructuras y elementos disponibles, a favor de Hermann Borner, vecino de Londres. Las condiciones del arrendamiento obligaban a Hermann Borner a reconstruir por su cuenta el teleférico, la estación de descarga y los apartaderos (García, 2002).

Hermann Borner había canalizado sus negocios por medio de la fundación, junto con otros seis socios, de la sociedad limitada H. Borner y Compañía (*H. Borner and Company Limited*), inscrita en el Registro de Sociedades londinense en 1895. Conforme a la documentación mercantil consultada, apenas admitió nuevos titulares de acciones. Una excepción fue G. Sneath, que suscribió participaciones en 1900 (*H. Borner and Company Limited*). Este empresario por aquel entonces ya era el síndico encargado de la liquidación de la Compañía de Hierros Ibéricos, por lo que quizás de su mano vino la llegada a El Pedroso de H. Borner y Compañía. El laboreo de la mina La Lima se retomó en 1909. La restauración del cable aéreo, a la que Borner se había comprometido en el contrato suscrito con la sociedad Miguel Zabalza Lizaur y Hermanos no se efectuó con la diligencia apropiada, siendo frecuentes los requerimientos relacionados con los peligros y mal funcionamiento de este medio de transporte, debido a que los caballetes tenían, en general, poca altura y se encontraban distanciados más de lo conveniente, provocando que la catenaria formase una pronunciada flecha y las cubas cargadas de mineral descendieran demasiado, llegando a rozar las copas de los árboles y pudiendo alcanzar en ocasiones a los transeúntes (Archivo Histórico Provincial de Sevilla). Otra de las prescripciones repetidas asiduamente por los ingenieros actuarios fue la necesidad de realizar saneos frecuentes y arreglos en los taludes de las cortas, debido a que eran tan pronunciados que también resultaban peligrosos en caso de desprendimiento de rocas (AHP de Sevilla).

En el expresado contrato de arrendamiento se había pactado la posibilidad de subarrendar las concesiones, cláusula que fue invocado 2 años más tarde, cuando Hermann Borner subarrendó el 50% de los derechos mineros explotación de mineral de hierro del cerro de La Lima a la sociedad MacLennan y Latorre, domiciliada en Bilbao. Al mes siguiente de cerrarse el acuerdo de arriendo de 1908, se nombró al ingeniero George Teichgraeber, ya entonces domiciliado en la villa de El Pedroso, director técnico de los trabajos de explotación de la mina La Lima, además de conferirle la representación de H. Borner y Compañía (García, 2007; AHP de Sevilla). Por ello, fue quien se encargó de informar del subarrendamiento de las concesiones a sus titulares (García, 2007 y 2014): durante 1911 y hasta mediados de 1912 la explotación de la Lima corrió a cargo de H. Borner y Compañía, siendo los directores de la misma los ingenieros de la Escuela de Londres Carlos Latorre y Edmundo MacLennan (AHP de Sevilla); sin embargo, a partir de esa fecha no se encuentran referencias a Borner, y todo apunta a que la sociedad MacLennan y Latorre adquirió el 50% de los derechos de Borner sobre el laboreo de La Lima (figura 6).



Figura 6. La familia MacLennan y Latorre residió en la propia finca La Lima, en la casa de Las Alberquillas (Pérez et al., 2011).



Figura 7. Recreación del transporte en carretas de mineral extraído de la mina La Lima (modificado de la Asociación Cultural La Fundición de El Pedroso).

Entre 1912 y 1913 en La Lima se trabajó con normalidad en las condiciones antes descritas, requiriéndose sin descanso por la inspección de Policía Minera el arreglo del cable aéreo y de los taludes de las diferentes cortas. En el último de esos años trabajaban en la mina 200 obreros. Sin embargo, al poco tiempo los trabajos se suspendieron, a causa del desplome del mercado del hierro debido al inicio de la Primera Guerra Mundial. Entre 1921 y 1922 se intentó volver a poner en explotación La Lima, para abastecer la antigua fábrica de hierros de la Compañía de El Pedroso. En ese tiempo se intentó volver a poner en funcionamiento el teleférico, bajándose el mineral en carretas mientras se conseguía (figura 7). Finalmente, el intento de reactivación resultó fallido. Existe constancia de que en 1927 permanecían paradas todas las labores y el cable y el cargadero de la estación estaban completamente destartalados. El 10 de junio de 1933, a causa del impago del canon de superficie, el Ministerio de Hacienda procedió a la caducidad de las concesiones de explotación de la mina La Lima que eran de titularidad de los Zabalza.

Características de la explotación de la mina La Lima

Los diferentes estudios metalogenéticos realizados en las concesiones mineras que habilitaban la explotación del cerro de La Lima han puesto de manifiesto dos aspectos fundamentales sobre el criadero, referentes a la composición de los minerales y a la morfología del mismo.

El yacimiento está constituido por filones interestratificados en la pizarra, más o menos clorítica, de óxido en forma de hematites roja. Estos óxidos de hierro presentaban una mena con una ley de hierro moderada (49-53%), a la vez que gangas silíceas y baríticas y notables cantidades de piritas de hierro que impurifican la mena, en términos tales que hacían que estos minerales resultaran de difícil colocación en el mercado principios del siglo XX, obligando a una detenida preparación o estrío manual y llegando a hacerlos completamente inexplotables según las condiciones del mercado (AHP de Sevilla; Carbonell y Carvajal, 1944).

El yacimiento resultó ser irregular, tanto de formación como de constitución, lo que dificultaba una explotación ordenada y con aprovechamiento importante de lo arrancado. En este sentido, contaba con varias capas paralelas en dirección media N-30-O con inclinación fuerte al Este, cuyas características eran similares a las de las pizarras en que encajaban. Además, estas capas poseían potencias muy variables, y, estando próximas a la superficie, se ramificaban formando núcleos y bolsadas de relativa importancia.

Esta irregularidad explicaría el errático diseño de la explotación, que aun hoy en día es posible percibir (figura 8). En este sentido, existen canteras a cielo abierto en la parte alta del cerro, en



Figura 8. Detalle de algunas concesiones y labores mineras asociadas a la mina de La Lima (modificado de Carbonell y Carvajal, 1944).



Figura 9. Aspecto de una de las labores subterráneas de la mina La Lima (Cornello).

las que se arrancaba bastante estéril; y explotación subterránea consistente en socavones hechos en las laderas hasta cortar el mineral, disponiendo luego los tajos de arranque por realce, esto es, se aplicaba un método de explotación ascendente, utilizado cuando los criaderos presentan mucho buzamiento (figura 9). Dada la competencia del material, no era necesaria la entibación de las paredes del tajo, pero, para impedir el derrumbamiento del techo, se guardaban columnas de mineral entre los tajos, se colocaban maderos o se rellenaba con escombros. Las diferentes labores de la mina se esparcen por el cabezo, que se organizó por niveles, en los que corrían vías generales, en cuyas proximidades se estriaba y acumulaba la producción, que era conducida en vagonetas a un plano inclinado automotor de dos vías, que recorría los distintos niveles donde estaba explotando. A la terminación de este plano había otra vía a nivel, por la cual eran transportadas las vagonetas, formando trenes arrastrados por caballerías hasta unas tolvas en las que se descargaban. Al pie de estas tolvas arrancaba un cable aéreo, también automotor, con un solo cable tractor, que, con un recorrido de 2.600 m, transportaba en cargamento hasta otro cargadero situado cerca de la estación del ferrocarril de El Pedroso, servido por un ramal de la línea general de Mérida a Sevilla, donde el mineral era depositado en los vagones que se expedían al puerto de Sevilla.

Puesta en valor de la mina La Lima

En El Pedroso no se encuentra ningún elemento geológico ni minero que cuente con un reconocimiento que acredite su valor patrimonial: Lugar de Interés Geológico del Inventario Español,

georrecurso del Inventario Andaluz, Bien de Interés Cultural incluido en el Plan Nacional de Patrimonio Industrial y/o en el Catálogo General del Patrimonio Histórico Andaluz. Sin embargo, hay que destacar que el término municipal de El Pedroso está parcialmente incluido dentro del perímetro del Geoparque Mundial de la UNESCO Sierra Norte de Sevilla, lo que da cuenta del potencial de la geología y las actividades, pasadas y presentes, relacionadas con ella que atesora este territorio sevillano.



Figura 10. Situación de las minas más importantes del término de El Pedroso (modificado de Carbonell y Carvajal, 1944).

Además de la mina de La Lima, en el municipio pedroseo, se beneficiaron otras minas de hierro más o menos importantes, que son: Juan Teniente, San Julián y Londres, al Norte, y San Manuel y Navalázaro, al Sur (figura 10).



Figura 11. Labores subterráneas con sostenimiento.



Figura 12. Pliegue en pizarras en el acceso a una galería subterránea.

Entre ellas, aisladamente no existe ningún elemento del patrimonio minero pedrosoño que destaque en especial sobre los demás. Sin embargo, la mina La Lima presenta algunas condiciones favorables que la convierten en idónea para su puesta en valor:

- Permite observar minería tanto a cielo abierto como subterránea (figura 11).
- En las propias labores mineras es posible observar diferentes minerales de hierro (hematites, magnetita y pirita) y estructuras geológicas (filones, niveles mineralizados, pliegues, patrones de fracturación, etc.) (figura 12).
- Todavía conserva algunos vestigios de las antiguas estructuras de transporte (pistas mineras, cable aéreo, planos inclinados o trazado de la vía de ferrocarril Decauville).
- La finca La Lima, en la que encuentra la mina, es fácilmente accesible desde El Pedroso por la carretera C-433.
- La finca cuenta con una pista en buen estado que parte de la entrada de la misma desde la carretera C-433 hasta coronar el cerro de La Lima (figura 13).
- El entorno natural serrano del cerro de La Lima cuenta con un alto valor ecológico (figura 14).
- La frondosa vegetación que flanquea la pista permite que gran parte de la visita a las minas se haga a la sombra, incluso durante la canícula.
- Los propietarios de la finca La Lima tienen una disposición favorable a la explotación turística de su propiedad basada en la actividad minera que se desarrolló en ella.
- Las visitas a la mina no requieren una gran inversión, para que sean atractivas y seguras para los turistas.

A causa del alto valor ecológico del ambiente que abarca del cerro de La Lima (figura 14), cualquier propuesta de puesta en valor deberá realizarse con el máximo respecto por el medio natural. Por ello, lejos de proponer una actividad impacte de nuevo sobre el mismo, como ya en su día hizo la minería, sería recomendable que la oferta de ocio para acercarse a esta porción de la sierra de El Pedroso pivote sobre el turismo de aventura y de naturaleza.



Figura 13. Acceso a la finca La Lima desde la carretera C-433.



Figura 14. En el cerro de La Lima la vegetación apenas permite observar los vestigios mineros.

Sin duda, uno de los aspectos que más llaman la atención del visitante, son las labores subterráneas. Sin embargo, a pesar de que el entorno natural del cerro de La Lima en ocasiones dificulte la percepción del turista de que se encuentra en un antiguo espacio minero, con los peligros que ello conlleva para su seguridad, es preciso adoptar una serie de medidas conducentes a que los visitantes vivan su experiencia con la mayor seguridad posible:

- Cuando se pueda producir la caída a distinto nivel a causa de la existencia labores mineras antiguas, realizar el vallado perimetral de las mismas.
- Señalizar el recorrido, para evitar pérdidas, así como los peligros que puedan existir en el mismo.
- Advertir a los visitantes de que se encuentran en una antigua mina y de los peligros que pueden encontrarse si abandonar el camino señalizado.

- En caso de acceder a labores subterráneas, proporcionarles el equipo de protección individual adecuado, en el que no podrá faltar el casco y la iluminación, con las adecuadas instrucciones de usos.
- No permitir que los visitantes realicen el recorrido si son menores y no van acompañados por un adulto, si no cuentan con calzado e indumentaria adecuados, o si van solos y/o por su cuenta, ya que el sinfín de labores mineras existentes puede provocar que se pierdan o se accidenten.
- Garantizar que las actividades deportivas, como la escalada o la espeleología, que se realicen sean conducidas por un especialista, y que todos los participantes dispongan de un seguro de accidentes y de responsabilidad civil.

Por último, cabe señalar que, aunque sea de forma intermitente, según la demanda de los visitantes, la finca La Lima viene siendo explotada en su vertiente de aventura y de naturaleza, ofreciendo diferentes actividades, entre las que se encuentran: el senderismo, la espeleología, la escalada, por una parte; y el avistamiento de aves y la fotografía en "hide", por otra (figuras 15 y 16).

Conclusiones

La conjunción de la estratégica ubicación de El Pedroso, a tan sólo 65 km de la capital andaluza y a las puertas de la Sierra Norte de Sevilla, de su pasado minero-siderúrgico y del auge de las actividades de aventura y naturaleza, así como del turismo interesado en el patrimonio geológico y minero, justifican el interés de poner a disposición de los turistas el disfrute de alguna de sus minas. Debido a sus especiales condiciones, la mina La Lima es la candidata ideal para desarrollar una opción turística alternativa a la visita del municipio sevillano de El Pedroso para conocer su patrimonio histórico, arquitectónico, artístico y etnográfico. Las actividades que tímidamente se están poniendo en marcha en el entorno del cerro de La Lima atienden a sus características, por lo que están enfocadas a conocer la mina desde el punto de vista del turismo de aventura, gracias al senderismo, la escalada y la espeleología. Esta última práctica deportiva es posible gracias a la existencia de labores subterráneas. A pesar de lo naturalizado que se encuentra el entorno en



Figura 15. Actividades de naturaleza y aventura ofertadas en la finca La Lima (Cornello).



Figura 16. La espeleología es una de las actividades que se puede practicar en la mina La Lima (Cornello).

la actualidad, es obligatorio realizar las visitas garantizando la seguridad de los turistas, de acuerdo con la legislación española.

Agradecimientos

Este trabajo se ha elaborado en el marco del Proyecto de Investigación del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad "Historia empresarial, mercados y desarrollo productivo en la minería española contemporánea" (HAR2014-56428-C3-3-P).

Referencias

- Archivo Histórico Provincial de Sevilla. Sección Industria, Jefatura Provincial de Minas, Signaturas 4.420, 4.421, 4.422, 4.423 y 19.503. *Actas de inspección de Policía Minera. Distrito Minero de Sevilla. Término municipal de El Pedroso (1902-1929)*.
- Asociación Cultural La Fundación de El Pedroso. *El final* [en línea]. Disponible en: <http://www.lafundicion-deelpedroso.org/siglo-xx-minero.html>
- Ayuntamiento de El Pedroso. *Situación y Transportes* [en línea]. Disponible en: <http://www.elpedroso.es/opencms/opencms/pedroso/municipio/SituacionTransporte/>
- Boixereu, E., Gumiel, P. y Feixas, C. 2011. Descripción de las mineralizaciones de la Zona de Ossa-Morena. En: García-Cortés, Á. (Ed. ppal.). *Cartografía de recursos minerales de Andalucía*. Instituto Geológico y Minero de España y Consejería de Economía, Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía, Madrid, 83 y 84-86. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/economiainnovacioncienciayempleo/pam/CRMA>
- Carbonell, A. y Carvajal, E. 1944. *Memorias del Instituto Geológico y Minero de España. Criaderos de Hierro de España. Tomo VI. Hierros de Córdoba y Jaén. Hierros de Sevilla*. Tip. Lit. Coullaut, Madrid, 315-317 y 342. Disponible en: <http://doc.igme.es/ColeccionMemorias/MemoriasPDF/memorias%20tomo%20046.pdf>
- Ferrocarriles de España. Mérida a Sevilla (Los Rosales) [en línea]. Disponible en: <http://www.spanishrailway.com/2012/03/05/merida-a-sevilla/>
- García, A. 2002. *Apuntes para la historia de la explotación del hierro en El Pedroso. La Lima-121: 1873-1900*. El Pedroso, feria y fiestas 2002, 35-39.

- García, A. 2014. *Apuntes para la historia de la Minería en la Villa del Pedroso. El Coto Minero de Cerro de la Lima. 1871-1933*. El Pedroso, feria y fiestas 2014, 63-67.
- García, A. 2007. *Mineros, minas, minerales y siderurgia en la Sierra Morena de Sevilla. Catálogo de documentos para la historia económica e industrial de Sevilla y su provincia. Siglos XIX y XX (1804-1926)*. Ayuntamiento de El Pedroso, El Pedroso. Disponible en: <http://elpedrosoysuhistoria.blogspot.com.es/> (libro 26).
- Gil, A. (Dir.). 2017. *Guía de Lugares de Interés Geológico del Parque Natural Sierra Norte de Sevilla, Geoparque Mundial de la UNESCO*. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía, 9-10. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/porta/web/menutem.7e1cf46ddf59bb227a9ebe205510e1ca?vgnextoid=6a384d5ab7f3c510VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnextchannel=1f27dfde043f4310VgnVCM1000001325e50aRCRD>
- Iberian Iron Ore Company Limited. *Documentación mercantil depositada en los Archivos Nacionales del Reino Unido*. Inédita.
- IGME 2011. Mapa metalogenético. Escala 1:400.000. En: García-Cortés, Á. (Ed. ppal.). *Cartografía de recursos minerales de Andalucía*. Instituto Geológico y Minero de España y Consejería de Economía, Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía, Madrid. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/economiainnovacioncienciayempleo/pam/CRMA>.
- Instituto Geográfico Nacional. *Visor Iberpix. Ortofotos y Cartografía del IGN* [en línea]. Disponible en: <http://www.ign.es/iberpix2/visor/>
- Junta de Andalucía. *Andalucía pueblo a pueblo. Fichas municipales. El Pedroso* [en línea]. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/sima/ficha.htm?mun=41073>
- Pérez, J. M., Aguilera, R. F., Carrasco, I. A. y Romero, E. M. 2011. *Plan Director para la Gestión del Patrimonio Industrial Minero de la Faja Pirítica Sevillana y Ossa Morena*. Inédito. Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Consejería de Economía Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía, 655-658.
- Zulueta de Reales, S., Sánchez, M., Naranjo, J., Ruiz, C. M. y Hernández, P. 2008. *Fábricas y minas de la Sierra Norte de Sevilla. Itinerario fabril y minero de la Rivera del Huéznar, Memoria General*, 95. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/fomentoyvivienda/porta-web/web/areas/vivienda/texto/3691206d-78c0-11e1-b3ef-6583fdb537d9>.

R. Jordá Bordehore, et al., 2018. Propuesta de alternativas de recorridos mineros para su uso turístico en las minas de La Florida, Cantabria. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 197-208.

Propuesta de alternativas de recorridos mineros para su uso turístico en las minas de La Florida, Cantabria

R. Jordá Bordehore⁽¹⁾, L. Jordá Bordehore⁽²⁾ y M. Arlandi Rodríguez⁽³⁾

(1) Geólogos del Mundo-World Geologist, Madrid (España)
rafael_jorda@hotmail.com

(2) Instituto Geológico y Minero de España, Madrid (España)

(3) Túneles y Geomecánica, S.L., Madrid (España)

RESUMEN

La actividad extractiva en las minas de La Florida, localizadas en Cantabria, arrancó en 1857, año en el que se otorgó la primera concesión, denominada "La Isidra". La extracción de cinc y plomo favoreció un gran desarrollo en la comarca hasta la década de los 70 del siglo XX, cuando comenzó el declive de la minería. En el año 1978, tras 120 años de explotación, se produjo el cierre definitivo de las minas, iniciándose un período de retroceso económico y demográfico en la región. Gracias a la puesta en valor de la cueva de El Soplao en el año 2005, la comarca de Celis-Rionansa empezó a remontar su actividad económica. La rehabilitación de las minas para su uso turístico, además de ser un complemento a las visitas que actualmente se realizan, pretende devolver a la actividad minera y a los mineros el protagonismo que tuvieron. En este trabajo, se presentan las alternativas que se han contemplado como posibles recorridos mineros que pueden ser adaptados para visitas tanto en la modalidad de turismo de aventura como aptas para todos los públicos.

Palabras clave: El Soplao, La Florida, minería, patrimonio, turismo minero.

Proposal of alternatives for mining routes for tourist use in La Florida mines (Cantabria, northern Spain)

ABSTRACT

The extractive activity in La Florida mines, located in Cantabria, began in 1857, year in which the first concession, called "La Isidra", was granted. Extraction of zinc and lead contributed to a great development in the region until the decade of the 70s in the 20th century, when the decline of mining started. In 1978, after 120 years of mining, the definitive closure of the mines occurred, beginning a period of economic and demographic decline in the region. Thanks to the enhancement of the cave of El Soplao in 2005, the region of Celis-Rionansa began to overcome its economic activity. The rehabilitation of the mines for a tourist purpose, besides being a complement to the visits done nowadays, aims to return mining activity and miners to prominence. In this paper, the alternatives that have been analyzed as possible mining routes that can be adapted for visits both in the modality of adventure tourism and suitable for all audiences are presented.

Keywords: El Soplao, heritage, La Florida, mining, mining tourism.

Introducción

En julio de 2005 tuvo lugar la inauguración oficial de la cueva de El Soplao para uso turístico. Fue uno de los acontecimientos de mayor relevancia en la comarca de Celis-Rionansa, una zona

en declive desde el punto de vista tanto económico como demográfico. Años atrás, en 1978, se había producido el cierre de las minas de La Florida, principal sustento de la región.

La dinamización de la comarca, con la cueva de El Soplao como atractivo turístico principal, ha puesto de manifiesto la relevancia que las visitas subterráneas tienen dentro del turismo cultural y natural. La cavidad cuenta con una media de 200.000 visitas anuales, sin apenas afección en los momentos de crisis económica.

Además del conjunto kárstico, el denominado “territorio El Soplao” cuenta con otros elementos de notable interés. El yacimiento de ámbar cretácico, descubierto en el año 2008, es objeto en la actualidad de numerosos estudios. Sin embargo, quizás el elemento que más interés pueda despertar de cara a su puesta en valor como uso turístico son las propias minas que dieron lugar al descubrimiento de El Soplao: un conjunto de galerías de más de 50 kilómetros de recorrido con numerosos niveles de explotación y un estado de conservación notable, que, sin duda, supondría un complemento perfecto a las visitas que actualmente se hacen en el medio kárstico.

Entre los años 2010 y 2011 se llevaron a cabo los primeros trabajos de investigación en el complejo minero de La Florida (figura 1), con el objetivo de adaptar varios recorridos subterráneos para su uso turístico, valorándose diferentes alternativas. En la actualidad, y con el fin de dinamizar el valle de Valdáliga, se están acometiendo las obras para reabrir la Plaza del Monte, como acceso a las futuras galerías visitables.

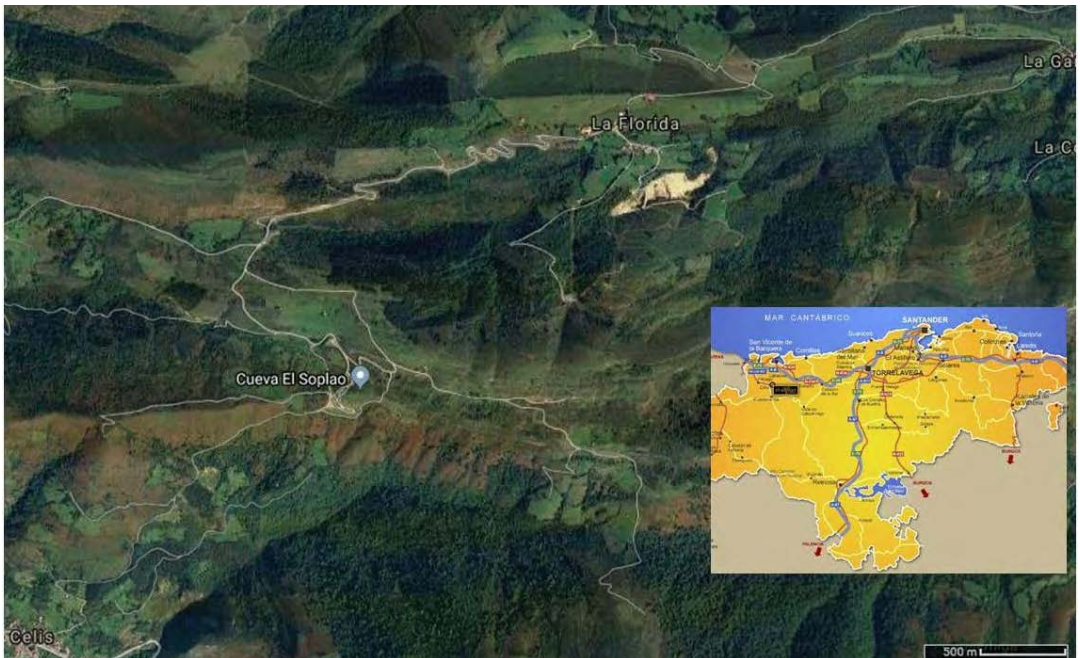


Figura 1. Situación de la cueva de El Soplao y el complejo minero de La Florida en la Sierra de Arnedo, dentro de la región de Cantabria.

Contexto histórico de las minas de La Florida

La actividad minera en la zona de la Florida dio comienzo a mediados del siglo XIX a cargo de la Compañía de Minas y Fundiciones de Santander. Esta empresa, fue fundada en 1855 específicamente para la explotación de yacimientos de cinc en la Cornisa Cantábrica. Dos años más tarde, se otorgó la primera concesión, nombrada "La Isidra", en la sierra de Arnedo (García et al., 2007).

Como en la mayoría de las explotaciones de la región, los trabajos mineros principiaron con una serie de zanjas y labores superficiales a favor de afloramientos de carbonatos de cinc (calaminas), ya que en aquella época aún no se conocía la técnica para extraer el cinc de los sulfuros (esfalerita y galena), que se encuentran a mayor profundidad (figura 2). Se explotaba mediante un método mixto a cielo abierto y mediante galerías, extrayendo las bolsadas más ricas de calaminas y dejando el macizo con una serie de oquedades de muy diverso tamaño y disposición (Jordá-Bordetore y Jordá, 2011).

A principios del siglo XX se produjo un descenso de la cotización del cinc, debido a la apertura de nuevas minas en América. Su repercusión en la zona fue notable, puesto que no se realizaron solicitudes de nuevas concesiones entre los años 1906 y 1935. A esto se deben añadir las dificultades técnicas y de transporte de algunas minas cántabras, que encarecían el precio del mineral, como se indica en la "Memoria sobre las minas de los grupos de Las Ventas, La Florida y Áliva" de 1927. Por estas razones y a pesar de que en la zona se habían producido algunos avances técnicos considerables, en el año 1927 se decidió el cierre temporal de las minas. Una de estas mejoras técnicas había sido la construcción de un teleférico en 1908, denominado "línea de baldes", que comunicaba la mina La Cuerre con la Plaza del Monte, donde se beneficiaba el mineral. El año 1928 se dedica únicamente a labores de investigación (Mazarrasa, 1930).



Figura 2. Mineros en las instalaciones de superficie de las minas de La Florida.

Es en esta época en la que se produce un acontecimiento, que, años más tarde incluso de la clausura de la mina, volverá a dinamizar la región. En 1908, durante el avance de galería de La Isidra se interceptó una gran cueva (figura 3), produciéndose la entrada de aire, denominada "soplao" en el argot minero (Jordá Bordehore, 2011). A pesar de estar la cueva dentro de una importante explotación minera, tres razones hicieron que llegase hasta nuestros días en buen estado: por el tamaño y disposición de la cavidad las estalactitas y estalagmitas más espectaculares no estaban en zonas de paso; la cueva no sirvió para efectuar sondeos de reconocimiento sobre el criadero, al contrario de lo que sucedió en Udías; y, por último, y tal vez más importante, la cueva no tenía mineral.

Hacia 1930 la fisionomía de la explotación va pareciéndose a lo que hoy en día se puede contemplar: una zona superficial y abandonada explotada de manera rudimentaria por cámaras y pilares (zona de calaminas); y una parte más profunda con un complejo y muy organizado sistema de laboreo que se va adaptando a la forma irregular de las bolsadas más mineralizadas con algo de calaminas y en mayor medida sulfuros. En esta zona más profunda se abrieron grandes cámaras para explotación del mineral, el cual era transportado bien por galerías secundarias, bien por planos inclinados, que lo conducían a los pozos o a las galerías generales de arrastre al exterior (Jordá-Bordehore y Jordá, 2011).

Hasta mitad de los años 1960 todavía se empleaba el socavón de la Plaza del Monte para la extracción del mineral. Se usaba tracción de sangre, con bueyes que tiraban de cuatro vagones. Posteriormente, entre los años 1963 y 1964, se utilizaron máquinas de gasoil, que podían mover de veinte a treinta vagones.

En los años 70 del siglo XX, debido al declive de la minería en la comarca, empezó una emigra-



Figura 3. Mineros junto a algunas formaciones dentro de la cueva.

ción de los empleados a otras minas como Reocín o incluso Áliva, en Picos de Europa, o bien a la fábrica de Hinojedo. Tras 120 años de explotación, el cierre definitivo de las minas de La Florida tuvo lugar en 1978.

Uso turístico de las minas de La Florida

A pesar de encontrarse englobada dentro de un complejo minero de más de 50 kilómetros de galerías, en la visita a la cueva de El Soplao apenas se recorren unos metros de temática minera. El tren que transporta a los visitantes al interior transcurre por una antigua galería de mina (Cereceo), en la cual se han colocado algunos elementos y maquetas que recuerdan el pasado minero de la cavidad.

El resto de la antigua explotación cuenta con un potencial enorme para realizar visitas de todo tipo, tanto en la modalidad de turismo de aventura como aptas para todos los públicos, en las que poder observar los diferentes métodos de explotación empleados durante los 120 años de laboreo. En los distintos niveles de la mina pueden apreciarse grandes salas, sostenimientos de diferente tipología, formaciones kársticas ligadas a la cueva de El Soplao o vinculadas a la minería (neoformaciones), así como maquinaria y utensilios mineros.

Por este motivo, en el bienio 2010-2011 se desarrollaron una serie de investigaciones e informes técnicos, que incluyeron estudios topográficos, geotécnicos y de valoración patrimonial de distintas alternativas dentro de las labores mineras subterráneas. El objeto de los trabajos fue conocer diversas posibilidades para la puesta en valor de la parte minera del conjunto patrimonial Minas de La Florida – cueva de El Soplao.

Descripción de los recorridos alternativos propuestos.

Como resultado de los trabajos técnicos efectuados a comienzos de la década de 2000, se propusieron cuatro posibles recorridos (figura 4), que pasan a describirse a continuación.

Alternativa 1. Recorrido de turismo de aventura por la mina La Cuerre

La mina La Cuerre se encuentra situada a un kilómetro de distancia del acceso actual de la cueva de El Soplao. Cuenta con un alto valor patrimonial y un buen estado de conservación y seguridad. Se trataría de un recorrido netamente minero, en el que se podrían apreciar numerosos utensilios y métodos de explotación (figura 5).

La propuesta consistiría en un recorrido de aventura por las labores de la mina La Cuerre, con entradas y salidas independientes. Se descartaría completamente cualquier recorrido turístico apto para todos los públicos, al ser un sector alejado de la zona principal de El Soplao. La visita se realizaría en total autonomía, con transporte de los visitantes desde la zona de turismo de aventura de El Soplao en vehículos todoterreno.

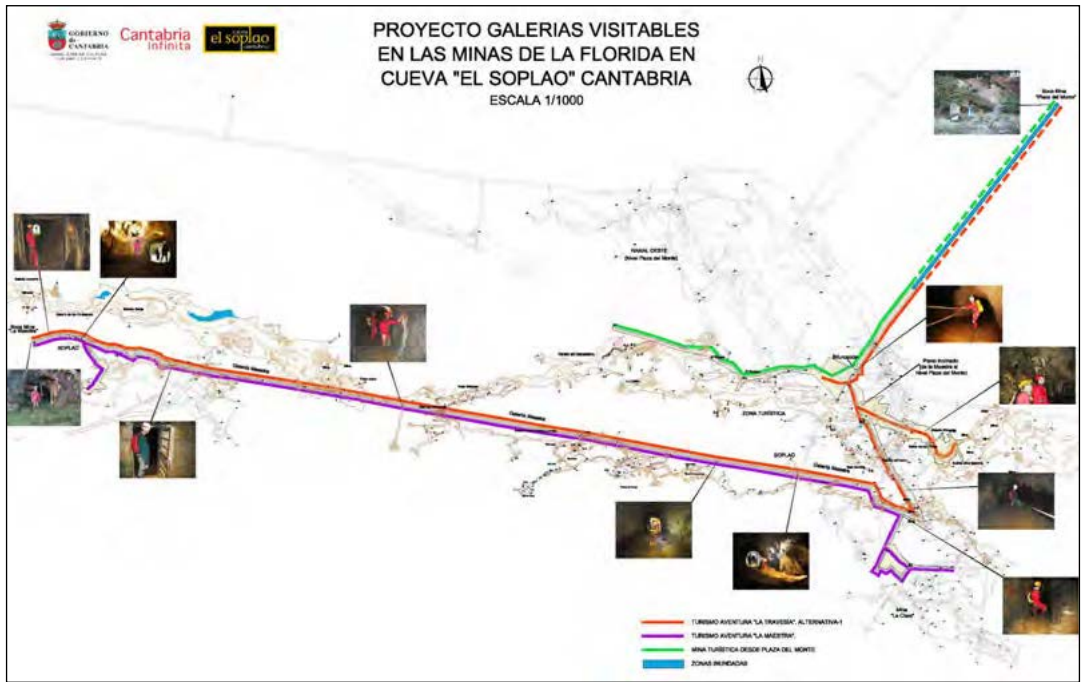


Figura 4. Itinerarios mineros propuestos en las minas de La Florida.

Alternativa 2. Recorrido de turismo de aventura desde la galería Maestra hasta la mina Clara

Se realizaría un recorrido de aventura minero-espeleológico junto al complejo turístico actual. Se accedería por la galería Maestra, en cuyo tramo inicial habría que acometer algunas medidas de sostenimiento, hasta la zona de la Sirena, con posibilidad de acceder y salir por la mina Clara. Las visitas de tipo aventura, aportan al visitante una mayor autenticidad, al apreciarse las galerías prácticamente en el mismo estado en el que se encontraban al abandonarse la actividad. Se realizan con equipamiento espeleológico básico (casco, iluminación personal, mono y botas) y requieren un mínimo de condiciones físicas.

Los principales atractivos de esta visita serían son la cercanía al complejo actual, por lo que podrían aprovecharse las mismas instalaciones, y la posibilidad de apreciar soplaos mineros, así como formaciones kársticas diferentes a las que se pueden observar en el interior de la cavidad (figura 6).

Alternativa 3. Recorrido de turismo de aventura desde la galería Maestra hasta la bocamina Plaza del Monte

Se trataría de un itinerario netamente de aventura, entrando por la galería Maestra hasta la zona de la Sirena, y saliendo por la galería Ana en dirección a la bocamina Plaza del Monte, ubicada



Figura 5. Mina La Cuerre. Entronque del plano inclinado de entrada a la galería Elvira en dirección E – O (izquierda); vagoneta en el ramal Oeste de la galería Elvira (derecha arriba); castillete de la mina (derecha abajo).



Figura 6. Formaciones (izquierda y abajo derecha) y panorámica del complejo turístico actual (arriba derecha).



Figura 7. Travesía de las minas de La Florida. Permitiría observar tanto la cueva como las galerías mineras.

en el poblado de La Florida. Sería el recorrido más completo y exigente, por lo que se denominaría "Travesía de las minas de La Florida". En el mismo, además de poder contemplarse la zona kárstica de El Soplo, se descendería por rampas mineras, llegando al nivel de Plaza del Monte, donde es posible ver grandes cámaras de explotación (figura 7). Sería necesario el uso de medidas de protección, tales como pasamanos y, eventualmente, podría requerirse el empleo de cuerdas con nudos para superar resaltes cortos.

Como principal intervención, se precisaría la apertura de la Plaza del Monte. Asimismo, habría que disponer de un transporte alternativo para conducir a los visitantes de vuelta al complejo turístico actual.

Alternativa 4. Recorrido apto para todos los públicos desde la bocamina Plaza del Monte

Sería una visita apta para cualquier tipo de visitante, incluidos aquéllos con movilidad reducida, ya que se acondicionaría el firme acondicionado y se instalaría iluminación. Para poner en valor este itinerario, en primer lugar se requeriría la apertura de la bocamina de Plaza del Monte y el refuerzo de varias zonas en la galería Ana.

Una vez drenado y acondicionado el nivel de Plaza del Monte, la entrada hasta la bifurcación se podría realizar a pie o en tren minero. Desde ahí se proseguiría a pie la visita a las labores mineras en esa zona y a las grandes cámaras del ramal Oeste (figura 8), finalizando la visita en las galerías y sondeos surgentes, donde se podrían simular diversos métodos mineros. La vuelta se realizaría por el mismo camino que la ida.

Además de las intervenciones necesarias descritas, esta alternativa llevaría aparejada la rehabilitación de los accesos a Plaza del Monte, así como la restauración de los elementos mineros de la zona exterior, actualmente en estado de deterioro.

El acceso a la mina por este lado de la sierra de Arnedo supondría la dinamización del valle de Valdáliga, menos beneficiado por la explotación turística de la cueva de El Soplao.

Valoración de las alternativas propuestas

Los cuatro itinerarios descritos resultan sumamente interesantes, dado que aportarían al turista un enfoque del mundo subterráneo diferente del actual, pues estarían centrados en la actividad extractiva. Asimismo, supondría un reconocimiento a las poblaciones de la comarca que durante 120 años vivieron de la minería y de los recursos minerales que extrajeron de La Florida.

De las cuatro opciones, la alternativa 2 sería la que necesitaría una menor inversión, ya que, al margen del acondicionamiento de la parte inicial de galería La Maestra, el resto del recorrido se encuentra en buen estado de conservación y se podrían aprovechar las instalaciones actuales. En este recorrido se podrían apreciar zonas tanto mineras como kársticas.



Figura 8. Galería sobre cámara minera en el sector a rehabilitar (cortesía Zalama).

El itinerario más minero es la alternativa 2, que discurriría por la mina La Cuerre. Precisaría escasa inversión para su puesta en valor, porque tanto las galerías como las salas se encuentran en buen estado. Sin embargo, desde el punto de vista logístico, supondría realizar un edificio para la recepción de los visitantes o bien disponer de vehículos todoterreno para trasladar a los visitantes desde el complejo actual.

En este caso, como en el anterior, como condicionante negativo, cabría indicar que ambas alternativas no ampliarían la nómina actual de poblaciones beneficiadas por la explotación turística de la cueva de El Soplao, puesto que se accedería por la misma carretera que conduce a su centro de visitantes.

Las otras dos alternativas son, sin duda, las que requieren una mayor inversión, habida cuenta de que en ambos casos tendría que procederse a la apertura y acondicionamiento de la bocamina Plaza del Monte, además de la habilitación de un edificio para la recepción de visitantes y vehículo para transporte en el caso de la travesía aventura. No obstante, estos recorridos serían un gran complemento tanto para la propia cueva como para la comarca. La opción de la visita para todos los públicos (alternativa 4), atraería un mayor número de visitas y, por tanto, generaría mayor beneficio en el valle de Valdáliga. El acondicionamiento del itinerario para la travesía (alternativa 3), además de ser un recorrido aventura de primer orden, serviría como salida de emergencia de la visita general, por lo que las dos opciones irían integradas en una misma intervención.

Conclusiones

Tras 120 años de actividad extractiva, las minas de la Florida cuentan con un rico patrimonio y un alto potencial de cara a su puesta en valor. La rehabilitación de las galerías supondría, adicionalmente, un reconocimiento a la memoria de los habitantes de la comarca que trabajaron en las minas.

Con más de 50 km de galerías, son numerosas las opciones que existen de trazar recorridos subterráneos para todos los gustos y condiciones, cubriendo un amplio espectro de turistas, que va desde los más aventureros hasta los que tienen movilidad reducida.

Se han valorado cuatro itinerarios alternativos, todos ellos de gran interés. Sin embargo, como consecuencia de su mayor impacto en la comarca, se considera que los más aconsejables de cara a su uso turístico serían, por un lado, la travesía de las minas de Florida (alternativa 3), cuyo acceso sería por el complejo turístico actual y la salida por la bocamina Plaza del Monte, y, por otro, la visita para todos los públicos desde dicha bocamina (alternativa 4). Habría que acondicionar dicha plaza, así como la galería Ana. En la parte exterior se debería construir o rehabilitar un edificio para recepción de visitantes y preparar los accesos para vehículos.

Paralelamente a este trabajo se ha analizado preliminarmente la estabilidad de las galerías, observándose que, en general, presentan un buen estado. Se requiere, no obstante, un estudio geotécnico completo de todas las galerías a visitar, una topografía de detalle de las alternativas, así como un análisis global de las condiciones ambientales, además de tener que acometer ciertas obras puntuales de sostenimiento, así como que adecuar los recorridos en función del tipo de

visitante. Ningún visitante deberá pasar por debajo de un techo de mina no reconocido y evaluado, ni entrar en una galería cuya atmósfera no haya sido analizada.

Referencias

- García, G., Palero, F. J., Rabadán, J. y Hedrosa, M. 2007. Minas de la Florida. *Bocamina*, 20, 14-87.
- Jordá-Bordegore, L. y Jordá, R. 2011. *Informe previo a proyecto de adaptación para visitas turísticas de galerías mineras de El Soplao – La Florida*. Informe interno para “Cueva El Soplao” y Consejería de Cultura, Turismo y Deporte del Gobierno de Cantabria. Memoria y planos.
- Jordá-Bordegore, L. y Jordá, R. 2011. Historia de las minas de La Florida. En: Durán, J. J. (Ed.). *El Soplao. Una Ventana a la Ciencia Subterránea*. El Soplao, S.L., Cantabria, 46-49.
- Jordá-Bordegore, L. 2011. Soplao: interacción de minas y túneles con sistemas kársticos. Aspectos estéticos. *Canteras y Explotaciones*, 529, 30-34.
- Mazarrasa, J. M. 1930. Estudio de criaderos minerales de la Provincia de Santander. *Boletín Oficial de Minas, Metalurgia y Combustibles*, Año XIV. Madrid, nº 159, páginas 631-651 y nº 160, 675-692.



Biología y cuevas

A. de la Losa Román, *et al.*, 2018. Estudio de la agresividad del peróxido de hidrógeno usado en el tratamiento del mal verde en cuevas turísticas. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 211-222.

Estudio de la agresividad del peróxido de hidrógeno usado en el tratamiento del mal verde en cuevas turísticas

A. de la Losa Román⁽¹⁾, C. Baquedano Estévez⁽¹⁾, P.A. Robledo Ardila⁽²⁾, J.J. Durán Valsero⁽¹⁾ y L. Moreno Merino⁽¹⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. C/Ríos Rosas 23. 28003 Madrid, España

(2) Instituto Geológico y Minero de España. C/ Felicià Fuster, nº7, 07006. Palma de Mallorca, Baleares.
a.delalosa@igme.es, c.baquedano@igme.es, pa.robledo@igme.es, jj.duran@igme.es, l.moreno@igme.es

RESUMEN

La aparición y propagación de algas y cianobacterias denominadas comúnmente como “mal verde” en cuevas turísticas, representa un serio problema tanto para los gestores como para el medio ambiente, debido a las alteraciones que produce en el sustrato y/o espeleotemas. A lo largo del tiempo, se han probado diferentes métodos para su eliminación, algunos mediante productos químicos. El objetivo de este trabajo es evaluar la agresividad del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en la eliminación del mal verde a través de la medida de la conductividad eléctrica (C.E.) de las aguas de lavado. El estudio se ha realizado sobre la roca caja y sobre espeleotemas procedentes de 8 cuevas representativas de distintos ambientes geológicos y geográficos de España: cueva de los Franceses (Palencia), cueva de Valporquero (León), cueva del Salnitre-Montserrat (Barcelona), cueva de Campanet (Mallorca), cueva de s Aigo (Menorca), cueva de Sant Josep (Castellón), cueva del Castañar (Cáceres) y gruta de las Maravillas (Huelva). El estudio ha permitido comprobar, mediante medidas de C.E. como las muestras saturadas presentan un carácter menos agresivo sobre las muestras, siendo el comportamiento de las mismas muy distintas en cada una de las cuevas consideradas.

Palabras clave: agresividad, conductividad eléctrica, cuevas turísticas, lampenflora, peróxido de hidrógeno (H_2O_2).

A study on the aggressiveness of hydrogen peroxide used in the treatment of lampenflora in show caves

ABSTRACT

The appearance and spread of algae and cyanobacteria commonly referred to as “Lampenflora” in show caves, represents a serious problem for both managers and the environment due to the alterations it produces in the substrate and/or speleothems. Over time, different methods for removing biofilms using chemical products have been tested. The aim of this work is to evaluate the aggressiveness of hydrogen peroxide (H_2O_2) in the elimination of Lampenflora through the measurement of the electrical conductivity (E.C.) of the washing water. The study was carried out on the bedrock and speleothems from 8 representative caves of different geological and geographical environments of Spain: Franceses cave (Palencia), Valporquero cave (León), Salnitre-Montserrat cave (Barcelona), Campanet cave (Majorca), s Aigo cave (Menorca), Sant Josep caves (Castellón), Castañar cave (Cáceres) and Maravillas cave (Huelva). The study has allowed to verify by means of EC how the samples of saturated water show a less aggressive character on the samples of rocks, having a very different behavior in each of the caves.

Keywords: aggressiveness, electric conductivity, hydrogen peroxide (H_2O_2), lampenflora, show caves.

Introducción

La iluminación artificial de las cuevas turísticas con luz convencional ha propiciado históricamente la aparición y proliferación de biofilms o microorganismos fototróficos, compuestos principalmente por algas y cianobacterias y conocidos como lampenflora o mal verde (Lefèvre, 1974; Aley, 2004; Mulec, 2012). Estos organismos colonizan los sustratos expuestos directamente a la luz artificial (figura 1), causando el biodeterioro físico y químico de los sustratos donde se instalen, con el consiguiente daño sobre la propia cueva y elementos que tienen un alto valor geológico y patrimonial, como los espeleotemas (Warscheid y Braams, 2000; Caneva et al., 2008).

En las últimas décadas se han publicado numerosos trabajos en la literatura científica internacional acerca de las comunidades de lampenflora, y sobre los métodos que se han empleado para prevenir y controlar su crecimiento en cuevas turísticas (Johnson, 1979; Merdenisianos, 2005; Cigna, 2011; Mulec y Kosi, 2009; Hebelka, 2014). Este control se ha realizado mediante dos actuaciones principales: 1) eliminación mediante compuestos químicos fuertemente oxidantes o mediante métodos mecánicos (cepillado o lavado con agua a presión) y 2) prevención o retraso del desarrollo de la lampenflora mediante técnicas de iluminación que reducen la actividad fotosintética produciendo además un estrés fisiológico en los organismos fotosintéticos, aminorando su crecimiento (iluminación discontinua, luces LED, etc.). Entre los citados los más empleados son los oxidantes, en especial el peróxido de hidrógeno, cuyo empleo se ha extendido ampliamente en numerosas cuevas turísticas.

En este trabajo se ensaya una metodología para evaluar la agresividad del peróxido de hidrógeno basada en mediciones de conductividad eléctrica de las soluciones de lavado. Esta metodología constituye una herramienta fácil y económica de ejecutar, aplicada a la evaluación y puesta en



Figura 1. Fragmentos de roca caja (A) y espeleotema (B) con presencia de comunidades de lampenflora recogidos en la cueva de los Franceses (Palencia) y las cuevas de Sant Josep (Castellón), respectivamente.

marcha de protocolos dirigidos a optimizar la eliminación de las comunidades de lampenflora en cuevas turísticas mediante peróxido de hidrógeno.

El uso del peróxido de hidrógeno en el tratamiento del mal verde en cuevas turísticas

A comienzos del siglo XXI, varios autores (Grobbelaar, 2000; Kubsova *et al.*, 2000; Faimon *et al.*, 2003) propusieron el uso de peróxido de hidrógeno como agente alternativo al uso de hipocloritos, evitando así varios inconvenientes ambientales, en concreto la liberación de cloro gaseoso, un compuesto muy tóxico que contamina la atmósfera, genera olores desagradables e incluso acidifica las aguas kársticas y contribuye a la erosión de las formaciones de carbonato cálcico (Faimon *et al.*, 2003; Mulec y Kosi, 2009).

El peróxido de hidrógeno es un líquido incoloro, miscible con agua en todas las proporciones y cuyo uso no deja residuos que puedan afectar de forma negativa al medioambiente, ya que se disocia en oxígeno y agua (Grobbelaar, 2000), no liberando ninguna sustancia tóxica tras su degradación. No obstante, uno de los problemas de la utilización del H_2O_2 en cuevas, donde es frecuente que exista materia orgánica en la superficie de los espeleotemas, es la generación de CO_2 por la reacción, constituyendo un ataque directo a la superficie del espeleotema. Esta sustancia es utilizada desde hace mucho tiempo como agente antiséptico y antibacteriano en el ámbito sanitario y como blanqueador o desinfectante en numerosas industrias, siendo su forma no diluida un oxidante muy corrosivo y agresivo de difícil manejo. Debido a este último aspecto, Mulec y Kosi (2009) advierten que resulta clave estimar una concentración suficiente para destruir la lampenflora y no deteriorar los espeleotemas. Así, en base a los ensayos realizados en la cueva de Katerinska (República Checa), Faimon *et al.* (2003) consideraron que una concentración umbral de un 15%, aplicada tres veces durante un periodo de entre dos a tres semanas, es suficiente para destruir las cianobacterias, algas y musgos poco desarrollados.

No obstante, varios autores señalan la dificultad de eliminar, con una única aplicación, los crecimientos altamente desarrollados o aquellas comunidades de lampenflora que están incrustadas en el sustrato de carbonato de calcio (Faimon *et al.*, 2003; Esteban, 2014; Mulec, 2014). En relación a ello, existen dos formas de aumentar la efectividad del tratamiento con H_2O_2 y reducir el número de aplicaciones: 1) retirar las acumulaciones de musgos y helechos antes de la aplicación del peróxido, evitando así mismo realizar el tratamiento durante los periodos húmedos tras fuertes lluvias (Mulec y Glažar, 2011) y 2) aumentar la concentración umbral del 15% de H_2O_2 . Los ensayos realizados por Esteban (2014), en las grutas de Ortigosa de Cameros (España), emplearon una concentración del 25%, sin que se detectaran efectos adversos en la biota natural de la cueva y en los espeleotemas. Sin embargo, este autor indica que estas aplicaciones deben realizarse en casos puntuales, ya que el uso de H_2O_2 puede llegar a decolorar exageradamente las estructuras calcáreas.

Sin embargo, se ha comprobado que incluso una solución del 15%, produce sobre el lecho rocoso de carbonato un ataque más agresivo que el agua de naturaleza kárstica. Mulec (2012) especifica que el pH resultante de la solución de 15% de H_2O_2 , sin tampón, es 4 y, por tanto, podría inducir la disolución de las formaciones de caliza (Caneva *et al.*, 2008). Para solucionarlo, Faimon *et al.* (2003) propusieron saturar con carbonato cálcico la solución preliminar de peróxido de hi-

drógeno, añadiendo unos pocos fragmentos de roca caliza al menos 10 horas antes de su aplicación.

Una vez saturado, el peróxido de hidrógeno es un compuesto químico que proporciona buenos resultados y es más respetuoso con el medioambiente que los compuestos clorados, ya que su uso no acidifica las aguas subterráneas, no se generan malos olores ni gases nocivos y se minimiza la agresión del sustrato carbonatado (Grobbeelaar, 2000; Faimon *et al.*, 2003; Mulec, 2012; Hebelka, 2014). No obstante, debido al fuerte poder oxidante del H_2O_2 , varios autores hacen especial hincapié en la toma de medidas especiales para proteger los ojos y la piel durante su pulverización (Grobbeelaar, 2000; Cigna, 2011; Mulec y Glažar, 2011; Hebelka, 2014). No obstante, al comparar una concentración de peróxido al 15% con otra de hipoclorito sódico al 5%, el hipoclorito erradica de forma más rápida y eficaz los biofilms (Faimon *et al.*, 2003). De hecho, según estos autores, la elevada eficiencia del hipoclorito puede basarse en las propiedades biocidas del ácido hipocloroso no disociado y del ion hipoclorito: ambas especies dañan las membranas celulares, se difunden a través de las paredes celulares, alteran la actividad enzimática, y tal vez, afectan la regulación iónica (Claudi y Mackie, 1994). Por lo tanto, según Faimon *et al.* (2003), los gestores de las cavidades turísticas tendrían que decantarse por una de las siguientes alternativas: 1) una eliminación rápida y eficaz de lampenflora con hipoclorito, aunque suponga una carga negativa para el medio ambiente de la cueva, o 2) una erradicación aceptable desde el punto de vista medioambiental, pero menos eficaz, con peróxido de hidrógeno.

En algunas cavidades, como en la cueva del Tesoro (España), se han realizado estudios comparativos entre el peróxido de hidrogeno y el hipoclorito sódico (Jurado *et al.*, 2014). En el caso de esta cueva española, ambas limpiezas resultaron ser muy efectivas, manteniéndose las paredes y los espeleotemas limpios durante varios meses posteriores al tratamiento. No obstante, los administradores se decantaron por el tratamiento que empleaba peróxido de hidrogeno debido a su inocuidad ambiental. Otro caso es el tratamiento realizado en las cuevas Cango (Sudáfrica), donde Grobbellar (2000) sugirió aplicar H_2O_2 y combinarlo con el uso de radiación UV-C. Este procedimiento solo requirió usarse una vez cada seis meses, debido a la baja tasa de crecimiento de las algas. También se observó que el uso de H_2O_2 eliminó las pelusas y parte de la suciedad de los visitantes, acumulada con el tiempo en la superficie de las formaciones.

Metodología

Para llevar a cabo el estudio de agresividad propuesto se han seleccionado fragmentos de roca encajante y de espeleotemas de 8 cuevas españolas, tal y como se recoge en la figura 2 y en la tabla 1.

La elección de dichas cuevas se ha realizado en base a la representatividad de los materiales y su distribución geográfica. Se han tomado 4 muestras por cada una de las 8 cuevas seleccionadas, 32 muestras en total: 8 de roca encajante y 8 de espeleotemas, con y sin mal verde respectivamente. En esta primera fase de ensayos de agresividad, únicamente se han analizado los fragmentos de roca caja y espeleotemas que no estaban afectados por el mal verde, 16 en total (figura 3).

Las muestras han sido sometidas a una doble trituración mecánica, en una primera etapa me-



Figura 2. Localización de las cuevas turísticas seleccionadas para este trabajo. 1: cueva de los Franceses (Palencia); 2: cueva de Valporquero (León); 3: cueva del Salnitre-Montserrat (Barcelona); 4: cueva de Campanet (Mallorca); 5: cueva de s'Aigo (Menorca); 6: cuevas de Sant Josep (Castellón); 7: cueva del Castañar (Cáceres) y 8: gruta de las Maravillas (Huelva).

	Cueva	Localización	Materiales	Edad
1	Franceses	Revilla de Pomar, Palencia	Calizas	Triásico – Cretácico (215 - 66 Ma)
2	Valporquero	Vegacervera, León	Calizas	Carbonífero (360 - 300 Ma)
3	Montserrat	Collbató, Barcelona	Conglomerados calcáreos	Eoceno – Oligoceno (37 - 28 Ma)
4	Campanet	Campanet, Mallorca	Dolomías	Triásico – Jurásico (230 - 180 Ma)
5	s'Aigo	Ciutadella, Menorca	Calcarenitas	Mioceno (11 – 5 Ma)
6	Sant Josep	Vall d Uixó, Castellón	Dolomías, margas y calizas dolomíticas	Triásico (230 Ma)
7	Castañar	Castañar de Ibor, Cáceres	Pizarras, dolomías y areniscas	Precámbricos (>540 Ma)
8	Maravillas	Aracena, Huelva	Calizas y mármoles	Cámbrico (<500 Ma)

Tabla 1. Cuevas turísticas seleccionadas para este trabajo.



Figura 3. Muestras de rocas caja y espeleotemas sin mal verde, recogidas en algunas cuevas objeto de estudio.

diante una trituradora de rodillo (Humboldt modelo WEDAG) y posteriormente sometidas a una trituradora mixta (de mandíbulas y rodillo) con apertura regulable. La fracción resultante, ha sido tamizada obteniéndose un tamaño de muestra entre 0,1 y 0,5 mm de diámetro. Posteriormente, se han tomado 20 g de cada muestra y se han puesto en contacto con 200 ml de las soluciones de peróxido de hidrógeno, durante un tiempo de exposición de 15 días en modo de agitación discontinua.

Las soluciones en contacto con las muestras han sido de dos tipos: (A) peróxido de hidrógeno en una concentración de un 15%, sin saturar y (B) saturado. La saturación se ha realizado añadiendo 10 g/L de carbonato de calcio (CaCO_3) a la solución de H_2O_2 , dejando reaccionar y decantando la solución obtenida.

Para determinar el nivel de agresividad, se ha monitorizado el grado de disolución de los distintos materiales a través de mediciones continuas de conductividad eléctrica empleando un medidor

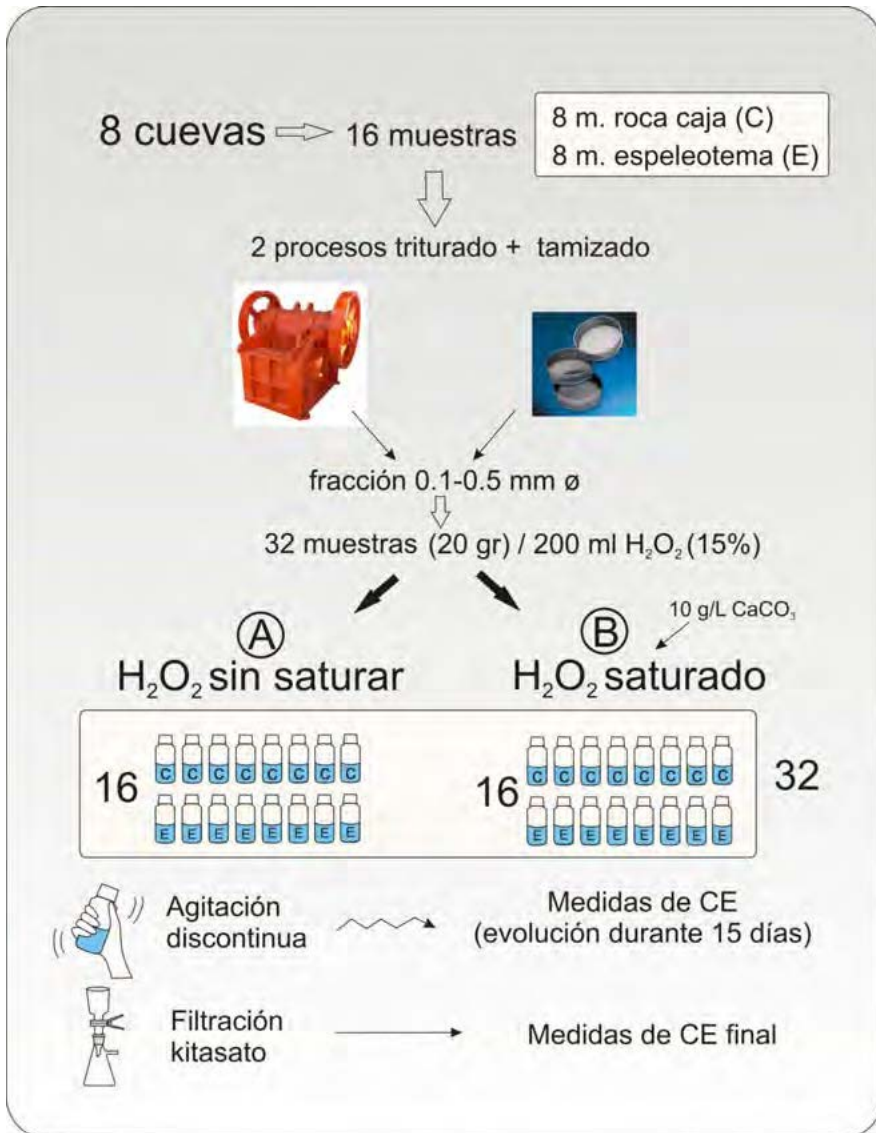


Figura 4. Metodología para el tratamiento de las muestras.

multiparamétrico HACH-HQ30d. Una vez finalizado el seguimiento, se ha realizado el filtrado de las soluciones empleando filtros Millipore de 0.45μ y se ha obtenido una medida final de la conductividad eléctrica (figura 4).

Resultados y discusión

Los resultados de la evolución de la conductividad eléctrica de las disoluciones de peróxido de hidrógeno en contacto con las muestras, saturadas y sin saturar, se presentan en las figuras 5 y 6. En la figura 7 se resumen los valores de las C.E. finales sobre las muestras filtradas.

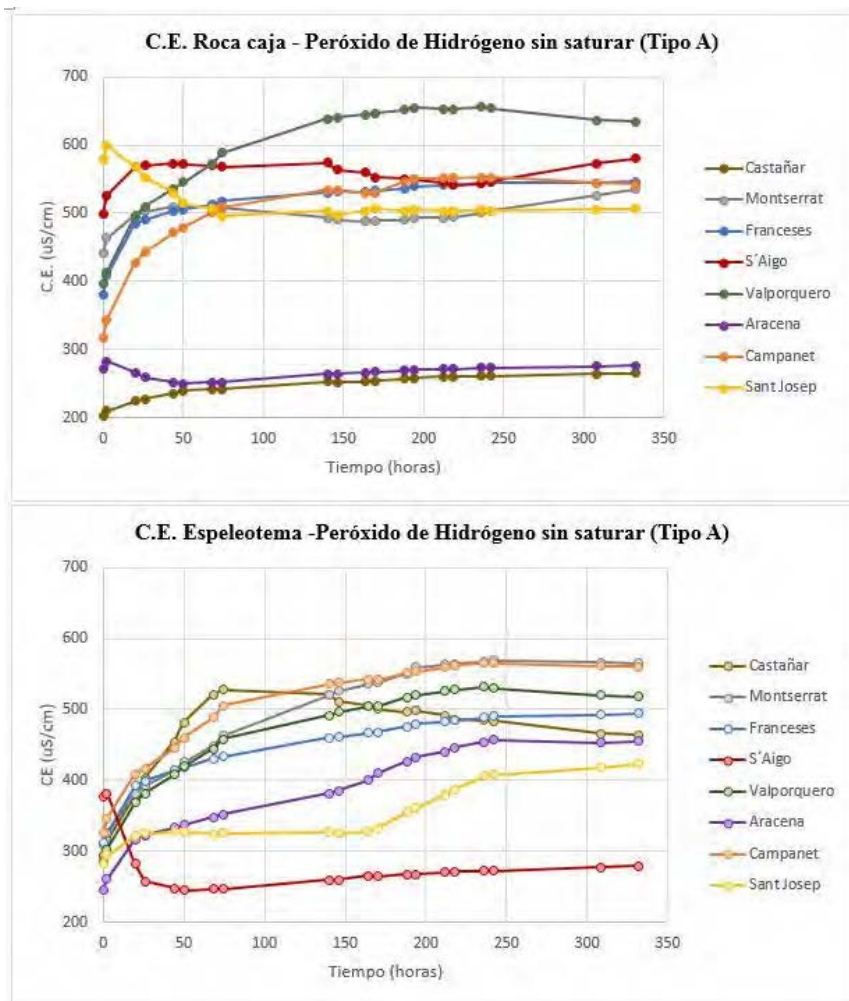


Figura 5. Evolución de la conductividad eléctrica en las muestras de roca caja y espeleotemas sometidas al peróxido de hidrógeno sin saturar (tipo A).

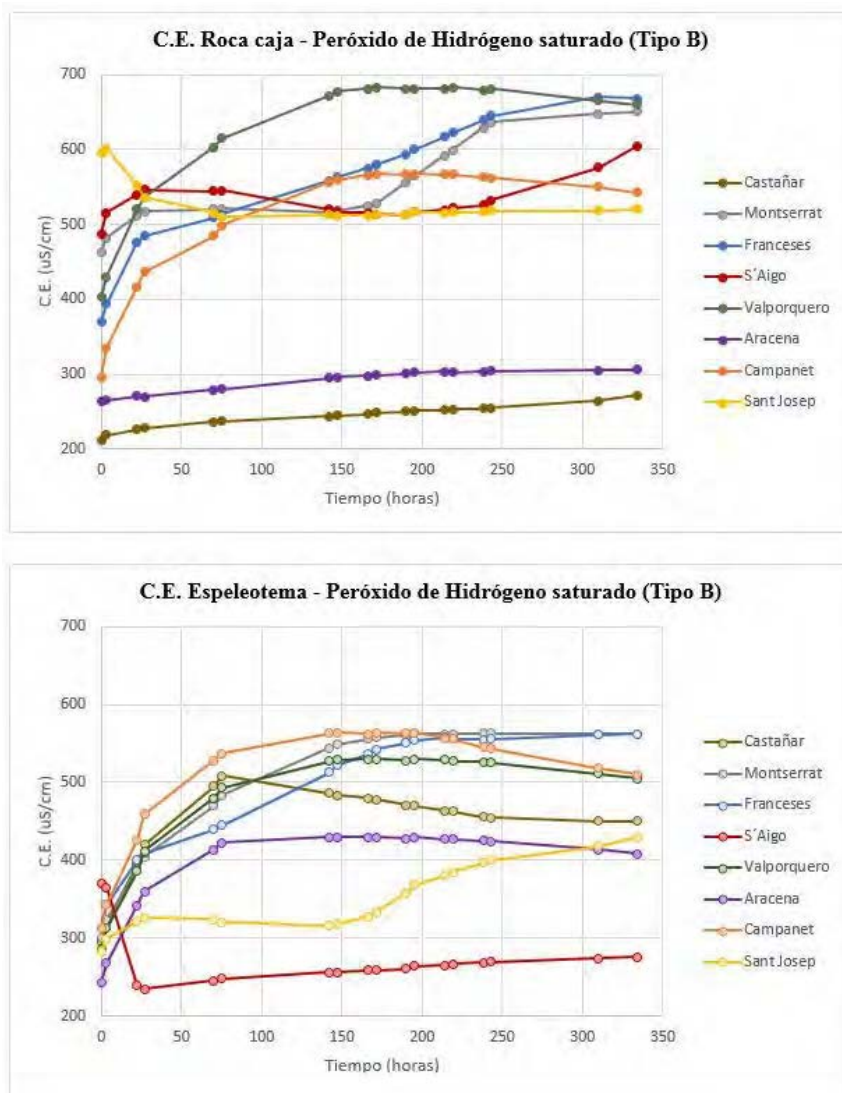


Figura 6. Evolución de la conductividad eléctrica en las muestras de roca caja y espeleotemas sometidas al peróxido de hidrógeno saturado (tipo B).

Como se puede observar en las gráficas de evolución, el comportamiento, tanto de las muestras de espeleotema como de roca caja, es muy similar en ambos tratamientos (solución saturada y sin saturar). Existe una respuesta generalizada en las muestras procedentes de la roca caja expuestas a la solución limpiadora, donde se produce un aumento rápido de la C.E. en las primeras 24 horas, con una tendencia posterior a la estabilización de los valores en el tiempo restante de experimentación. Sin embargo, en el caso de la cueva de Sant Josep el comportamiento es diferente, produciéndose un descenso de la C.E. al principio para estabilizarse aproximadamente

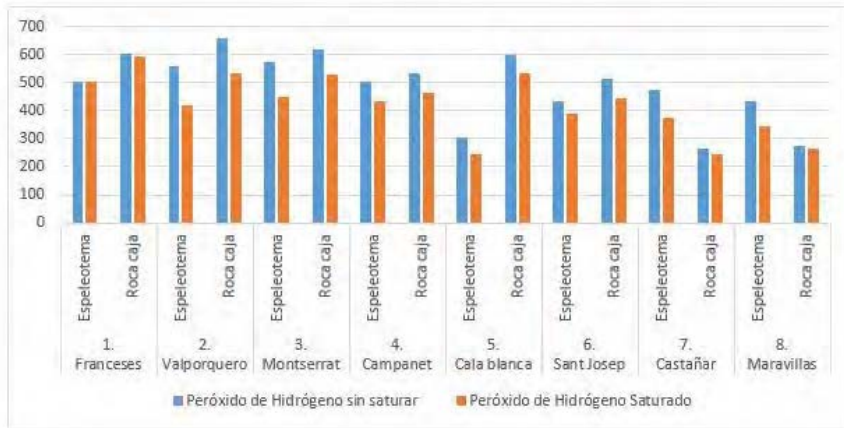


Figura 7. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de las soluciones de H_2O_2 , saturada y sin saturar.

tras 70 horas de contacto. Se separan del grupo las muestras procedentes de la cueva del Castañar y de la Gruta de las Maravillas, que dan lugar a soluciones de lavado con valores de C.E. sensiblemente más reducidos que el resto, entre 200 y 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Al analizar los resultados de las muestras procedentes de espeleotemas, se observa, como el periodo de incremento de la C.E. es sensiblemente más prolongado, pasando de 24 a 72 horas (en la solución saturada y sin saturar). Así mismo, el periodo de estabilización es mucho más prolongado. En el caso de la muestra de Sant Josep se alcanza rápidamente una aparente estabilización, para tras 150 horas volver a ascender la C.E. a valores similares al resto de las muestras. Al igual que sucede en el resto de los ensayos, la muestra de la cueva de s Aigo, presenta un comportamiento anómalo. En las primeras 24 horas se produce un descenso de la conductividad, para luego ascender de forma lineal y sostenida durante todo el ensayo. Las muestras procedentes de esta cueva presentan los valores de conductividad más bajos de todas las sometidas a estudio.

Las muestras sin saturar presentan siempre valores de C.E mayores que las saturadas, es decir, son más agresivas, de acuerdo con los estudios de Faimon *et al.* (2003). Esta diferencia de agresividad no se expresa igual en todas las cavidades (ver figura 7), así, mientras en la cueva de los Franceses apenas hay diferencia entre el empleo de la solución saturada o sin saturar (valores de 503-504 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en espeleotema y 593-602 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en roca caja), en el caso de Valporquero (valores de 419-557 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en espeleotema y 536-657 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en roca caja) y Monsterrat (valores de 448-572 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en espeleotema y 527-621 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en roca caja), las diferencias son considerables y claramente se ha de recomendar el uso de la solución saturada.

Destacar como resultado que, en general, la roca caja, es más fácilmente atacable por las soluciones de lavado que los espeleotemas, como se deduce al comparar la C.E. de las soluciones de lavado de ambas. Este hecho se puede explicar tanto desde el punto de vista de la composición mineralógica (tabla 1), como del grado y tipo de alteración, la textura dominante, etc., trabajos que están actualmente en marcha. Únicamente dos de las cuevas estudiadas presentan un comportamiento distinto al descrito: la cueva del Castañar (Cáceres) y la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva). Esto podría deberse a la naturaleza geológica de los materiales meta-

mórficos que componen la roca encajante en ambas cuevas. En términos generales, los materiales metamórficos, al haber estado sometidos a procesos de alta temperatura y presión, han provocado la recristalización de las calizas (en el caso de los mármoles), produciéndose un aumento de la compacidad y variando su estructura cristalina y solubilidad. Por otra lado, en el caso de las pizarras, suelen presentar una gran homogeneidad textural y composición mineralógica poco variable. Así pues, los materiales carbonáticos, que constituyen los espeleotemas en estos casos, son más solubles que las pizarras y los mármoles en los que se encajan. El reconocimiento al microscopio, no obstante, permitirá realizar un estudio con más detalle del grado de alteración de los materiales frente a las soluciones de peróxido de hidrógeno.

Conclusiones y recomendaciones

Este trabajo ha permitido comprobar que las soluciones de peróxido de hidrógeno disminuyen sensiblemente su agresividad cuando se saturan con carbonato cálcico. Las soluciones saturadas no solo disuelven menos la roca ensayada, sino que el máximo de disolución se alcanza sensiblemente antes que en el caso de las soluciones sin saturar, mostrando así una cinética diferente. De todo lo anteriormente expuesto, se deduce la necesidad de seguir trabajando en la identificación de la composición mineral y textural para cada una de las cuevas sometidas a estudio, ya que las muestras obtenidas presentan un comportamiento muy diferente entre ellas.

Esta metodología constituye una herramienta económica y fácil de implementar si se quiere comparar la agresividad de diferentes tratamientos para la limpieza del mal verde. De este modo, estos estudios pueden servir para proponer alternativas que sean ambientalmente más eficaces y más sostenibles sin que la roca encajante y/o el espeleotema sufran daños irreversibles.

Agradecimientos

Agradecemos a los gestores y propietarios de todas las cuevas que han colaborado en este trabajo por facilitar el acceso y la toma de muestras.

Referencias

- Aley, T. 2004. Tourist Caves: Algae y Lampenflora. In: Gunn, J. (ed.), *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. Taylor y Francis-Routledge, New York, 1568-1570.
- Caneva, G., Nugari, M.P. y Salvadori, O. 2008. *Plant biology for cultural heritage: biodeterioration and conservation*. Getty Conservation Institute, Los Angeles, 408.
- Cigna, A. 2011. The problem of Lampenflora in Show Caves. *Proceedings of the 6th ISCA Congress*. Slovak Caves Administration, 201-205.
- Claudi, R. y Mackie, G.L. 1994. *Practical manual for zebra mussel monitoring and control*. Lewis Publishers, Boca Raton, United States of America, 810.
- Esteban, R. 2014. Actuaciones para la eliminación del tapiz algal presente en los espeleotemas en la rehabilitación de las grutas visitables de La Paz y de La Viña en Ortigosa de Cameros – La Rioja. *Zubia*, 32, 7-32.
- Faimon, J., Stelcl, J., Kubesova, S. y Zimák, J. 2003. Environmentally acceptable effect of hydrogen peroxide on cave "lamp-flora", calcite speleothems and limestones. *Environmental Pollution*, 122, 417-422.

- Grobbelaar, J. U. 2000. Lithophytic algae: A major threat to the karst formation of show caves. *Journal of Applied Phycology*, 12, 309-315.
- Hebelka, J. 2014. *Methodology of lampenflora removal in caves accessible for tourists*. The cave administration of the Czech Republic, Pr honice, Czech Republic, 15 pp.
- Johnson, K. 1979. Control of Lampenflora at Waitomo Caves, New Zealand. *Cave Management in Australia III. Proceedings of the 3rd Australasian Cave Tourism and Management Conference*, Mt. Gambier, Adelaide, Australia, 105-122.
- Jurado, V., Hernández-Mariné, M., Rogerio-Candelera, M.A., Domínguez-Moñino, I., S. Gutiérrez-Patricio, S. y Saiz-Jiménez, C. 2014. La Cueva del Tesoro: un paraíso microbiano. *Cuevatur 2014. Primer Congreso Iberoamericano y Quinto Congreso Español sobre Cuevas Turísticas*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), Aracena, España, 433-441.
- Kubesová, S., Faimon, J., Stelcl, J., y Zimák, J. 2000. The study of lampflora in the Katerinská Cave. In: Hazslinszky, T. (ed.), *Proceedings of International Conference on Cave Lighting, 15-17 November, Budapest, Hungary*. Hungarian Speleological Society. 14-15.
- Merdenisianos, C. 2005. The maladie verte (green disease) of the caves. *Proceedings of 14th International Congress of Speleology*, Athens-Kalamos, Greece, 160-162.
- Mulec, J. 2012. Lampenflora. In: White, W.B. y Culver, D.C. (eds.), *Encyclopedia of caves*. Elsevier, Amsterdam, Holland, 451-456.
- Mulec, J. y Kosi, G. 2009. Lampenflora algae and methods of growth control. *Journal of Cave and Karst Studies*, 71 (2), 109-115.
- Mulec, J. y Glažar, S. 2011. First results on use of a hydrogen peroxide solution in Postojnska jama (Slovenia) to remove lampenflora. In: Bella, P. y Gazík, P. (eds.), *Proceedings of the 6th ISCA Congress*. Slovak Caves Administration, Slovenia, 128-131.
- Mulec, J. 2014. Human impact on underground cultural and natural heritage sites, biological parameters of monitoring and remediation actions for insensitive surfaces: Case of Slovenian show caves. *Journal for Nature Conservation*, 22, 132-141.
- Warscheid, T. y Braams, J. 2000. Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46, 343-368.

C. Baquedano Estévez, et al., 2018. La lucha contra el mal verde en las cuevas turísticas españolas. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 223-234.

La lucha contra el mal verde en las cuevas turísticas españolas

C. Baquedano Estévez⁽¹⁾, A. de la Losa Román⁽¹⁾, J.J. Durán Valsero⁽¹⁾, P.A. Robledo Ardila⁽²⁾
y L. Moreno Merino⁽¹⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. C/Ríos Rosas 23. 28003 Madrid, España.

(2) Instituto Geológico y Minero de España. C/ Felicià Fuster nº7, 07006. Palma de Mallorca, Baleares.
c.baquedano@igme.es, a.delalosa@igme.es, jj.duran@igme.es, pa.robledo@igme.es, l.moreno@igme.es

RESUMEN

Desde su apertura y acondicionamiento para la visita, la mayoría de cuevas turísticas españolas han sufrido un problema ligado a la iluminación artificial: el desarrollo y propagación de una compleja comunidad de organismos fototróficos, conocidos como "lampenflora" o "mal verde". Esta biota está formada principalmente por algas y cianobacterias, *biofilms* que causan la degradación de los sustratos colonizados, disminuyendo así el valor patrimonial y por ende, el valor turístico de la cavidad. El fenómeno se hizo mundialmente conocido en la década de 1960, debido a los daños producidos en las pinturas rupestres de la cueva de Lascaux (Francia), dando lugar en años posteriores a un amplio número de trabajos y publicaciones, en las que se estudia el problema y se proponen soluciones en las principales cuevas turísticas del mundo. Actualmente, se siguen dos estrategias complementarias para combatir las comunidades de lampenflora: por un lado, impedir su colonización controlando la iluminación, y por otro, eliminándolas mediante agentes químicos o métodos físicos y ambientales. En este trabajo se presenta una revisión del estado del arte acerca de los principales métodos empleados en el control y en la eliminación del mal verde en cuevas turísticas españolas.

Palabras clave: biodeterioro, cuevas turísticas, lampenflora, métodos de eliminación.

The fight against lampenflora in Spanish show caves

ABSTRACT

Since its opening and conditioning for the visit, the majority of Spanish show caves have suffered a problem linked to their artificial lighting: the development and spread of a complex community of phototrophic organisms, known as "lampenflora" or "mal verde". This biota is composed mainly of algae and cyanobacteria, biofilms that cause the degradation of colonized substrates, decreasing the heritage value and, therefore, the tourist value of the cavity. The phenomenon became globally known in the 1960s, due to the damage produced in the cave paintings of the Lascaux cave (France). In the following years, this fact has given rise to a large number of works and publications, in which the problem and solutions are proposed in the main show caves of the world. Currently, two complementary strategies are being followed to combat lampenflora communities: on the one hand, to prevent their colonization, controlling lighting, and on the other, eliminating them through chemical agents or physical and environmental methods. The objective of this work is to carry out a review of the state of the art about the main methods used in the control and elimination of lampenflora in Spanish show caves.

Keywords: biodeterioration, disposal methods, lampenflora, show caves.

Introducción

Durante los últimos siglos y hasta la actualidad, las cuevas se han convertido en un potente re-

curso turístico. Se estima que existen alrededor de 50 cuevas turísticas en España catalogadas como tal, que atraen a más de 5 millones de visitantes al año y crean alrededor de 3000 empleos, incluyendo actividades indirectas relacionadas (transporte, alojamiento, etc.) y generando unos ingresos de 100 millones de euros anuales. El aumento de estas visitas geoturísticas ha contribuido al desarrollo socioeconómico en muchas comarcas y regiones, como es el caso de la cueva de El Soplao (Cantabria), la cueva de Campanet (Mallorca), la Gruta de las Maravillas (Huelva) o las cuevas de Sant Josep (Castellón), entre otras. En algunos casos, las cuevas además constituyen un notable recurso científico, pues muchas de ellas contienen importantes registros sedimentarios que han proporcionado una valiosa información paleoambiental, como por ejemplo la cueva de Nerja (Málaga). Durante siglos, el llamado "turismo subterráneo", se llevó a cabo de manera muy rudimentaria, empleando antorchas o lámparas de aceite. Con el paso de los años, algunas cuevas habilitaron una entrada artificial, delimitaron un recorrido e incorporaron equipos de iluminación eléctrica. Si bien este conjunto de actuaciones permitieron un mejor disfrute de las cavidades, supusieron una modificación muy significativa de las condiciones ambientales naturales (Hoyos *et al.*, 1998) como sucedió, por ejemplo, en la Gruta de las Maravillas (Huelva) (Pulido-Bosch *et al.*, 1997). Pronto, se observó que la instalación de fuentes de luz artificial generaba el desarrollo y la proliferación de una compleja comunidad de organismos fototróficos en las cercanías de las lámparas. No fue hasta mediados del siglo XX cuando Dobat (1963) introdujo por primera vez la palabra "lampenflora" (flora de las lámparas), término que se emplea internacionalmente para identificar este fenómeno, aunque también se conoce como "mal verde" en español. Aunque la presencia de lampenflora no se ha tenido en cuenta en la gestión de muchas cuevas turísticas (Saiz-Jiménez, 2012), representa un grave problema ya que se trata de una comunidad invasora oportunista de los ambientes subterráneos antropizados, donde la luz que emplean estos organismos para desarrollarse es artificial y, por tanto, crecen en lugares donde en circunstancias naturales no lo harían (Mulec, 2012). El problema se agrava en algunas cuevas concretas, ya que los sitios de mayor interés turístico (pinturas rupestres o formaciones geológicas de alto valor), normalmente están mejor iluminados que el resto de la cavidad y convierte esas zonas en las más atractivas para ser colonizadas por microorganismos. En este trabajo se presenta una revisión bibliográfica crítica de los métodos de control y eliminación del mal verde, centrado en el caso de las cuevas turísticas españolas.

Características generales y problemas ocasionados por la lampenflora

Las cianobacterias, junto con las algas verdes y doradas son los microorganismos más comunes identificados en las comunidades de lampenflora (Rajczyk, 1989; Mulec, 2012). Aunque este conjunto de algas pueden vivir de forma independiente, suelen formar comunidades multicelulares complejas denominadas "*biofilms*" en donde coexisten cianobacterias y algas junto con bacterias, hongos y levaduras (Cooksey, 1992; Jurado *et al.*, 2010). Químicamente, los *biofilms* se componen de agua (70-90% aprox.), organismos con diverso metabolismo y una matriz hidratada de sustancias poliméricas extracelulares (EPS) (Warscheid y Braams, 2000). Esta matriz proporciona una mayor protección contra fuentes de estrés ambiental (procesos de desecación o exposición a contaminantes atmosféricos), una mayor retención de agua y una mejor circulación de nutrientes dentro del *biofilm* (Lawrence *et al.*, 1991; Watnick y Kolter, 2000). Además, se ha demostrado que estos microorganismos unicelulares presentan una forma de comunicación intercelular a través de señales químicas ("*quorum sensing*"), que les permite actuar de forma co-

ordinada, como organismos multicelulares (Annous *et al.*, 2009). En las fases tempranas de la colonización, las cianobacterias y las algas eucarióticas desempeñan el papel más importante, posteriormente se desarrollan musgos y helechos y, finalmente, pueden surgir plantas vasculares en forma de brotes germinantes (Merdenisianos, 2005; Cigna, 2011 a) (figura 1). En algunos estudios de diversidad y estructura de los *biofilms* de varias cuevas españolas; cueva de Zuheros (Córdoba), cueva de Nerja (Málaga) y cueva del Salnitro-Montserrat (Barcelona), Roldán y Hernández-Mariné (2009) observaron que el grosor y la diversidad de los *biofilms* disminuyen según la intensidad de la luz. La disponibilidad de radiación fotosintética fue el parámetro que determinó si los microorganismos que forman los *biofilm* eran fotosintéticos (algas y cianobacterias en áreas iluminadas) o heterótrofos (hongos y bacterias en zonas de penumbra).

La colonización de las diferentes zonas de la cavidad depende de varios factores, siendo los principales la biorreceptividad del sustrato y las condiciones ambientales del medio subterráneo. En base al tipo de sustrato, el desarrollo de lampenflora se limita generalmente a superficies húmedas o mojadas, localizadas en superficies blandas o de textura rugosa, (Gillieson, 1996). En cuanto a las condiciones ambientales, en las cuevas, ya sean turísticas o no, casi siempre se alcanzan niveles adecuados de humedad y nutrientes para el desarrollo de los *biofilms* (Johnson, 1979), de forma que, basta con añadir algún tipo de iluminación artificial para que estas comunidades se desarrollen de forma óptima (Cigna, 2011 a). Además, en las cuevas turísticas, los residuos que introducen los visitantes (pelos, piel seca, polvo de los zapatos) junto con los altos niveles de CO₂, contribuyen al crecimiento más rápido del mal verde (Aley, 2004; Mulec, 2012). Martínez y Asencio (2010), mostraron que en la cueva de Gelada (Alicante) el principal factor de estrés de los *biofilms* fue la falta de luz, seguida por déficit de humedad, falta de nutrientes y por último, variaciones de temperatura.

La proliferación de microorganismos fotosintéticos en ambientes subterráneos o monumentos hipogeos es considerada como una amenaza importante (Albertano, 2012). La cueva de Lascaux (Francia) fue la primera en la que se desarrolló un complejo estudio sobre los procesos de biodeterioro que producían los microorganismos fotosintéticos sobre las pinturas rupestres (Lefèvre *et al.*, 1974). En esta cueva se han producido varias crisis biológicas, provocando el cese de la actividad turística (Bastian *et al.*, 2010). En el ámbito español, Del Rosal (2015) pone como ejem-



Figura 1. A: comunidades de lampenflora en la cueva de Valporquero (León). B: cueva de Nerja (Málaga).

pló varios casos en los que el desarrollo “incontrolado” de microorganismos ha representado un serio problema: en la cueva de Tito Bustillo (Asturias), numerosos espeleotemas están colonizados por lampenflora; la cueva de Castañar de Ibor (Cáceres) tuvo que ser cerrada al público en 2008, debido a un brote fúngico causado por el vómito de un visitante; y por último, el crecimiento de microorganismos fotosintéticos debido a una intensa iluminación artificial motivó el cierre de la cueva de Altamira (Cantabria) en el año 2002. Los efectos negativos de la lampenflora incluyen cambios en la apariencia estética, (coloraciones), deterioro físico (disgregaciones de la roca caja y los espeleotemas) y químico (disoluciones) del soporte colonizado (Warscheid y Braams, 2000; Caneva et al., 2008). La presencia de lampenflora proporciona un aspecto sucio y verdoso, con la consiguiente pérdida de valor estético de la cavidad. El biodeterioro físico incluye todos los mecanismos que producen cambios estructurales y pérdida de cohesión del sustrato debida al crecimiento de los microorganismos, y el biodeterioro químico ocasiona procesos de disolución o precipitación asociados a la actividad metabólica.

Métodos de control y eliminación de lampenflora

Históricamente, el control de las comunidades de lampenflora implica dos actuaciones: la eliminación de las poblaciones vegetales existentes y la prevención o el retraso de su desarrollo (Hebelka, 2014). Los métodos de control pueden ser clasificados en tres categorías principales: físicos (1), químicos (2) y ambientales (3).

1.1 Cepillado y lavado con agua a presión: la eliminación mecánica, empleando cepillos e inyectoros de agua presurizada, son dos técnicas que han sido empleadas tradicionalmente para abordar el problema de la lampenflora, ya que ofrecen resultados instantáneos sin la generación de productos tóxicos (Ramírez-Trillo y González-Ríos, 2014). Sin embargo, en la actualidad, se ha minimizado el uso de estas técnicas porque su eficacia a largo plazo es muy baja (Hebelka, 2014), la contaminación biológica pueda dispersarse hacia áreas no afectadas (Rajczy, 1989) y su uso repetido puede causar daños en frágiles estructuras como los espeleotemas (Spate y Moses, 1994; Merdenisianos, 2005; Mulec y Kosi 2009). Además, la presencia de algas calcificadas en muchos espeleotemas, hace que este tipo de métodos mecánicos resulten poco efectivos sin dañar la estructura externa (Esteban, 2014). Según Johnson (1979), la única excepción en la que podría emplearse agua a alta presión sería después de un tratamiento con productos químicos, para eliminar el material vegetal muerto.

1.2 Camuflaje: los métodos del camuflaje pretenden ocultar las comunidades de lampenflora, evitando su impacto visual. En la cueva de las Ventanas (Granada), se disimularon las colonias instaladas en zonas terrosas mezclando la superficie con materiales más profundos. Los sustratos más consistentes se frotaron con arcilla y tierra y, por último, se voltearon aquellas piedras sueltas que estaban afectadas (Ramírez-Trillo y González-Ríos, 2014).

1.3 Controles de acceso: los microorganismos que forman las comunidades de lampenflora pueden acceder al interior de las cuevas al ser arrastrados accidentalmente por corrientes de aire, flujos de agua, sedimentación gravitacional o debido al tránsito de la fauna cavernícola y los visitantes (Vegh, 1989; Cigna, 2012; Del Rosal, 2015). Varios autores han propuesto diferentes maneras de reducir estos factores de entrada de la lampenflora en cuevas turísticas. Uno de los

procedimientos más extendido entre las cuevas turísticas es limitar el número de visitantes en función de la denominada “capacidad de carga” (Hoyos *et al.*, 1998; Cigna, 2011b), disminuyendo el número de personas o el tiempo que pasan en el interior de la cueva Merdenisianos (2005) y Cigna (2011b) proponen también la colocación de puertas dobles y cortinas de aire en la entrada de las cavidades, con el objetivo de proteger la cueva de los cambios en las condiciones microclimáticas, evitando así los flujos de aire en el interior de la cueva y reduciendo la suciedad depositada por los visitantes. Adicionalmente, Jurado y Saiz-Jiménez (2016) recomiendan llevar durante la visita en cuevas muy singulares una vestimenta y calzado protectores, guantes y mascarilla. Por ejemplo, estas medidas se han implantado activamente en la cueva de Castañar de Ibor (Cáceres) y en la cueva de Altamira (Cantabria).

2.1 Hipocloritos: el hipoclorito de sodio, NaClO, cuya disolución en agua es conocida como lejía, es un compuesto químico, fuertemente oxidante, que desde finales de los años 70 ha sido empleado, en una concentración cercana al 5%, para eliminar las comunidades de lampenflora (Zelinka *et al.*, 2002; Aley, 2004; Mulec, 2012). El tratamiento con NaClO está aprobado y extendido en numerosas cuevas turísticas, ya que no produce daños significativos en las formaciones y el resultado final es satisfactorio. Hebelka (2014) señala que la eficacia de este método es variable, pues depende, entre otros factores, de la concentración de hipoclorito en la solución utilizada, del tipo de material vegetal a eliminar o de la antigüedad del agente químico. No obstante, el uso de NaClO, puede representar una carga negativa para el medio ambiente de la cueva (Faimon *et al.*, 2003; Mulec y Kosi, 2009) ya que, entre los subproductos originados en su oxidación, se puede producir la liberación de cloro gaseoso, un compuesto que es muy tóxico por vía inhalatoria o dérmica. Además, el cloro liberado contamina la atmósfera, genera olores desagradables e incluso acidifica las aguas endokársticas, facilitando la disolución de las formaciones de carbonato cálcico. Estas consecuencias pueden minimizarse si la cueva en la que se aplica el tratamiento está suficientemente ventilada (Johnson, 1979; Cigna, 2011a) y se siguen las recomendaciones recogidas por Hebelka (2014) entre las que destacan: 1) la aplicación general debe realizarse antes o después de la temporada turística, al final del período de hibernación de los murciélagos y/o evitando periodos de fuertes lluvias; 2) en aquellas cuevas con extensas áreas colonizadas, que tengan una ventilación insuficiente o con formaciones sensibles afectadas, la zona de aplicación debe dividirse en varias áreas más pequeñas, para ser tratadas durante varias semanas consecutivas; 3) es aconsejable revisar las áreas tratadas después de la aplicación y repetir el rociado entre 2-3 veces para eliminar los organismos supervivientes; 4) el personal que ejecute su aplicación debe usar un mono de trabajo, botas, guantes de goma, gafas de protección y respirador. El hipoclorito de calcio, Ca(ClO)₂, al igual que el hipoclorito de sodio, es un compuesto de degradación rápida con un fuerte efecto oxidante que también ha sido empleado en el control de las comunidades de lampenflora (Hebelka, 2014). La concentración necesaria para el control efectivo de la lampenflora varía entre un 2% y un 4% (Johnson, 1979). Respecto a su eficacia en la limpieza de espeleotemas, en la cueva de Nerja (Málaga) se realizó un ensayo exhaustivo (Garrido *et al.*, 2007) con una dilución de agua saturada en calcita e hipoclorito cálcico (2%). Las zonas tratadas mostraron una intensa colonización fúngica pocos días después de la aplicación del tratamiento, que fue eliminada tras una nueva aplicación de hipoclorito. Transcurrido un año del proceso de limpieza, la recolonización del sustrato se definió como “prácticamente inapreciable”. Sin embargo, 5 años después, las zonas que habían sido limpiadas mostraban de nuevo colonización por microorganismos fotosintéticos. Los efectos ambientales negativos del tratamiento con Ca(ClO)₂ son similares al uso de NaClO, ya que ambos compuestos

están basados en la acción del cloro. Por último, el uso de hipocloritos también puede causar coloración rojiza en los sustratos de carbonato, debido a la oxidación de Fe^{2+} en Fe^{3+} , el cual precipita como un hidróxido de hierro amorfo $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Mulec y Kosi, 2009).

2.2 Peróxido de hidrógeno: con el fin de evitar los inconvenientes ambientales del uso de hipocloritos en el tratamiento del mal verde, a comienzos del siglo XXI, varios autores propusieron el uso de peróxido de hidrógeno, H_2O_2 , como un agente alternativo (Grobbelaar, 2000; Faimon et al., 2003). Esta sustancia es utilizada desde hace mucho tiempo como agente antiséptico y antibacteriano en el ámbito sanitario y como blanqueador o desinfectante en numerosas industrias, siendo su forma no diluida un oxidante muy corrosivo y agresivo de difícil manejo. Por este último aspecto, Mulec y Kosi (2009) advierten que resulta clave estimar una concentración suficiente para destruir la lampenflora y no deteriorar los espeleotemas. Así, en base a los ensayos realizados por Faimon y otros (2003), consideraron que una concentración umbral de un 15%, aplicada tres veces durante un periodo de, entre dos a tres semanas, es suficiente para destruir las cianobacterias, algas y musgos poco desarrollados. Se ha comprobado que incluso una solución del 15%, produce sobre el lecho rocoso de carbonato un ataque más agresivo que el agua de naturaleza kárstica. El pH resultante de la solución de 15% de H_2O_2 , sin tampón, es 4 y, por tanto, podría inducir la disolución de las formaciones carbonatadas (Caneva et al., 2008). Para solucionarlo, Faimon y otros (2003) propusieron saturar con carbonato cálcico la solución preliminar de peróxido de hidrógeno, añadiendo unos pocos fragmentos de roca caliza unas horas antes de su aplicación. Una vez saturado, el peróxido de hidrógeno es un compuesto químico que proporciona buenos resultados y es más respetuoso con el medioambiente que los compuestos clorados, ya que se disocia en oxígeno y agua, no liberando ninguna sustancia tóxica tras su degradación. Además, no genera malos olores ni gases nocivos y se minimiza la agresión del sustrato (Grobbelaar, 2000; Faimon et al., 2003; Mulec, 2012). En casos puntuales, con comunidades de lampenflora altamente desarrolladas, pueden emplearse concentraciones umbrales mayores del 15%, como en el caso de las grutas de Ortigosa de Cameros (La Rioja) con especial cuidado, ya que uso de H_2O_2 puede llegar a decolorar exageradamente las estructuras carbonáticas (Esteban, 2014). Otra opción para aumentar su efectividad es retirar previamente las acumulaciones de musgos y helechos y evitar realizar el tratamiento durante los periodos húmedos tras fuertes lluvias (Mulec y Glažar, 2011). Debido al fuerte poder oxidante del H_2O_2 , varios autores hacen especial hincapié en proteger los ojos y la piel durante su pulverización (Grobbelaar, 2000; Cigna, 2011a; Hebelka, 2014).

Es necesario indicar que, al comparar una concentración de peróxido al 15% con la misma concentración de hipoclorito sódico al 5%, el hipoclorito erradica de forma más rápida y eficaz los *biofilms*, debido a las propiedades biocidas del ácido hipocloroso y del ion hipoclorito (Claudi y Mackie, 1994; Faimon et al., 2003). En algunas cavidades, como en la cueva del Tesoro (Málaga), se han realizado estudios comparativos entre el peróxido de hidrogeno y el hipoclorito sódico (Jurado et al., 2014). Ambas limpiezas resultaron ser muy efectivas, manteniéndose las paredes y los espeleotemas limpios durante varios meses posteriores al tratamiento. No obstante, los administradores se decantaron por el tratamiento que empleaba peróxido de hidrogeno debido a su inocuidad ambiental. Por tanto, los gestores de las cavidades turísticas tendrían que elegir una de las siguientes alternativas: (1) una eliminación rápida y eficaz de lampenflora con hipoclorito, aunque suponga una carga negativa para el medio ambiente de la cueva o 2) una erradicación aceptable desde el punto de vista medioambiental, pero más lenta y menos eficaz, con peróxido de hidrógeno.

2.3 Biocidas: en relación al empleo de biocidas (Diquat, Diuron, Atrazina, Simazina Karmex, etc.), debido a su toxicidad, su uso no es adecuado para el tratamiento de la lampenflora en cuevas turísticas (Cigna, 2011 a; Mulec, 2012). No obstante, existen algunos estudios sobre el uso potencial de varios herbicidas, como el Diquat y el Diuron (Johnson, 1979) y la Atrazina y la Simazina (Grobbelaar, 2000) para eliminar el malverde en cuevas turísticas. Los resultados de ambos estudios fueron decepcionantes y sin efecto aparente, ya que el color verde persistió en las formaciones tratadas. Otros autores, citados por Mulec y Kosi (2009), han sugerido en cambio el empleo de formalina, soluciones de amoníaco cúprico, alcohol butílico y formaldehído a una dilución que va desde 0.5% hasta el 5%.

2.4 Nitrógeno líquido: existen pocos estudios publicados acerca del uso de nitrógeno líquido como método de eliminación del mal verde. Se realizó un ensayo en la cueva del Tesoro (Málaga), donde, según los autores, el nitrógeno líquido aplicado con pincel suponía una limpieza que combinaba la eliminación mecánica (por el efecto del pincel) con la congelación de las estructuras biológicas, lo que teóricamente supondría una ventaja. Sin embargo, la limpieza con este procedimiento fue mucho menos efectiva que la realizada con otros compuestos químicos, no siendo capaz de eliminar totalmente las manchas verdes (Jurado *et al.*, 2014). Además, su complicado transporte y ejecución, así como su peligrosa manipulación, no hacen recomendable el uso de este tratamiento.

3.1 Control de la iluminación: puesto que el factor ambiental más fácil de controlar es precisamente la iluminación, los gestores intentan limitar el desarrollo de las comunidades de lampenflora modificando el diseño y la tecnología del sistema de luminarias (Olson, 2006).

Desde un punto de vista cuantitativo, una iluminación discontinua dificulta el crecimiento de la lampenflora, ya que la adaptación de las plantas a diferentes fases de luz y oscuridad requiere cambios fisiológicos y un aporte extra de energía (Aley, 2004). Otra forma más sencilla de restringir el crecimiento de la lampenflora es reducir la duración de los periodos de iluminación, manteniendo las luces encendidas sólo cuando estén presentes los visitantes, consiguiendo además una disminución del coste energético (Mulec y Kosi, 2009; Cigna, 2011a; Del Rosal, 2015). El nivel de iluminación debe ser el adecuado para que los visitantes puedan seguir el recorrido turístico y, a su vez, disfrutar de la cueva (Grobbelaar, 2000; Olson, 2006). No obstante, Mulec y Kosi (2009) invitan a los gestores a no mostrar las cavidades de la manera más brillante posible, sino que se apueste por una iluminación que permita que el patrimonio natural permanezca en parte oculto o en tinieblas, para admirar su belleza tal y como fue en los inicios del turismo subterráneo. La intensidad de la luz puede reducirse usando lámparas menos potentes, empleando una iluminación dispersa reorientando el ángulo de los focos o estableciendo una distancia de seguridad de, aproximadamente un metro, entre la fuente de luz y la superficie de la cueva Cigna (2011a).

Desde un punto de vista cualitativo, en el diseño del sistema de iluminación debe escogerse un espectro luminoso cuyo rango de emisión no coincida con los intervalos de longitudes de onda que favorecen el crecimiento de lampenflora: entre 430 a 490 nm (luz azul) y 640 - 690 nm (luz roja) (Olson, 2006; Cigna, 2011a). Esto se consigue, por ejemplo, empleando luz verde (alrededor de 530 nm). Sin embargo, varios autores (Aley, 2004; Olson, 2006) apuntan que, por razones estéticas, la iluminación verde normalmente es rechazada al no proporcionar una apariencia na-

tural al medio subterráneo. Además, el empleo de luz verde no tendría tanto éxito frente aquellos organismos que pueden modificar sus pigmentos accesorios (Roldán *et al.*, 2006). Otros autores han apostado por el uso de luz amarilla (alrededor de 580 nm) como una posible alternativa. Las comunidades de lampenflora no absorben fuertemente este tipo de luz y el impacto visual es mínimo, proporcionando una apariencia natural a la cueva, ya que las paredes a menudo tienen tonos terrosos (Aley, 2004; Mulec, 2012). Por ejemplo, en la cueva del Tesoro (Málaga), se instalaron puntos de luz amarilla tipo LED, con un rango de emisión de 590 nm con buenos resultados (Jurado *et al.*, 2014). Un enfoque muy interesante es el llevado a cabo en la cueva de Nerja (Málaga). En ella se realizó un estudio de los espectros de emisión de los organismos fotosintéticos mediante el monitoreo del estado fisiológico y los procesos de foto-aclimatación de los *biofilms*. Esta información ha permitido identificar sus pigmentos y, por tanto, conocer el rango de longitud de onda más desfavorable para su desarrollo. En base a ello, en el diseño del nuevo sistema de iluminación se propuso una longitud de onda alrededor de 560 nm como la más adecuada (Del Rosal, 2015).

En cuanto al tipo de iluminación, en muchas cuevas turísticas y otros espacios subterráneos abiertos al público, poco a poco se están sustituyendo las lámparas halógenas por otro tipo de iluminación, ya que este tipo de iluminación no preservan las condiciones ambientales de las cuevas, incrementando la temperatura y disminuyendo la humedad ambiental durante su funcionamiento (Cigna, 2011a; D'Agostino *et al.*, 2015). Las lámparas compuestas por diodos LEDs son una alternativa más adecuada, ya que su espectro de emisión es estrecho y tiene potencial para ajustarse según las necesidades, se encienden al instante, son muy eficientes energéticamente, emiten muy poco calor, no generan ruido y su vida útil es muy larga (Merdenisianos, 2005; Olson, 2006; Toomey *et al.*, 2009). Varios autores han propuesto implementar un sistema de iluminación que esté dividido en dos sectores diferenciados: un 1^{er} circuito - iluminación del recorrido turístico, en viales y pavimentos, con baterías de emergencia y que permita el paso seguro de los visitantes; y un 2^o circuito - iluminación escénica o artística, que resalte las formaciones más espectaculares y pueda encenderse manualmente mediante interruptores que activen los guías durante la visita, sensores de movimiento o programar su encendido durante un período de tiempo limitado, cuando los visitantes pasen cerca (Johnson, 1979; Cigna, 2011a; Hebelka, 2014). Algunos autores también coinciden en evitar iluminar zonas susceptibles de ser colonizadas, como sustratos cubiertos por lodo, estructuras terrosas y superficies húmedas (Rajczy, 1989; Mulec, 2012; Ramírez-Trillo y González-Ríos, 2014). Por último, Olson (2006) propone como alternativa el uso de linternas de mano o frontales, evitando los impactos relacionados con la instalación de un sistema de iluminación. A pequeña escala, en cuevas en las que la afluencia de público esté limitada a pequeños grupos, esta solución se ha revelado como la más eficaz, como es el caso de la cueva de Castañar de Ibor (Cáceres).

3.2 Radiación ultravioleta (UV-C): la radiación ultravioleta de tipo C (280-200 nm) posee un fuerte poder germicida, y en el caso de las algas y las cianobacterias, se ha demostrado que este tipo de radiación tiene el potencial de inducir graves daños en los constituyentes celulares implicados en la fotosíntesis (Borderie *et al.*, 2014). A pesar de que esta técnica no ha sido empleada de forma extendida en España, varios autores han propuesto el uso de radiación UV-C para limitar y controlar la proliferación de lampenflora en el ámbito concreto de las cuevas turísticas, como por ejemplo en la Grotta Gigante (Italia) (Fabbricatore, 2009) o en la cueva de Moidons (Francia) (Borderie *et al.*, 2014). Los tratamientos con UV-C no producen un impacto negativo

sobre los materiales expuestos, no generan ningún residuo tóxico en el medio ambiente y pueden aplicarse fácilmente en áreas pequeñas y accesibles como suelos, paredes o espeleotemas; pero los autores admiten que este método presenta algunas limitaciones, particularmente, cuando se tratan áreas distantes (por ejemplo, techos) o áreas con una elevada riqueza en estalactitas y grietas estrechas, con sombras que pueden reducir significativamente el efecto de la radiación UV. Grobbelaar (2000) probó la eficiencia de lámparas UV-C sobre las algas que proliferan en las cuevas Cango (Sudáfrica), y concluyó que este tipo de radiación es efectiva para matar y blanquear las algas, proponiendo un tratamiento en el que se combine el uso de UV-C con peróxido de hidrógeno.

3.3 Altas temperaturas: Johnson (1979) sugirió el empleo de vapor o agua caliente a baja presión, para eliminar las comunidades de lampenflora en las cuevas Waitomo (Nueva Zelanda). Estos métodos son eficaces, con la ventaja de tener un efecto altamente localizado y no producir residuos tóxicos. Sin embargo, un uso repetido puede erosionar algunas superficies frágiles, además de ser un método lento y difícil de llevar a cabo, ya que el equipo necesario es voluminoso y requiere un acceso continuo a un suministro de agua y energía.

Discusión y conclusiones

El control de las comunidades de lampenflora se enfrenta a dos cuestiones urgentes: cómo prevenir su crecimiento y cómo eliminarlas sin dañar el sustrato una vez que lo colonizan. Atendiendo a las ventajas e inconvenientes de cada método, se puede concluir que no se ha encontrado una solución definitiva y única. El diseño de actuaciones destinadas a prevenir y, en su caso, combatir los procesos de biodeterioro inducido por lampenflora, precisa de tres acciones multidisciplinares: 1) realizar un análisis integral de estas comunidades biológicas, que permita conocer su diversidad, fisiología y relación con el sustrato colonizado. Además, no debemos descartar que muchas colonias puedan ser propias del ecosistema subterráneo, por lo que es básico el estudio biológico pormenorizado; 2) implantar métodos combinados de prevención y eliminación. En la actualidad, los métodos de prevención se basan principalmente en un estricto control de la iluminación, acortando los tiempos de funcionamiento y empleando longitudes de onda ineficaces para restringir el proceso de fotosíntesis. Entre los métodos de eliminación, el más extendido es el empleo de productos químicos, concretamente hipocloritos y peróxido de hidrógeno. No obstante, en situaciones concretas, no debe descartarse el uso de otros métodos expuestos en los apartados anteriores: radiación UV-C, cepillado etc; 3) Paralelamente, es necesario conocer la evolución de estos organismos antes y después de la puesta en práctica de las actuaciones para su control.

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de las actividades del Área de Geología Ambiental y Geomatemáticas del Instituto Geológico y Minero de España, proyecto GESTEC 2547 (2017/2018). Esta investigación también está incluida en las actividades subsidiadas del Sistema Nacional de Garantía Juvenil, MINECO, con referencia PEJ-2014-67400 y cofinanciado por la Iniciativa de Empleo Juvenil (YEI) y el Fondo Social Europeo (ESF).

Referencias

- Albertano, P. 2012. Cyanobacterial biofilms in monuments and caves. In: Whitton, B.A. (ed.), *Ecology of cyanobacteria. II: their diversity in space and time*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 317-343.
- Aley, T. 2004. Tourist Caves: Algae and Lampenflora. In: Gunn, J. (ed.), *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. Taylor and Francis-Routledge, New York, 1568-1570.
- Annous, B.A., Fraramico, P.M. y Smith, J.L. 2009. Quorum sensing in biofilms: Why bacteria behave the way they do. *Journal of Food Science*, 74, 24-27.
- Bastian, F., Jurado, V., Novakova, A., Alabouvette, C. y Saiz-Jiménez, C. 2010. The microbiology of Lascaux Cave. *Microbiology*, 156, 644-652.
- Borderie, F., Alaoui- Sossé, B. y Aleya, L. 2014. Heritage materials and biofouling mitigation through UV-C irradiation in show caves: state-of-the-art practices and future challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 6 (22), 4144-4172.
- Caneva, G., Nugari, M.P. y Salvadori, O. 2008. *Plant biology for cultural heritage: biodeterioration and conservation*. Getty Conservation Institute, Los Angeles, 408.
- Cigna, A. 2011a. The problem of Lampenflora in Show Caves. *Proceedings of the 6th ISCA Congress*. Slovak Caves Administration, 201-205.
- Cigna, A. 2011b. Show cave development with special references to active caves. *Tourism and karst areas*, 4 (1), 7-16.
- Cigna, A. 2012. Show caves. In: White, W.B. y Culver, D.C. (eds.), *Encyclopedia of caves. 2nd Edition*. Elsevier, Amsterdam, Holland, 690-697.
- Claudi, R. y Mackie, G.L. 1994. *Practical manual for zebra mussel monitoring and control*. Lewis Publishers, Boca Raton, United States of America, 810.
- Cooksey, K.E. 1992. Bacterial and algal interaction in biofilms. In: Melo, L.F., Bott, T.R., Fletcher, M. y Capdeville, B. (eds.), *Biofilms Science and Technology*. Kluwer Academic Press, Netherlands, 163-173.
- D' Agostino, D., Beccaris, L., Camassa, M. y Febroriello, P. 2015. Microclimate and microbial characterization in the Zinzulusa show cave (South Italy) after switching to LED lighting. *Journal of Cave and Karst Studies*, 77 (3), 133-144.
- Del Rosal, Y. 2015. *Análisis, impacto y evolución de los biofilms fotosintéticos en espeleotemas. El caso de la Cueva de Nerja*. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga, 336.
- Dobat, K. 1963. "Höhlenalgen" bedrohen die Eiszeitmalereien von Lascaux. *Die Höhle*, 14 (2), 41-45.
- Esteban, R. 2014. Actuaciones para la eliminación del tapiz algal presente en los espeleotemas en la rehabilitación de las grutas visitables de La Paz y de La Viña en Ortigosa de Cameros – La Rioja. *Zubía*, 32, 7-32.
- Fabbricatore, A. 2009. *Grotta Gigante, turismo, ambiente, cultura*. Società Alpina delle Giulie, Trieste, Italia, 24.
- Faimon, J., Stelcl, J., Kubesová, S. y Zimák, J. 2003. Environmentally acceptable effect of hydrogen peroxide on cave "lamp-flora", calcite speleothems and limestones. *Environmental Pollution*, 122, 417-422.
- Garrido, A., Liñán, C., Simón, M.D. y Del Rosal, Y. 2007. *Memoria Científica. Fundación Cueva de Nerja 2006*. Instituto de Investigación Cueva de Nerja, Málaga, 246.
- Gillieson, D.S. 1996. *Caves: processes, development, and management*. Blackwell Publishers Ltd, Oxford, England, 324.
- Grobbelaar, J. U. 2000. Lithophytic algae: A major threat to the karst formation of show caves. *Journal of Applied Phycology*, 12, 309-315.
- Hebelka, J. 2014. *Methodology of lampenflora removal in caves accessible for tourists*. The cave administration of the Czech Republic, Pr honice, Czech Republic, 15.
- Hoyos, M., Soler, V., Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S. y Sanz-Rubio, E. 1998. Microclimatic characterization of a karstic cave: human impact on micro environmental parameters of a prehistoric rock art cave (Candamo Cave, northern Spain). *Environmental Geology*, 33 (4), 231-242.
- Johnson, K. 1979. Control of Lampenflora at Waitomo Caves, New Zealand. *Cave Management in Australia*

- III. *Proceedings of the 3rd Australasian Cave Tourism and Management Conference, Mt. Gambier, Adelaide, Australia*, 105-122.
- Jurado, V., Porca, E. y Saiz-Jiménez, C. 2010. Control de un brote fúngico en la Cueva de Castañar de Ibor. En: Durán, J.J. y Carrasco, F. (eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 611-620.
- Jurado, V., Hernández-Mariné, M., Rogerio-Candelera, M.A., Domínguez-Moñino, I., S. Gutiérrez-Patricio, S. y Saiz-Jiménez, C. 2014. La Cueva del Tesoro: un paraíso microbiano. *Cuevatur 2014. Primer Congreso Iberoamericano y Quinto Congreso Español sobre Cuevas Turísticas*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), Aracena, España, 433-441.
- Jurado, V. y Saiz-Jiménez, C. 2016. Vida microbiana en las cavernas: el fascinante mundo de la biodiversidad subterránea y su papel en los procesos de deterioro. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24 (1), 51-60.
- Lawrence, J.R., Korber, D.R., Hoyle, B.D., Costerton, J.W. y Caldwell, D.E. 1991. Optical sectioning of microbial biofilms. *Journal of Bacteriology*, 173, 6558-6567.
- Lefèvre, M. 1974. La "maladie verte" de Lascaux. *Studies in Conservation*, 19, 126-156.
- Martínez, A. y Asencio, A.D. 2010. Distribution of Cyanobacteria at the Gelada Cave (Spain) by physical parameters. *Journal of Cave and Karst Studies*, 72, 11-20.
- Merdenisianos, C. 2005. The maladie verte (green disease) of the caves. *Proceedings of 14th International Congress of Speleology*, Athens-Kalamos, Greece, 160-162.
- Mulec, J. 2012. Lampenflora. In: White, W.B. y Culver, D.C. (eds.), *Encyclopedia of caves*. Elsevier, Amsterdam, Holland, 451-456.
- Mulec, J. y Kosi, G. 2009. Lampenflora algae and methods of growth control. *Journal of Cave and Karst Studies*, 71 (2), 109-115.
- Mulec, J. y Glazar, S. 2011. First results on use of a hydrogen peroxide solution in Postojnska jama (Slovenia) to remove lampenflora. In: Bella, P. y Gazík, P. (eds.), *Proceedings of the 6th ISCA Congress*. Slovak Caves Administration, 128-131.
- Olson, R. 2006. Control of Lamp Flora in Developed Caves. In: Hildreth-Werker, V. y Werker, J.C. (eds.), *Cave Conservation and Restoration*. National Speleological Society, New Mexico, 343-348.
- Pulido-Bosch, A., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rodríguez-Navarro, C.M. y Vallejos, A. 1997. Human impact in a tourist karstic cave (Aracena, Spain). *Environmental Geology*, 31, 142-149.
- Rajczyk, M. 1989. The flora of Hungarian caves. *Karszt és Barlang*, Special issue, 69-72.
- Ramírez-Trillo, F. y González-Ríos, M.J. 2014. Cueva de las Ventanas. 14 años de experiencias del mal verde y criterios para una nueva iluminación con diodos leds. *Cuevatur 2014. Primer Congreso Iberoamericano y Quinto Congreso Español sobre Cuevas Turísticas*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), Aracena, España, 475-485.
- Roldán, M., Oliva, F., González Del Valle, M. A., Saiz-Jimenez, C. y Hernández-Mariné, M. 2006. Does green light influence the fluorescence properties and structure of phototrophic biofilms? *Applied and Environmental Microbiology*, 72, 3026-3031.
- Roldán, M. y Hernández-Mariné, M. 2009. Exploring the secrets of the three-dimensional architecture of phototrophic biofilms in caves. *International Journal of Speleology*, 38 (1), 41-53.
- Saiz-Jiménez, C. 2012. Microbiological and environmental issues in show caves. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28, 2453-2464.
- Spate, A. y Moses, C. 1994. Impacts of high pressure cleaning: a case study at Jenolan. *Cave Management in Australasia*, 10, 45-48.
- Toomey, R. S., Olson, R., Kovar, S., Adams, M. y Ward, R. H. 2009. Relighting Mammoth Cave's new entrance: improving visitor experience, reducing exotic plant growth, and easing maintenance. *15th International Congress of Speleology, Proceedings, Vol. 2*. Kerrville, Texas, 1223-1228.
- Vegh, Z. 1989. The problem of the lampflora in Baradla cave. *Proceedings of the 10th International Congress of Speleology*, Budapest, Hungary, 559-561.
- Warscheid, T. y Braams, J. 2000. Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46, 343-368.

Watnick, P. y Kolter, R. 2000. Biofilm, city of microbes. *Journal of Bacteriology*, 182, 2675-2679.

Zelinka, J., Hebelka, J., Fillo, M. y Novomesky, J. 2002. Illumination reconstruction in Slovakian show caves in relation to "lampflora" creation prevention. *Proceedings of International Conference on Cave Lighting, 15-17 November, Budapest*, 151–157.

T. Viver, et al., 2018. Caracterización de la comunidad microbiana en la Cova des Pas de Vallgornera, Mallorca (España). En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 235-244.

Caracterización de la comunidad microbiana en la Cova des Pas de Vallgornera, Mallorca (España)

T. Viver⁽¹⁾, J. Amengual-Villarino⁽¹⁾, J. Gago-Vega⁽¹⁾, S. Díaz⁽¹⁾, M. Urdiain⁽¹⁾, J.J. Durán Valsero⁽³⁾,
P.A. Robledo-Ardila⁽²⁾ y R. Rosselló-Móra⁽¹⁾

(1) Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA; CSIC-UIB, Grupo de Microbiología Marina, Esporles, E-07190, Mallorca. tviver@imedea.uib-csic.es

(2) Unidad del Instituto Geológico y Minero España en las Islas Baleares. C/Felicià Fuster nº 6. 07006, Palma de Mallorca. Islas Baleares. pa.robledo@igme.es

(3) Instituto Geológico y Minero España en las Islas Baleares. C/Ríos Rosas nº 23, 28003, Madrid. jj.duran@igme.es

RESUMEN

En este estudio se ha llevado a cabo el análisis de la diversidad microbiana presente en muestras de agua tomadas en la Cova des Pas de Vallgornera, situada en la zona sur de la isla de Mallorca y desarrollada en una plataforma carbonática arrecifal del Mioceno superior (Messiniense). El muestreo se realizó en la Galería "d'en Pau" ubicada en el centro del sistema endokárstico y a unos 2 km de boca de entrada, donde se tomaron muestras de gotas de agua de percolación, de los gours y de agua freática de acuífero en galerías semisumergidas. El estudio de la diversidad microbiana se realizó a partir de una aproximación metagenómica, que básicamente se trata de la secuenciación del ADN extraído de forma global de las muestras y que refleja la composición de los genomas y genes de los organismos mayoritarios. Se observó que las muestras que pertenecen al flujo de agua de percolación y los gours presentan una menor diversidad y comparten un mayor número de grupos taxonómicos que el agua procedente de las galerías freáticas. Además, la metagenómica permitió la reconstrucción de los genomas microbianos (denominados MAGs) de las poblaciones más abundantes y permitió realizar estudios filogenéticos y hacer predicciones de su función metabólica a partir de la anotación de los genes detectados. De un total de 14 MAGs recuperados de las muestras de agua de percolación y los gours, los más abundantes se asociaron al género *Acinetobacter*, a la familia *Sphingomonadaceae* y a la clase *Gammaproteobacteria*. Los primeros, que serían los genomas más abundantes en estas muestras, y que tal vez conformarían dos especies distintas, se han asociado a procesos de biomineralización contribuyendo a la formación de estructuras calcáreas. Además, se obtuvieron MAGs casi completos de arqueas de la familia *Nitrosphaeraceae* y *Nitrosopumilaceae*, cuyo metabolismo quimiolitotrófico y oxidador de amonio podría ser responsable de parte de la producción primaria del sistema. Por otra parte, las muestras de agua freática presentaron una mayor diversidad y en la cual se reconstruyeron un total de 29 MAGs. Los mayoritarios se afiliaron a la familia *Comamonadaceae* y *Nitrospiraceae* y tres adicionales se afiliaron al dominio Arquea, como *Candidatus Nitrosoarchaeum* (el más abundante de las muestras) y *Nitrososphaera* del filo *Thaumarchaeota*, indicando también que en estos sistemas la producción primaria puede ser por oxidación de amonio como en las anteriores muestras.

Palabras clave: ADN, acuífero, comunidad microbiana, cueva litoral, metagenómica.

Characterization of the microbial community in the Cova des Pas de Vallgornera, Mallorca (Spain)

ABSTRACT

In the current study was analyzed the microbial diversity from the Cova des Pas de Vallgornera located in the southeast coast of Mallorca Island, which was developed in an arrecifal carbonate platform of the Upper Miocene (Messiniense).

The samples were taken in "d'en Pau" gallery placed in the center of the endokarstic system and from 2 km of the entrance. There were taken samples from drip-water falling from speleothems, water from gours and phreatic lakes in semi-submerged galleries. The microbial diversity was evaluated by a metagenomic approach, which basically consisted on the sequencing of the total DNA extracted from the sample. Metagenomes mirrors the genomic composition and genes functions from the more abundant microbial populations. Drip-water and gours samples showed a lower diversity and shared a major number of taxonomic units than the sample related to phreatic lakes. Moreover, the metagenomes allowed the binning of the Metagenomes Assembly Genomes (called MAGs) from the most abundant populations and allowed perform phylogenetic studies and predict the metabolic function from the annotated genes. From a total of 14 MAGs recovered from drip-water samples and gours, the most abundant were associated to *Acinetobacter* genus, *Sphingomonadaceae* family and the class *Gammaproteobacteria*. Members of the genus *Acinetobacter* represented by 2 different species, has been associated to bio-mineralization processes contributing to calcareous structures formation. Additionally, related to Archaea domain, was recovered MAGs associated to the family *Nitrososphaeraceae* and *Nitrosopumilaceae*, whose chemolithoautotroph and ammonia-oxidizing metabolism could be linked to part of the primary production in the cave. On the other hand, samples from phreatic lakes showed the higher diversity and it was possible to recover 29 MAGs. The most abundant MAGs were affiliated to the family *Comamonadaceae* and *Nitrospiraceae*. Additionally, 3 MAGs were affiliated to Archaea domain: *Candidatus Nitrosoarchaeum*, and *Nitrososphaera* of the phylum *Thaumarchaeota*, also indicating that in these systems the primary production can be associated by ammonia-oxidizing microorganisms as in the other samples.

Keywords: aquifer, coastal cave, DNA, metagenomics, microbial community.

Introducción

La cueva des Pas de Vallgornera (CPV) se localiza en la costa sur de la Isla de Mallorca, en el término municipal de Lluçmajor. Se trata de una cavidad desarrollada en una plataforma carbonatada compuesta por calizas arrecifales del Mioceno superior (Messiniense), ubicada en una Masa de Agua Subterránea, 1821-M1. Las características espeleogenéticas de esta cueva son muy particulares, puesto que su génesis está ligada a un proceso mixto en ambientes epigénicos (de mezcla de aguas dulces y saladas) e hipogénicos (consecuencia de procesos de disolución ligados a aguas termales procedentes de un acuífero profundo) (Robledo *et al.*, 2009). La cueva fue descubierta en abril del año 1968, debido a la perforación del suelo para la construcción de una fosa séptica para tratar las aguas residuales de un hotel. En el año 2004 se empezaron los estudios espeleológicos de la cueva y actualmente se han topografiado un total de 74.000 m de los cuales 17.000 m corresponden a galerías subacuáticas (López *et al.*, 2016).

Las características microbiológicas de estos sistemas en cuevas es particular, ya que debido a la importante oligotrofia de sus aguas y la ausencia de luz, una parte importante de las comunidades presentes en estos ambientes extremos se sustentan gracias a la contribución del metabolismo quimioautotrófico, sobre todo, asociados al ciclo del nitrógeno y llevado a cabo por bacterias de la familia *Nitrospiraceae* con metabolismo oxidador de nitrito y de arqueobacterias del filo *Thaumarchaeota* que presentarían un metabolismo autotrófico oxidador de amonio (Tetu *et al.*, 2013). Poder conocer cuál es la estructura de las comunidades microbianas en sistemas prístinos, extremos y casi sin ningún tipo de actividad antropogénica puede permitir conocer con más detalle la dinámica y función de estos ambientes muy poco explorados. Hasta la fecha, en la CPV se han desarrollado estudios de la diversidad microbiana basada en métodos dependientes de cultivo. La mayoría de los microorganismos aislados se identificaron como miembros de las clases *Gammaproteobacteria* y *Actinobacteria*, y además, el 20% de las cepas identificadas fueron capaces de precipitar carbonato cálcico (Busquets *et al.*, 2014). Sin embargo, se sabe que los métodos dependientes del cultivo no permiten conocer la estructura de las comunidades

microbianas con detalle ya que se estima que no más de un 1% de los microorganismos se pueden cultivar (Amann *et al.*, 1995).

Metodología

La ecología molecular microbiana ha permitido conocer la estructura, función y dinámica de ecosistemas naturales mediante técnicas independientes del cultivo (Amann *et al.*, 1995). En sus inicios, éstas estaban basadas en la secuenciación de genes amplificados de ARN ribosomal 16S mediante clonación principalmente (Rondon *et al.*, 2000; Tajima *et al.*, 1999). Sin embargo, las nuevas tecnologías de secuenciación masiva de ADN (Shokralla *et al.*, 2012), han permitido un cambio significativo en la estrategia de estudio. Por una parte, plataformas como la ya extinta Roche 454, o las actuales en auge Illumina HiSeq (Klindworth *et al.*, 2013) proporcionan números de secuencias en órdenes de magnitud superiores que las técnicas de clonación y a un precio mucho más asequible. Para una comparación entre muestras, la secuenciación de amplicones es una buena opción (Mora-Ruiz *et al.*, 2016). Sin embargo, la capacidad de estas plataformas para secuenciar de forma directa ADN extraído en crudo de una muestra permite conocer no sólo la identidad de los organismos que están presentes, si no también su composición en genes (Konstantinidis y Rosselló-Mora, 2015). Además, una de las aproximaciones más relevantes actualmente en la secuenciación masiva de DNA procedente de sistemas naturales es la capacidad de separar los fragmentos de ADN en poblaciones distintas que de alguna manera representan genomas de especies distintas, utilizando el análisis de “binning” (Alberstsen *et al.*, 2013). Estas colecciones de fragmentos secuenciados y separados se denominan “*metagenome assembled genomes*” abreviados como MAGs y que representan un mosaico de genes pertenecientes a todas las poblaciones distintas de microorganismos pertenecientes a una misma especie (Konstantinidis *et al.*, 2017). Con esta tecnología es posible conocer cuáles son las especies más abundantes, cómo son sus genomas y qué genes codifican. Ello permite poder especular sobre los metabolismos e interacciones entre poblaciones naturales. Sin embargo, lo más recomendable en el estudio de sistemas microbianos naturales es la combinación entre técnicas independientes e dependientes del cultivo, ya que las primeras nos informan sobre los organismos mayoritarios, mientras que las segundas, además de proporcionar cultivos puros, permite evaluar la diversidad microbiana presente en bajas proporciones (Pedrós-Alió, 2006).

En el presente trabajo hemos aplicado las técnicas moleculares más modernas en el estudio de ecosistemas naturales mediante secuenciación directa por Illumina combinada con “binning” para comprender la identidad y metabolismo de los organismos más importantes en tres tipos de aguas de la CPV.

Resultados

Se ha estudiado la estructura y diversidad microbiana en tres tipos de muestras: (i) gotas del flujo de agua procedente de estalactitas, (ii) agua embalsada en gours en la misma zona de muestreo, y (iii) agua de la capa freática compuesta en parte por la intrusión de agua de mar adyacente a la cueva (figura 1). En total se tomaron 2 muestras de agua procedentes de estalactitas, 4 procedentes de gours y 3 de aguas freáticas. Por razones de baja concentración de células y, por

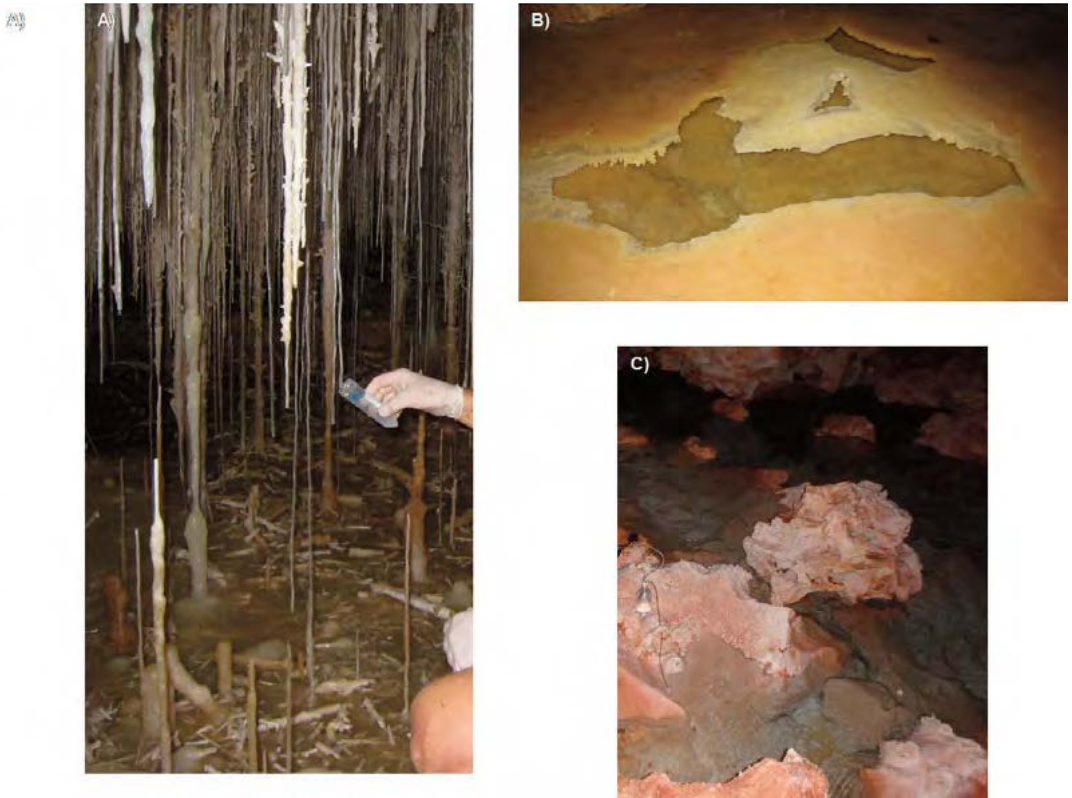


Figura 1. Imágenes del punto de muestreo. A) Gotas de agua recogidas de diferentes estalactitas. B) Aguas de gours. C) Agua freática del acuífero.

tanto ADN en las muestras, así como por la necesidad de incrementar la eficiencia en la secuenciación se extrajeron los ADNs de forma independiente, pero se unieron en un solo pool por tipo de muestra para ser secuenciados. Además, se cuantificaron el número de células por microscopía de fluorescencia mediante la metodología de DAPI y CARD-FISH (Viver et al., 2017).

Para poder entender si las muestras se comportaban como réplicas biológicas, de forma simultánea se realizó un estudio comparativo de todas ellas por amplificación y secuenciación por Illumina del gen 16S ARNr. Se obtuvo una media de 54.589 ($\pm 31,36\%$) lecturas por muestra que se agruparon en Unidades Taxonómicas Operacionales (OTUs) mediante la técnica de *Swarming* (Mahé et al., 2015), y que se compararon entre sí mediante NMDS (*Non-Metric Multidimensional Scaling*). El test NMDS indicó que efectivamente las gotas procedentes de las estalactitas y de las aguas freáticas presentaban una composición taxonómica similar y que, por tanto, podían ser consideradas como réplicas biológicas. Sin embargo, y al contrario de lo esperado, se observó que las 4 muestras procedentes de gours presentaban diferente composición taxonómica siendo las más semejantes entre sí G1 y G2. Se observó además, que en todas las muestras la diversidad afiliada al dominio Bacteria fue siempre mayor que los miembros del dominio Arquea.

Sin embargo, en este estudio el objetivo principal fue el análisis de la diversidad mediante secuenciación directa por metagenómica. Por ello, se secuenciaron las muestras de forma directa mediante Illumina HiSeq, con la que se obtuvo un total de 144,25 ($\pm 3,32$) millones de lecturas por muestra, que tras el trimado se consideraron 108,18 ($\pm 2,26$) millones de lecturas como adecuadas para realizar el ensamblado. Se obtuvieron un total de 334.705 (± 46.227) contigs que tras el binning se reconstruyeron un total de 46 MAGs de distinta calidad (ver más abajo). Mediante la elaboración de curvas nonpareil (Rodríguez y Konstantinidis, 2014) se estimó que la secuenciación alcanzó una cobertura de la diversidad genómica entre un 80% (freáticas) y un 95% (gotas) de cada muestra. La diversidad microbiana de cada una de las muestras se estudió a partir de 2 enfoques, ambos relacionados con la metagenómica: (i) estudio filogenético de los fragmentos del gen ARNr 16S y su clasificación en OPUs (Operational Phylogenetic Units; Mora-Ruiz *et al.* 2016) y (ii) reconstrucción MAGs.

El recuento de microorganismos por microscopía de fluorescencia mostró que las muestras de gotas presentaban la mayor densidad celular (media de 6.22×10^6 cel/ml), mientras que las muestras de gours y freáticas presentaban una menor densidad con una media de 1.63×10^5 cel/ml y 1.55×10^5 cel/ml respectivamente. Al contrario, los análisis de diversidad basada en OPUs mostró que las muestras de gotas presentaban la menor diversidad microbiana seguida por los gours y finalmente las freáticas. En todos los casos, la diversidad de bacterias siempre fue superior a la de arqueas, así como también en número de lecturas Bacteria con 72% – 97% del total superaba a Archaea. Estos valores son indicadores de una absoluta predominancia de miembros del dominio Bacteria en estos sistemas.

De forma similar a las lecturas de ARNr 16S, a partir de los tres metagenomas se pudieron reconstruir los MAGs de tan sólo 5 poblaciones distintas de arquea y 41 bacterias (figura 2). Entre ellos sólo el MAG Dro.002 procedente de gotas fue asociado a una especie ya descrita anteriormente (*Acinetobacter lwoffii*; figura 2). Además, la población microbiana con una mayor abundancia en estas muestras de gotas se ha asociado al género *Acinetobacter* mediante OPUs, y éstos, se han asociado al proceso de precipitación de CaCO_3 ligado a la reacción de ureólisis (Okuy *et al.*, 2015). Este MAG podría ser responsable en parte de la precipitación de carbonato cálcico (CaCO_3) y por tanto, a la formación de espeleotemas, y a la captura del CO_2 , uno de los principales metabolismos bacterianos descritos en cuevas (Okuy *et al.*, 2015).

Sin embargo, todos los demás MAGs recuperados representarían taxones no descritos anteriormente y que podrían ser clasificados como (4) nuevas especies, (16) géneros o (26) familias atendiendo a sus características genómicas (Konstantinidis *et al.*, 2017). Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de la aplicación de metodologías moleculares independientes de cultivo para la detección de las principales poblaciones microbianas con un papel relevante en el ecosistema, ya que las poblaciones más representativas pueden no ser recuperadas a partir de metodologías dependientes de cultivo.

Entre los miembros del dominio Bacteria encontramos una importante diversidad (figura 2), donde los más abundantes son miembros de la clase *Gammaproteobacteria*, y en especial *Acinetobacter*, pero entre los cuales también se han detectado *Pseudomonas* (anteriormente reportada en esta cueva mediante técnicas de cultivo; Busquets *et al.*, 2014). Pero además, se han detectado miembros de otras clases como *Alphaproteobacteria*, *Bacteroidetes*, y de filas tan

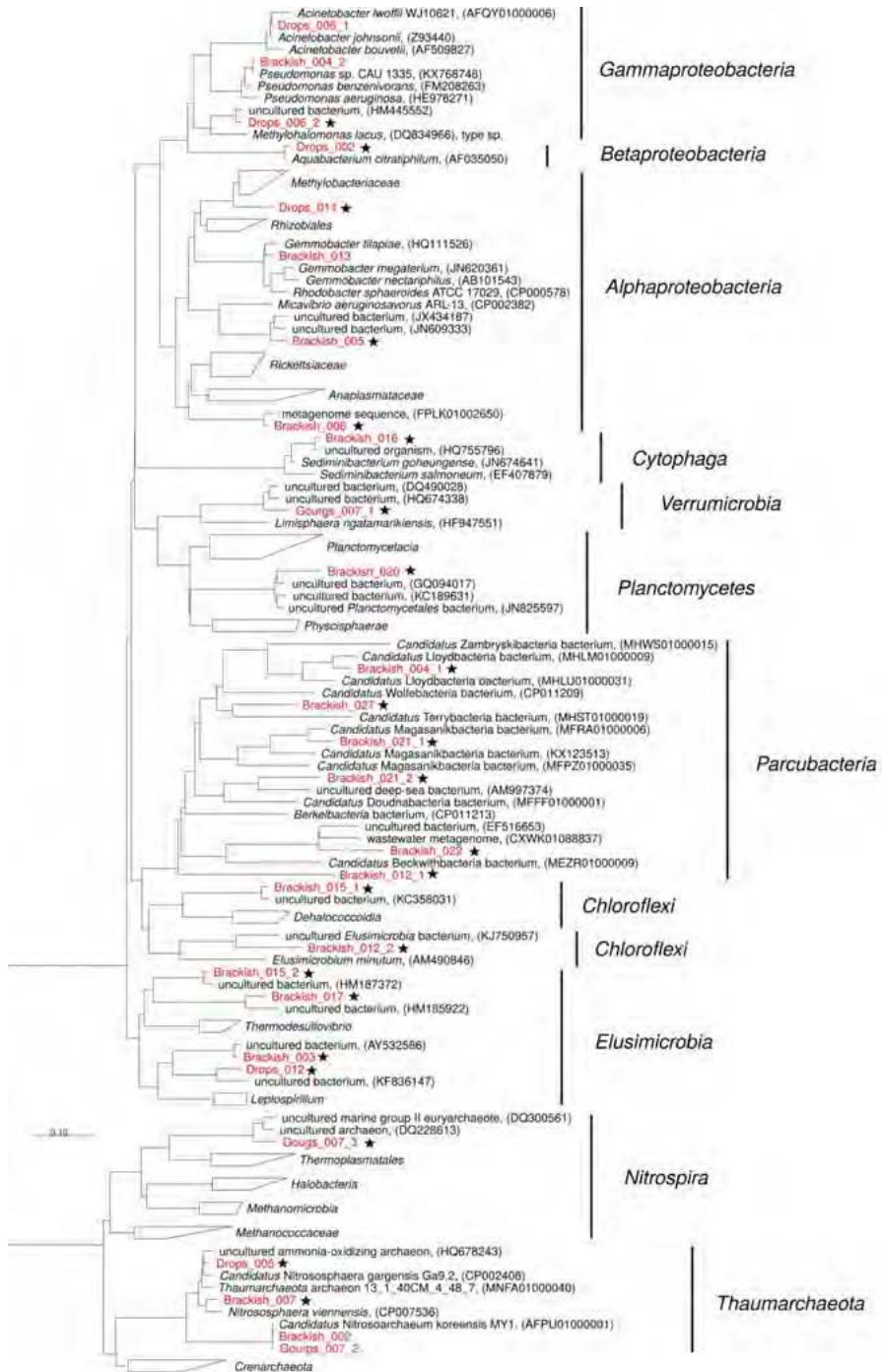


Figura 2. Árbol filogenético basado en las secuencias del gen 16S ARNr que se ensamblaron a partir de los análisis metagenómicos. Las secuencias procedentes de las muestras de gotas (Drops), freáticas (Brackish) y gours, marcadas con una estrella representan nuevas especies no descritas anteriormente.

poco cultivados como *Elusimicrobia* y *Nitrospira*. Sin embargo, y tal y como se ha detectado también en aguas subterráneas, hemos podido observar la presencia de miembros de la conocida Candidate Phyla Radiation (Brown *et al.*, 2015) y que de algún modo participan en metabolismos clave en el funcionamiento de los ciclos del nitrógeno y carbono en estos sistemas oligotróficos (Danczak *et al.*, 2017). Entre los miembros que se afiliaron al dominio Arquea se pudieron detectar algunos como el *Candidatus Nitrosoarchaeum* (el más abundante de las muestras) y *Nitrososphaera* ambas del filo *Thaumarchaeota*, así como algún miembro de *Euryarchaeota*.

En estos ambientes en los que no hay presencia de luz e imposibilidad de realizar la fotosíntesis, la entrada de energía tiene lugar principalmente a través de procesos quimiosintéticos (Bach *et al.*, 2006). Entre los distintos MAGs que hemos podido obtener, a algunos de ellos se les puede inferir un metabolismo quimiolitautótrofo y, por tanto, ser relevantes productores primarios en estos sistemas extremos. Parece, que por la identidad de los mismos, el metabolismo del nitrógeno sería también (al igual que en otros sistemas semejantes; Tetu *et al.*, 2013) la principal fuente redox. Por ejemplo, los MAGs asociados a la familia *Nitrosopumilaceae* (MAG Dro.005) presentarían un metabolismo quimiolitautótrofo asociado al nitrificante (Tetu *et al.*, 2013). Tal y como se ha mencionado, Archaea se encontraba presente pero en bajas proporciones; sin embargo, ello no descarta que su metabolismo pueda ser clave para el funcionamiento del sistema. Adicionalmente, este metabolismo también se presenta en miembros del dominio Bacteria, como es el caso del MAG Bra.003 afiliado a la familia *Nitrospiraceae* que puede llevar a cabo el proceso de nitrificación completo. El resultado de la nitrificación es la acumulación en el medio de nitrato. Este nitrato puede ser respirado por desnitrificación, por ejemplo para los miembros del MAG Bra.001 (que representaría una especie y género no clasificados de la familia *Comamonadaceae*) ya que presenta el gen nitrato reductasa (nar).

Conclusiones

Los medios extremos como los subterráneos se muestran como interesantes y particulares ambientes para el estudio de microorganismos adaptados a la vida sin luz que necesariamente están sujetos a metabolismos quimiosintéticos. En la cueva des Pas de Vallgornera se han observado diferencias importantes en la diversidad microbiana, dependiendo de si el agua es de goteo, de un gour o freática (este último con mayor diversidad y comparten un menor número de grupo taxonómicos). Además, algunos microorganismos identificados están ligados a procesos de biomineralización, lo que indica que tienen un papel clave en la formación de espeleotemas. En estos momentos los estudios aún se encuentran en la fase de anotación y evaluación del contenido génico de todos los MAGs obtenidos por metagenómica, así como su contribución a la composición total. No obstante y aunque se trata todavía de estudios preliminares, en los próximos meses será posible mostrar tanto, la estructura taxonómica y genética de los distintos sistemas estudiados, como las posibles interacciones y funciones de los principales microorganismos detectados.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del Convenio de Colaboración que se está desarrollando

entre el IGME y el grupo de microbiología marina del IMEDEA, sobre identificación y caracterización de microorganismos extremos en ambientes subterráneos. Ha sido financiado por el proyecto del Ministerio de Economía Español CGL2015-66686-C3-1-P (a RRM). Además, TVP agradece el apoyo a la beca predoctoral Num. BES-2013-064420 del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España. Los autores además agradecen el apoyo económico a Deep Blue Sea SL.

Referencias

- Albertsen, M, Hugenholtz, P, Skarshewski, A, Nielsen, K.L, Tyson, G.W. y Nielsen, P.H. 2013. Genome sequences of rare, uncultured bacteria obtained by differential coverage binning of multiple metagenomes. *Nature biotechnology*, 31(6), 533.
- Amann, R.I. Ludwig, W. y Schleifer, K.H. 1955. Phylogenetic Identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation. *Microbiological reviews* 59:143-169.
- Bach, W. Edwards, K.J. Hayes, J.M. Sievert, S. Huber, J.A. y Sogin, M.L. 2006. Energy in the dark: fuel for life in the deep ocean and beyond. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 87(7), 73-78.
- Brown, C.T. Hug, L.A. Thomas, B.C. Sharon, I. Castelle, C.J. Singh, A. Wilkins, M.J. Wrighton, K.C. Williams, D.H. y Banfield, J.F. 2015. Unusual biology across a group comprising more than 15% of domain Bacteria. *Nature*, 523(7559), 208.
- Busquets, A. Fornós, J.J. Zafra, F. Ialucat, J. y Merino, A. 2014. Microbial communities in a coastal cave: Cova des Pas de Vallgornera (Mallorca, Western Mediterranean). *International Journal of Speleology* 43(2):205-216.
- Danczak, R.E. Johnston, M.D. Kenah, C. Slattery, M. Wrighton, K.C. y Wilkins, M.J. 2017. Members of the Candidate Phyla Radiation are functionally differentiated by carbon-and nitrogen-cycling capabilities. *Microbiome*, 5(1), 112.
- Klindworth, A. Pruesse, E. Schweer, T. Peplies, J. Quast, C. Horn, M. y Glöckner, F.O. 2013. Evaluation of general 16S ribosomal RNA gene PCR primers for classical and next-generation sequencing-based diversity studies. *Nucleic acids research*, 41(1), e1-e1.
- Konstantinidis, K.T. Rosselló-Móra, R. y Amann, R. 2017. Uncultivated microbes in need of their own taxonomy. *ISME Journal* 11: 2399-2406
- Konstantinidis, K.T. y Rosselló-Móra, R. 2015. Classifying the uncultivated microbial majority: A place for metagenomic data in the *Candidatus* proposal. *Systematic and Applied Microbiology* 38: 223-230.
- López, B. Mulet, T. y Merino, M.R.A. 2016. La cueva des Pas de Vallgornera, Mallorca (España): unas de las cuevas litorales más grandes de Europa. En: Robledo P.A y Durán J.J. Eds. Large karst system of the world. *Boletín Geológico y Minero*, 127(1), 249-259.
- Mahé, F. Rognes, T. Quince, C. de Vargas, C. y Dunthorn, M. 2015. Swarm v2: highly-scalable and high-resolution amplicon clustering. *PeerJ*, 3, e1420.
- Mora-Ruiz, M.D.R. Font-Verdera, F. Orfila, A. Rita, J. y Rosselló-Móra, R. 2016. Endophytic microbial diversity of the halophyte *Arthrocnemum macrostachyum* across plant compartments. *FEMS Microbiology Ecology* 92: 1-10.
- Okyay, T.O. y Rodrigues, D.F. 2015. Biotic and abiotic effects on CO₂ sequestration during microbially-induced calcium carbonate precipitation. *FEMS Microbiology Ecology*, 91(3).
- Pedrós-Alió, C. 2006. Marine microbial diversity: can it be determined? *Trends Microbiology* 14(6):257-63.
- Rodriguez, R. L.M. y Konstantinidis, K.T. 2014. Nonpareil: a redundancy-based approach to assess the level of coverage in metagenomics datasets. *Bioinformatics* 30:629-635.
- Rondon, M.R. August, P.R. Bettermann, A.D. Brady, S.F. Grossman, T.H. Liles, M.R. Loiacono, K.A. Lynch, B.A. MacNeil, I.A. Minor, D. Tiong, C.L. Gilman, M. Osburne, M.S. Clardy, J. Handelsman, J. y Goodman, R.M. 2000. Cloning the soil metagenome: a strategy for accessing the genetic and functional diversity of uncultured microorganisms. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(6), 2541-2547.

- Robledo, P.A., Mateos, R.M. y López, J.M. 2009. Thermal anomalies and cave structures: possible thermal origin of the Vallgornera Cave (Majorca, Spain). *The 27th Meeting of the International Association of Sedimentologists*. M Thomson Reuters – Philadelphia ISI formerly Medimond S.r.l Proceedings Citation Index. (2) 147-151.
- Shokralla, S., Spall, J. L., Gibson, J. F. y Hajibabaei, M. 2012. Next-generation sequencing technologies for environmental DNA research. *Molecular ecology*, 21(8), 1794-1805.
- Tajima, K. Aminov, R. I. Nagamine, T. Ogata, K. Nakamura, M. Matsui, H. y Benno, Y. 1999. Rumen bacterial diversity as determined by sequence analysis of 16S rDNA libraries. *FEMS microbiology ecology*, 29(2), 159-169.
- Tetu, S.G. Breakwell, K. Elbourne, L.D.H. Holmes, A.J. Gillings, M.R. y Paulsen, I.T. 2013. Life in the dark: metagenomic evidence that a microbial slime community is driven by inorganic nitrogen metabolism. *ISME Journal* 7:1227-1236.
- Viver, T. Orellana, L.H. Hatt, J.K. Urdiain, M. Díaz, S. Richter, M. Antón, J. Avian, M. Amann, R. Konstantinidis, D.T. y Rosselló-Móra, R. 2017. The low diverse gastric microbiome of the jellyfish *Cotylorhiza tuberculata* is dominated by four novel taxa. *Environmental microbiology*, 19(8), 3039-3058.

I. Fuente Merino, et al., 2018. Las cuevas y minas turísticas, el radón y la nueva Directiva Europea. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 245-250.

Las cuevas y minas turísticas, el radón y la nueva Directiva Europea

I. Fuente Merino⁽¹⁾, S. Celaya González⁽¹⁾, L. Quindós López⁽¹⁾, C. Sainz Fernández⁽¹⁾,
L.S. Quindós Poncela⁽¹⁾ y P.A. Robledo Ardila⁽²⁾

(1) Laboratorio de Radiactividad Ambiental. LARUC. Universidad de Cantabria.

C/ Cardenal Herrera Oria s/n 39011 Santander, Cantabria, quindosl@unican.es

(2) Unidad del Instituto Geológico Minero de España en las Islas Baleares. C/ Felicià Fuster nº 7,
07006 Palma de Mallorca, Illes Balears, pa.robledo@igme.es

RESUMEN

El gas radón presente de manera natural en las cavidades subterráneas constituye una fuente de radiación importante al público que permanece en su interior, en especial a los trabajadores que desarrollan su labor en las mismas. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), entre el 3% y el 14% de los cánceres de pulmón son debidos a la presencia de dicho gas. Desde hace varios años, la evaluación de la dosis recibida por los mismos ha sido requerida por la legislación española con un éxito parcial en cuanto a la respuesta de los responsables de las mismas. La nueva Directiva Europea, que entró en vigor el pasado mes de febrero de 2018 establece un valor de 300 Bq/m³ como promedio anual a partir del cual es necesario llevar a cabo labores de optimización tendentes a su reducción. La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) en su Publicación 137 ha establecido nuevos criterios de conversión a dosis, significativamente mayores que los aplicados hasta el momento presente. Se presentan los resultados encontrados en el estudio llevado a cabo en las Cuevas de Sant Josep (Vall de Uxó, Castellón) como modelo de actuación en la elaboración del Informe preceptivo que la Directiva establece mostrando las limitaciones y problemas derivados de la interpretación de los mismos.

Palabras clave: cáncer, cavidades, dosis, radón, turismo.

The show caves and mines, the radon and the new European Directive

ABSTRACT

The radon gas naturally present in the underground cavities constitutes a source of important radiation to the public that remains inside it, especially to the workers who carry out their work in them. According to the World Health Organization (WHO), between 3% and 14% of lung cancers are due to the presence of radon gas. For several years, the evaluation of the dose received by them has been required by Spanish legislation with partial success in terms of the response of those responsible for them. The new European Directive, which came into force last February, 2018, establishes a value of 300 Bq/m³ as the annual average, from which it is necessary to carry out optimization work aimed at reducing it. The International Commission on Radiological Protection (ICRP) in its Publication 137 has established new criteria for conversion to doses, significantly greater than existing at the present moment. The results found in the study carried out in the Caves of Sant Josep, (Vall de Uxó, Castellón), are presented as a model of action in the preparation of the mandatory report that the Directive establishes, showing the limitations and problems derived from the interpretation of the data.

Keywords: cancer, caves, doses, radon, tourism.

Introducción

El radón es un elemento químico de origen natural, perteneciente a la cadena de desintegración del U^{238} , producto de la desintegración del Ra^{226} y por tanto, radiactivo. Del mismo modo, una vez emitida su radiación alfa, sus descendientes de vida corta, bismutos y polonios, son más peligrosos que el propio radón, ya que se vinculan a las partículas de aire de 0.1 micras, depositándose a lo largo del tramo respiratorio y continuando allí la emisión de radiación alfa. El radón se encuentra en pequeñas proporciones en el aire y es responsable de parte de la radiación natural recibida por los humanos.

El radón se produce de manera natural por la desintegración del radio contenido en tipos de rocas como los fosfatos, las pizarras, y otras rocas ígneas y metamórficas como el granito, el gneis y los esquistos, si bien la concentración de dicho radio puede variar significativamente.

El fondo geológico de Europa es rico en rocas productoras de gas radón, desde el fondo granítico de España y Portugal, a los cinturones de rocas verdes (secuencias de rocas sedimentarias y volcánicas, con núcleo de granito-gneis) en Finlandia, Noruega y Rusia. Por este motivo, la exposición al radón es un hecho común en Europa, con regiones que presentan mayor incidencia que otras. Algunos estudios muestran concentraciones de radón desde 10 a más de 100.000 Bq/m³ en los países europeos (UN, 2013).

El gas radón emitido por las rocas escapa a través de fracturas y se concentra en las cuevas y bolsas de agua presentes antes de su salida a la atmósfera (Quindós *et al.*, 2013). En el caso de las emisiones superficiales de gas radón, este se concentra en los espacios cerrados, tales como las viviendas. Por este motivo, la exposición al radón no está limitada a la inhalación del gas a través de la respiración, sino que también se produce al beber agua que contenga radón o al inhalar el gas desorbido del agua como consecuencia de la ducha y de las labores diarias de cocina asociadas a hervir el agua. Actualmente, el radón puede extraerse del agua mediante filtros, pero estos se instalan solamente en grandes sistemas de potabilización de agua.

Para analizar el efecto de la radiación natural en humanos, la consideración general es que la radiación total a la que el ser humano está expuesto supone una dosis equivalente a 2.4 miliSievert (mSv) al año a nivel mundial, quedando establecido en España en 2.8 mSv, que se define como "fondo radiactivo".

El efecto de la radiación natural ha sido considerado como nulo para la salud humana durante muchos años, aunque esta idea cambió por completo durante las décadas de los 70 y 80, cuando los estudios mostraron que la concentración de radón en interiores, en diferentes países, variaba entre decenas y cientos de Bq/m³.

El radón es un producto considerado como cancerígeno por la OMS, por la *International Agency for Research on Cancer*, (IARC), y por la *Environmental Protection Agency*, (EPA), en Estados Unidos. Estas agencias clasifican el radón como cancerígeno de los Grupos 1 o A, respectivamente. En concreto, el mayor efecto de la inhalación de radón es el cáncer de pulmón. Estudios realizados por la OMS (WHO, 2009), muestran que la presencia de radón en aire es la segunda causa de cáncer de pulmón en la población en general, después del tabaco, con una incidencia del 3

al 14% en función de la concentración de radón media en el país en estudio y de los hábitos tanto constructivos de las viviendas como de los residentes en las mismas. El pasado año fue incluido por la IARC de la OMS como una de las 10 medidas de prevención del cáncer.

El radón no queda retenido en el tracto respiratorio. Sin embargo, el 90% de sus descendientes de vida corta se asocian con partículas de aerosol presentes en el aire, que pueden ser retenidas a diferentes niveles del sistema respiratorio en función de su tamaño. Las partículas de menor tamaño, la porción respirable, alcanza las zonas más sensibles de los tejidos bronquial y pulmonar, acumulándose en él junto con el 10% restante de productos de la desintegración. El depósito de estas partículas es fuente de emisión de partículas alfa, aumentando la probabilidad de desarrollo de un proceso de daño de estructuras del ADN que pueden desembocar en la aparición de una enfermedad maligna como el cáncer de pulmón.

La principal entrada de radón en edificios es a través del suelo, aunque altas concentraciones de radón en agua pueden provocar el aumento de la concentración de radón en el aire interior. En el caso concreto de la región de Galicia y norte de Portugal, el problema de la exposición al radón es importante dada la base granítica de la zona, que además es usado como material de construcción, especialmente en paredes. Además, la alta disponibilidad de agua en la región permite que muchas viviendas dispongan de un sistema de abastecimiento de agua individual, con pozos de suministro directo de agua, sin filtrado intermedio. En consecuencia, la geología, unida al régimen de precipitaciones son factores clave para la identificación de la zona como de gran potencialidad de riesgo ambiental debido a la convivencia de la población con elevadas concentraciones de radón.

La medida de la concentración de radón requiere el uso de sistemas simples, consistentes en detectores de radón digitales o en kits de testeo de radón de bajo coste. Las concentraciones de radón en un mismo espacio presentan variaciones temporales importantes. Asimismo, el radón presenta gran movilidad, y por tanto hay grandes variaciones en la concentración de espacios adyacentes (EPA, 1990). Por otra parte, son las medidas integradas, no las puntuales, las que tienen relación con los efectos sobre la salud.

Directiva Europea y radón

La nueva Directiva Europea 2013/59/EURATOM de 5 de Diciembre de 2013 vino a abolir las ya existentes 89/618; 90/641; 96/29; 97/43 y 2003/122 tratando de crear un sistema más homogéneo y fácil de aplicar desde el punto de vista de protección radiológica. La misma entró en vigor en nuestro país el pasado mes de febrero y llevará consigo la modificación del Reglamento de Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes.

El radón aparece en la Directiva en dos aspectos básicos: de un lado profundiza en la protección de los puestos de trabajo y de otro incluye la de los ciudadanos a través de la construcción de viviendas "libres de radón". Para todo ello centra su actuación en el Plan Nacional del Radón que todos los Estados miembros deberán desarrollar teniendo como referencia los apartados incluidos en el Anexo XIV de dicha Directiva, con especial interés en la definición y acciones de remedio en las determinadas como *Radon Prone Areas*, que en nuestro país han sido definidas por el Consejo de Seguridad Nuclear, tal y como se refleja en la figura 1.



Figura 1. Cartografía del potencial del Radón en España (Radon Prone Areas), definidas por el Consejo de Seguridad Nuclear.

En España, en el momento presente, la legislación relativa a puestos de trabajo viene controlado por la IS-33, BOE, 2012 de 21 de diciembre de 2011 que básicamente aparece recogido en la figura 2. Dado que el factor de conversión a dosis a partir de la concentración de radón, recogida



Figura 2. Marco legislativo español sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural en relación al radón en puestos de trabajo (BOE, 2012, n° 22, de 21 de diciembre de 2011).

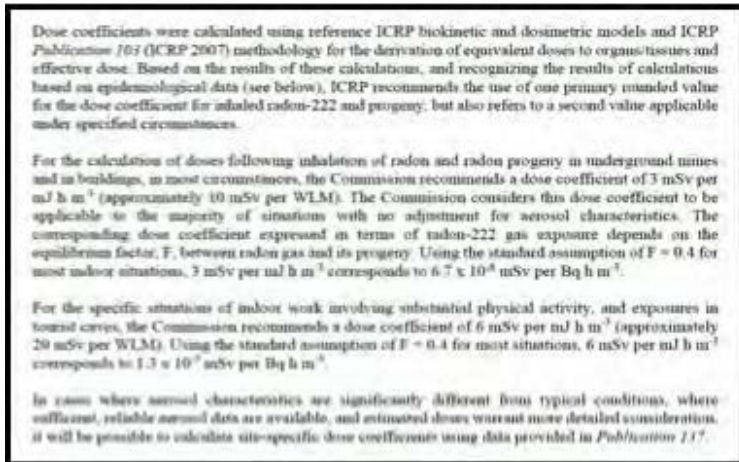


Figura 3. Extracto del documento de la ICRP en el que se modifican los factores de conversión a un modelo dosimétrico en lugar del epidemiológico, multiplicando los mencionados factores en prácticamente un factor 2.

en nuestra legislación es de 5 mSv/WLM y avalado por la ICRP, el límite que establece la mencionada Instrucción de 1000 Bq/m³ para establecer un alto control viene relacionado con una dosis de aproximadamente 6 mSv/año para unas condiciones estándar de $F=0.4$ y un tiempo de exposición de 2000 horas.

La ICRP en su última reunión en Sidney, 13-17 Abril, 2017 reflejada posteriormente en su Publicación 137, ha venido a cambiar los factores de conversión de manera importante al incluir un modelo dosimétrico en lugar del epidemiológico empleado hasta la fecha, multiplicando los mencionados factores en prácticamente un factor 2, tal y como se desprende de la figura 3.

En el marco que plantea la nueva Directiva, las Comunidades Autónomas a través de sus consejerías de Industria pasan a ser las responsables, y por tanto, a las que habrá que acudir para inscribirse en la sección de empresas que trabajan con radiación natural. En este sentido, la Comunidad Autónoma de Madrid acaba de publicar en el Boletín Oficial de la misma, una Resolución de 6 de marzo de 2018 de la Dirección General de Industria, Energía y Minas por la que se publica el modelo de impreso correspondiente a la declaración de actividad laboral en la que existen fuentes naturales de radiación.

En la Cueva de Sant Josep, la Vall d Uixó, Castellón, el pasado mes de abril de 2017 se llevó a cabo el inicio de una campaña de medidas de gas radón en 7 puntos de la cavidad mediante detectores CR39, que posteriormente fueron medidos en el único laboratorio acreditado ENAC ISO 17025 existente en nuestro país, La RUC, para un tiempo de exposición del 14/04/2017 al 14/09/2017. Los detectores fueron distribuidos espacialmente en cada punto atendiendo a aspectos topográficos, geológicos, geomorfológicos, logísticos y guardando una distancia adecuada entre ellos de forma que toda la cavidad pudiera ser analizada. En este sentido, como quiera que la legislación establece que lo que hay que proporcionar a la administración para la futura toma de medidas es la concentración promedio anual, actualmente se está llevando a cabo el análisis de los resultados de la campaña 14/09/2017 a 14/09/2018 (además de que se han pro-

cedido a la reposición de nuevos detectores) para poder establecer las medidas correctivas, si fuese necesario, al amparo de los resultados obtenidos en el global de la investigación.

En resumen, podemos concluir que, en un futuro próximo, la regulación de radón en puestos de trabajo, especialmente en cuevas y/o minas turísticas, va a cobrar un interés creciente. Afortunadamente, muchas de las cuevas turísticas de nuestro país ya han realizado estudios previos de las concentraciones de radón (Quindós et al., 2014) en sus recintos y en algunos casos tomado medidas relacionadas básicamente con el tiempo de permanencia de los trabajadores. Sin embargo, será necesario esperar a los criterios que establezca el Plan Nacional de Radón y la legislación vigente actualizada derivada de la transposición de la Directiva Europea para poder tener un marco legislativo al que poder adaptarnos.

Agradecimientos

El presente trabajo es fruto de una colaboración establecida con el IGME en relación a la utilización del gas radon como trazador y elemento que contribuye a la dosis del personal que trabaja en cuevas y minas turísticas. Nuestro agradecimiento por la confianza depositada en nuestro grupo LARUC.

Referencias

- UN. 2013 Annex E: *Sources to effects assessment for radon in homes and workplaces*. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2006) (United Nations) 2, 209–10, 2008, retrieved 17 August 2013.
- Quindós, L.S., Sainz, C., Fuente, I., Gutierrez-Villanueva, J.L. y González-Diez, A. 2013. The use of radon as tracer in environmental sciences. *Acta Geophysica*, 61 (4), 848-858.
- WHO. 2009. *Handbook on Indoor Radon. A public health perspective*. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data. ISBN 978-92-4-154767-3.
- EPA. 1990 *Toxicological profile for radon*, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U.S. Public Health Service, In collaboration with U.S. Environmental Protection Agency, December 1990.
- BOE. 2012. Nº 22. Boletín Oficial del Estado, Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural.
- Quindós, L, Quindós, L.S., Fuente, I., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M. y Benavente-Herrera, J. 2014. Contenido de radón en aire en la Gruta de las Maravillas (Aracena). Primeros resultados. In: Calaforra, J.M. y Durán, J.J. (eds.). V Congreso Español de Cuevas Turísticas y Iberoamericano. *Iberoamérica subterránea*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 283-293.

A photograph of a cave interior. The ceiling is covered with numerous stalactites of varying lengths and thicknesses, some with bulbous shapes. The walls are rocky and uneven. In the foreground, a large, dark, wet stalagmite rises from the floor, its surface glistening with moisture. The lighting is warm and focused, highlighting the textures of the rock formations.

**Condiciones ambientales
en cuevas y minas turísticas**

L. Ojeda Rodríguez, et al., 2018. Acondicionamiento e instalación de un equipo de espectroscopía láser (CO_2 , CH_4 , $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ y $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$) en la cueva de Nerja (Málaga). En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 253-264.

Acondicionamiento e instalación de un equipo de espectroscopía láser (CO_2 , CH_4 , $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ y $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$) en la cueva de Nerja (Málaga)

L. Ojeda Rodríguez⁽¹⁾, I. Vadillo Pérez⁽¹⁾, C. Liñán Baena^(1,2), S. Foster⁽³⁾, F. Carrasco Cantos⁽¹⁾, F.M. Villodres Montes⁽³⁾, D. Jimena Fernández⁽⁴⁾, A. Atencia Prieto⁽⁴⁾ y J. Benavente Herrera⁽⁵⁾

(1) Grupo de Hidrogeología, Departamento de Geología. Campus de Teatinos, s/n. 29071. Universidad de Málaga. luciaor@uma.es, vadillo@uma.es, crilinbae@uma.es, fcarrasco@uma.es

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

(3) Amiston S.L. C/Ventanilla, 17. 18001. Granada. steve.foster@amiston.com, fran.martin@amiston.com

(4) Club de Espeleología Cueva de Nerja. C/ Jacinto Benavente, 2. 29780. Nerja (Málaga)

(5) Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, C/ Ramón y Cajal, nº 4. 18071 Granada. jbenaven@ugr.es

RESUMEN

El desarrollo de los equipos de espectroscopía láser CRDS (*Cavity Ring Down Spectroscopy*) permite la medida de las concentraciones de CO_2 y CH_4 en el aire y la relación isotópica del C ($\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ y $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$) a tiempo real e, *in-situ*, en medios subterráneos. Sin embargo, las características ambientales tan particulares de una cueva, en especial las permanentes condiciones de elevada humedad, y la necesidad de mantener una temperatura del equipo constante, son factores importantes que deben tenerse en cuenta para garantizar el mantenimiento del equipamiento a largo de plazo, así como la prevención de su deterioro. En este trabajo se presenta el diseño y la metodología empleada durante la instalación de un equipo de espectroscopía láser en el interior de la cueva de Nerja. En la actualidad, el equipo mide en dos puntos de las Galerías Turísticas y en dos de las Galerías Altas -no visitables-, cuyo muestreo se realiza a través de sendos capilares conectados al equipo. La instalación se llevó a cabo en las Galerías Turísticas, en un punto próximo a la zona no habitada a las visitas, a fin de facilitar la instalación de los capilares de muestreo de aire en las Galerías Altas.

Palabras clave: ambientes extremos, cavidad kárstica, cueva de Nerja, equipo de espectroscopía láser.

Conditioning and installation of a laser CRDS spectrometer (CO_2 , CH_4 , $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ y $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$) in Nerja cave (Málaga)

ABSTRACT

Development of laser CRDS spectrometer (*Cavity Ring Down Spectroscopy*) have enabled the measurement of CO_2 and CH_4 air concentrations and its C isotope relation in real-time and, *in situ*, within subterranean environments. However, the peculiar environmental cave characteristics, especially steady elevated humidity, and the need of keeping a constant temperature in the equipment, are the main factors that must be taken into account to ensure a long-term maintenance and avoid deterioration. In this work we present the design and methodology used during the installation of a laser CRDS spectrometer inside Nerja cave. Currently, the equipment measures in two points in the Tourist Galleries, and in two in the High Galleries, through capillary tubes connected to it. Installation was conducted in the Tourist Galleries, in a point close to the High Galleries, in order to ease the air capillary connection to the High Galleries.

Keywords: extreme environments, karst cavity, laser CRDS spectrometer, Nerja cave.

Introducción

El dióxido de carbono (CO_2) ha sido ampliamente estudiado en cuevas y ambientes subterráneos kársticos ya que es un componente clave en los procesos de disolución y precipitación de carbonatos (Dreybrodt, 2000), así como en el crecimiento de espeleotemas (Baldini *et al.*, 2008). Además, su control se hace crucial en cuevas turísticas para la conservación de arte rupestre (Houillon *et al.*, 2017) y debido a la toxicidad que puede representar para el ser humano (Smith, 1999). En el estudio del ciclo global del carbono las cavidades representan fuentes y sumideros de gases como CO_2 y metano (CH_4). Los flujos de estos gases se ven influenciados por mecanismos de difusión o advección que favorecen el transporte de gas desde y/o hacia la atmósfera o la zona no saturada del acuífero. La señal isotópica del carbono permite rastrear las fuentes de CO_2 y CH_4 en estos ambientes. Así, valores de -24‰ de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ se asocian con CO_2 producido en el suelo, mientras que valores de -9‰ son característicos de CO_2 atmosférico (Amundson *et al.*, 1998; Peyraube *et al.*, 2013). Del mismo modo, la señal isotópica de C en CH_4 se caracteriza por tener valores de -47‰ en la atmósfera (Miller *et al.*, 2002), mientras que el CH_4 producido de forma biogénica tiene valores inferiores a este valor atmosférico (Whiticar, 1999). En el caso del metano, algunas cavidades pueden actuar como sumideros de este gas debido a su consumo por bacterias metanotrofas, y por tanto, la señal isotópica se ve enriquecida con respecto a la señal atmosférica (Mattey *et al.*, 2013; McDonough *et al.*, 2016).

Tradicionalmente, las medidas isotópicas de estos gases se han realizado a través de muestras discretas que posteriormente se han medido en laboratorios con equipos de espectrometría isotópica de masas. Sin embargo, las medidas en continuo y a tiempo real permiten ampliar la distribución temporal y observar procesos de detalle a escala diaria y horaria imposibles de discernir con medidas puntuales. Hoy en día los equipos de espectroscopia láser-CRDS (*Cavity Ring Down Spectroscopy*), de tamaño inferior y más robustos, permiten mayor versatilidad, la obtención de medidas directas en campo y el registro de datos de concentración e isotópicos de forma continua, lo que aumenta significativamente la resolución temporal y espacial de los datos.

En este trabajo se presenta el diseño y la metodología que se ha llevado a cabo para la instalación de un equipo de espectroscopia laser CRDS en el interior de la cueva de Nerja y el registro de parámetros en el interior de la cavidad y de muestras de la zona no saturada.

La cueva de Nerja está ubicada en las proximidades del pueblo que da nombre a la cavidad, (provincia de Málaga, Andalucía) y es una de las cuevas turísticas más grandes y más importantes de la Península Ibérica. Recibe anualmente cerca de medio millón de visitas. La cavidad tiene un desnivel de cotas en el total de la cueva prácticamente horizontal y aproximadamente un tercio de la misma está abierto para las visitas (Galerías Turísticas). Las otras zonas, las Galerías Altas y las Galería Nuevas, son accesibles solo para estudios científicos y actividades de conservación (figura 5). Si bien la red de estaciones de monitorización en el interior de la cueva lleva registrando datos horarios de temperatura del aire, humedad relativa, concentración de CO_2 , presión, velocidad del aire y dirección del flujo, y se han podido establecer los mecanismos de funcionamiento de la cavidad (Liñán *et al.*, 2018), existen procesos que ocurren a menor escala temporal y parámetros no recogidos con la red actual de monitorización. Por ello, la información que suministra el equipo de espectroscopia láser CRDS va a aumentar el conocimiento de esta cavidad permitiendo discernir las fuentes y sumideros de CO_2 y CH_4 en este ambiente subterráneo en concreto, proporcionando una idea general en otros sistemas endokársticos similares.

Problemática de las medidas

Las características ambientales particulares del interior de la cueva en cuanto a humedad y temperatura hacen necesario llevar a cabo una serie de medidas ante problemas como condensación o corrosión, tanto en el propio equipo como en sus componentes. La condensación de agua en el sistema favorece el deterioro de los elementos electrónicos y puede producirse en la pantalla, en el propio analizador y en otros periféricos del equipo, como el sistema multiválvulas. Del mismo modo, las altas concentraciones de vapor de agua afectan a las medidas realizadas por el equipo, por lo que tanto para prevenir la condensación y corrosión interna, como para obtener medidas fiables, se debe disminuir el vapor de agua de entrada.

En la Parcela Experimental de la cueva de Nerja existen sondeos de investigación que atraviesan la zona vadosa del acuífero. Estos sondeos tienen como particularidad que presentan contenidos de CO₂ que alcanzan en algunos casos los 60.000 ppmv (Benavente *et al.*, 2010; Vadillo *et al.*, 2010). El analizador, sin embargo, mide un valor límite de concentración de CO₂ de 4.000 ppmv.

Además de características ambientales que pueden afectar al equipo, un entorno natural expuesto a los eventos climatológicos, como tormentas y rayos, puede afectar de forma irreversible a sus componentes electrónicos e informáticos.

Características y esquema técnico del equipo

El equipo de espectroscopía laser CRDS es el analizador PICARRO G2201-i. Este equipo puede trabajar en tres modos: midiendo solo CO₂, midiendo solo CH₄ y un modo combinado de medidas de CO₂ y CH₄. Para el modo combinado la precisión del analizador es de menos de 0,16 ‰ para $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ y menos de 1,15 ‰ para $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$. La precisión mejora cuando el equipo mide solo CO₂ o CH₄. Para el modo que solo mide CO₂ la precisión de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ es inferior a 0,12 ‰. Cuando solo mide CH₄ la precisión es menor a 0,8 ‰ para $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$. La precisión de la concentración de CO₂ es 200 ppb ± 0,05 % de lectura (¹²C) y 10 ppb ± 0,05 % de lectura (¹³C); para CH₄ es 5 ppb ± 0,05 % de lectura (¹²C) y 1 ppb ± 0,05 % de lectura (¹³C). El intervalo de medida es cada dos segundos.

Los investigadores, junto con el personal técnico de la casa comercial suministradora del equipo, desarrollaron las ideas para habilitar la preservación óptima del equipo y adaptarlo al plan de medidas espacial en el interior de la cavidad. Para ello, el equipo en sí (PICARRO G2201-i) está asociado a otros componentes y periféricos, los cuales se exponen a continuación:

- Sistema de válvulas solenoides que controla las secuencias de muestreo y medición a través del *software* y al que se conectan los diferentes capilares de muestreo (figura 1A).
- Sistema desecante "Drierite" (sulfato de calcio) (figura 1B).
- Bomba de vacío del analizador (figura 1F).
- Bomba de diafragma para facilitar la toma de muestras a larga distancia (figura 1D).
- Cuatro capilares de 6 mm de diámetro y longitud variable, en función de la distancia al punto de muestreo seleccionado (T1 a T4). Están formados por aluminio revestido de plástico de color negro, lo que garantiza su resistencia y no corrosión en las peculiares condiciones am-

bientales de la cavidad (se forma una capa de óxido de aluminio que lo hace impermeable) (figura 1C).

- Secador de membrana Nafion®, que garantiza la entrada de aire seco en el analizador.
- Bomba de acuario para secado ocasional del Nafion® según protocolo (figura 1F).
- Trampa de CO₂, Supelco inc., volumen 250cc. Reduce elevadas concentraciones de CO₂ a decenas o por debajo de 1 ppm (figura 1E).
- Sistema de alimentación ininterrumpida (S.A.I.). Es un dispositivo eléctrico, modelo *Salicrone 1100*, con una autonomía del orden de 20-25 minutos. Este elemento tiene doble funcionalidad: alimentar al analizador si se corta la corriente eléctrica y suavizar los posibles picos de tensión.
- Teclado para manejo del software (figura 1G).
- Pantalla para visualización de datos (figura 1G).
- Armario con baldas y cortinas plásticas para ubicación y protección de los diferentes elementos (figura 1G).

El esquema de la figura 2 representa el diseño de la infraestructura. El sistema de multiválvulas (figura 3, válvulas 1-6) está compuesto por 6 válvulas solenoides que se alimentan con un cable conectado al analizador y que se controla mediante secuencias de medición establecidas en el software del equipo. Las conexiones T1-T5 (figura 3) corresponden a las tomas de muestra bombeadas a través de los distintos capilares (figura 2, Muestra 1-5) mediante la bomba de arrastre de muestra que tiene un flujo alto de 6 L/min. Una condición indispensable para el buen uso del equipo es que el analizador esté seco. Debido a esto y a las características ambientales anteriormente descritas de la cavidad, se hace necesario el uso de un doble sistema de secado: el secador de muestra Nafion® y el secador químico (CaSO₄, Drierite®). Las muestras tomadas a través de las conexiones T1-T5 desde las distintas salas, pasan por la membrana secadora Nafion® antes de salir del sistema de válvulas hacia el analizador. En esta membrana se crea un contraflujo entre el aire muestreado y el aire seco de la propia salida de aire del analizador. Hay una bomba de vacío que tiene una doble función; por un lado, introduce la muestra hacia el analizador con un flujo lento de 30 mL/min desde el circuito de flujo alto creado por la bomba de arrastre y por otro lado, crea el contraflujo necesario para secar la muestra en el secador Nafion®. La conexión E-Nafion Contraflujo (figura 3) es la usada para conectar el retorno de la bomba de vacío del analizador para utilizarse como gas seco.

Las conexiones TD1 y TD2 (figura 3) se usan para las tomas de muestras desde bolsas o para introducir botellas de calibración (figura 2). Las muestras que entran desde estas conexiones no pasan por el secador de muestra Nafion® antes de salir por el sistema de válvulas y entrar al analizador. Debido a esto, el secador de muestra Nafion® debe secarse para disminuir la concentración de agua por debajo de 0,3 ppmv, la concentración óptima para que el equipo funcione. Para secar el secador de muestra Nafion® se usa una bomba de acuario.

Todo el sistema está protegido de la humedad ambiental y su condensación a través del propio calor emitido por el mismo. Para evitar la condensación y mantener la temperatura óptima del equipo se procedió a tapar la estructura y el sistema multiválvula con cortinas de material plástico (figura 7); así, el propio calor mantiene el aire en el compartimento habilitado entre 8-9 °C por encima de la temperatura ambiente (19-20 °C). Otra ventaja es que ayuda a disminuir la visión del equipo desde el vial turístico.



Figura. 1. A) Sistema de válvulas solenoides; B) Sistema desecante Drierite; C) Capilares de 6 mm de aluminio revestido; D) Bomba de arrastre; E) Trampa de CO₂; F) Bomba de acuario y bomba de vacío; G) Teclado, pantalla y estantería.

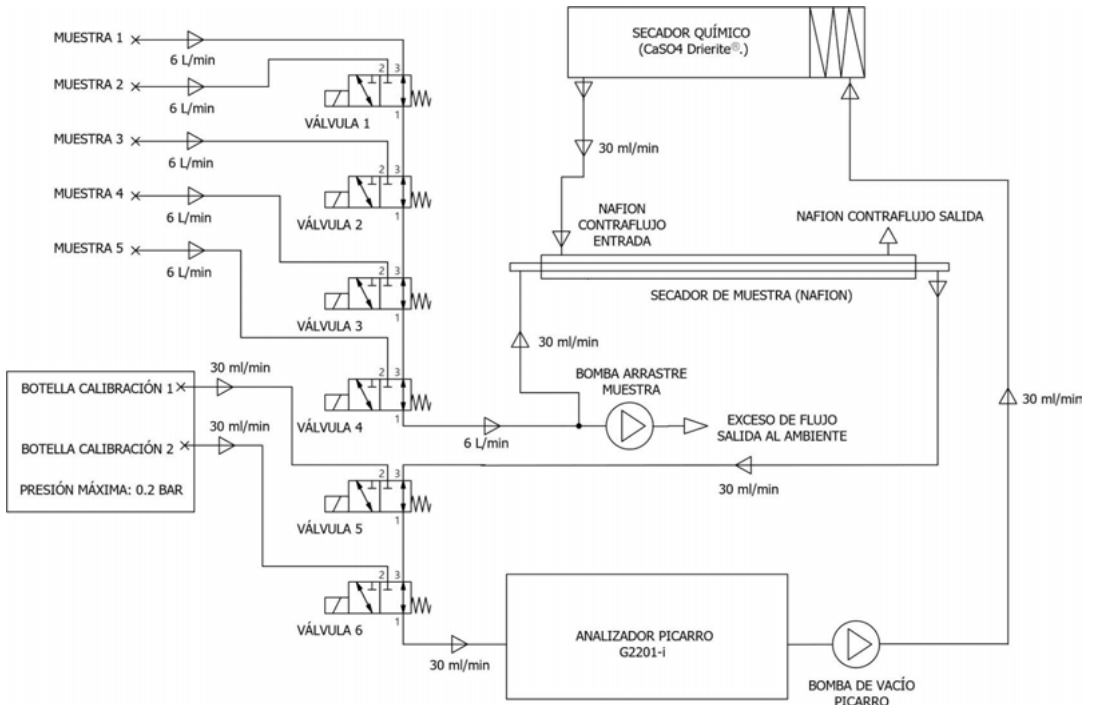


Figura 2. Esquema del diseño del sistema equipo- componentes PICARRO G2201-i.

La caja multiválvulas también está convenientemente sellada, además de que se le puso en su interior con gel de sílice en para absorber el posible exceso de humedad. Los capilares de muestreo están formados por aluminio revestido de plástico confiriéndole resistencia a la corrosión.

Esquema de instalación y medidas en la cueva

El punto seleccionado para la instalación del equipo fue en el interior de un túnel artificial existente en la Sala de Cataclismo, próximo al sector conocido como “El Puente” (figura 5). Dicha localización permite ubicar el equipo en el interior de la cueva de forma discreta y relativamente alejado del vial turístico, de modo que no impacte en el paisaje subterráneo y genere el mínimo ruido posible, sea accesible para el control de funcionamiento y descarga de datos y permita la toma de muestras tanto del sector turístico como del no habilitado, a través de capilares distribuidos por las diferentes salas.

Los puntos de muestreo de aire (figura 4) se ubican en las salas de Cataclismo (puntos T1 y T2), Columnas de Hércules (T3) e Inmensidad (T4), localizándose los puntos T3 y T4 en la zona no habilitada para las visitas. Los capilares que muestrean el aire de los puntos T3 y T4 llegan a los mismos a través de la única perforación del túnel artificial (figura 5 Izq.) que conecta las galerías turísticas y las no habilitadas y siguen el camino de los cables eléctricos ya existentes, siempre y



Figura 3. Lateral de la caja multiválvulas con las conexiones de los distintos componentes del equipo PICARRO G2201-i.

cuando ha sido posible, y teniendo en cuenta el mapa de riesgo arqueológico. Las localizaciones se escogieron en función del conocimiento previo del sistema y los inconvenientes técnicos que suponen colocar cientos de metros de capilar. En el caso del punto T4 se eligió debido a que la concentración de metano presenta un descenso en su contenido con respecto al resto de salas.

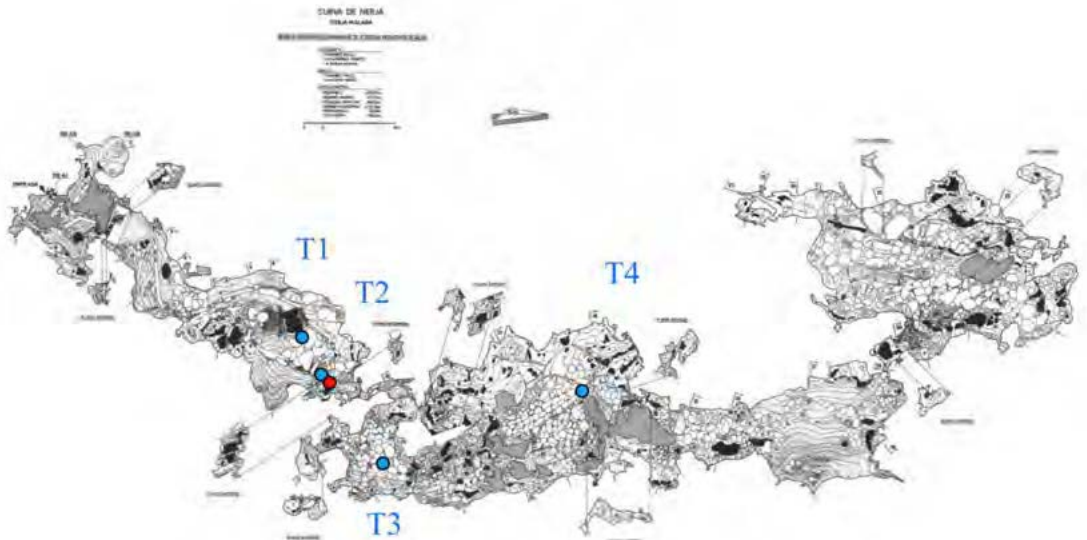


Figura 4. Ubicación del equipo Picarro (punto rojo: "El Puente") y de los puntos de muestreo T1 a T4 (puntos azules).



Figura 5. Izq. Vista del tunel con cable introducido en la perforación; dcha. Instalación del equipo y sus componentes en la localización (Sala del Cataclismo).

El punto T3 se sitúa en la sala del sector no habilitado más cercana al túnel, y el punto T1 es el más próximo al equipo en el sector turístico. La localización de T2 es un punto de conexión entre ambas zonas. La acometida de dichos capilares ha sido realizada por el Instituto de Investigación Cueva de Nerja y la Universidad de Málaga en colaboración con el Club de Espeleología Cueva de Nerja.

Inicialmente se ha programado una secuencia de registro de datos cada 60 minutos en cada una de las localizaciones. Así, el equipo registrará los parámetros medidos en el punto T1 durante 60 minutos, después en los puntos T2, T3 y T4 (60 minutos en cada punto) y volverá a iniciarse la secuencia (T1, T2, T3 y T4). Se comprobó, al iniciarse la secuencia, que desde que se empieza a succionar aire en cada uno de los puntos, los valores para cada punto se estabilizan en menos de 10 min en todos los casos (Fig. 7). Sin embargo, para obtener un valor representativo en el caso de que las variaciones en los puntos sean elevadas, se optó por establecer el tramo de medida de 60 minutos y así obtener como dato representativo el valor promedio del tramo final, aun a sabiendas que pueden existir variaciones temporales por debajo de la escala horaria. De este modo, se obtienen 6 datos de cada uno de los parámetros para cada punto y cada día.

El plan de muestreo también incluye medidas con Bolsas Tedlar que cubren zonas de la cavidad a las que no llegan los capilares de succión del aire. Estas bolsas se conectan al equipo por una de las entradas habilitadas en la caja multiválvulas.

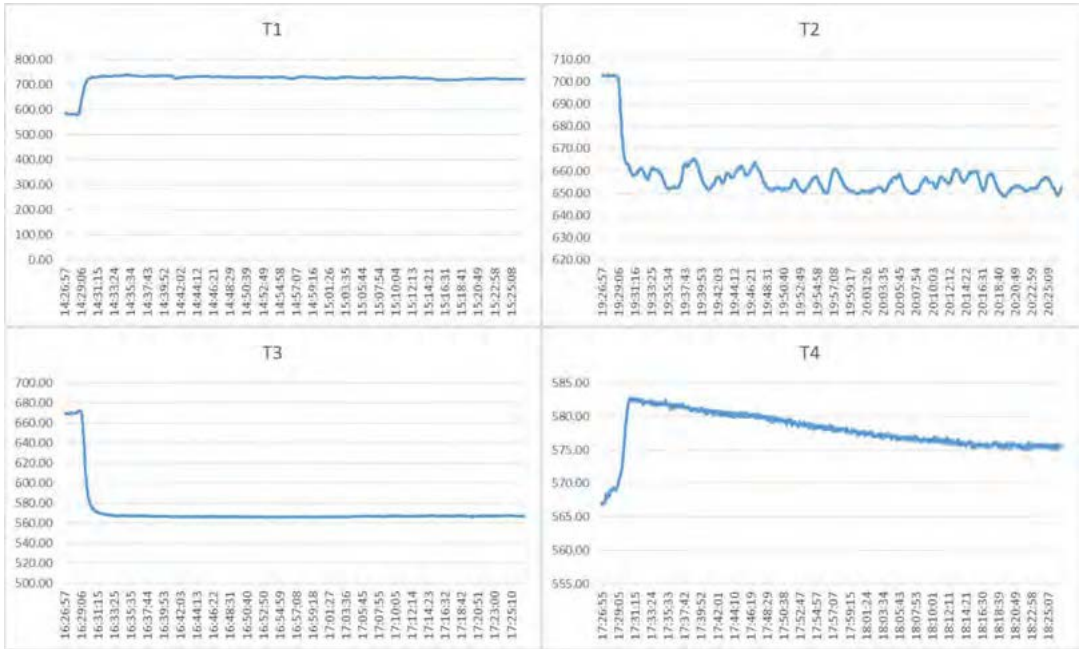


Figura 6. Evolución de la concentración de CO₂ en cada punto (T1 a T4) durante 60 min. En todos los puntos el analizador comienza a medir el aire correspondiente de cada punto en menos de 10 min.

En futuras investigaciones, una vez que se establezca un modelo de comportamiento, se pretende cambiar la secuencia para medir en un solo punto, y de este modo, observar las variaciones que se producen a escalas por debajo de la horaria.



Figura 7. Izq. Vista desde el vial turístico; Dcha. Estructura cubierta.

En la actualidad, el secador químico Drierite ha sido reemplazado una vez desde su instalación, a los tres meses de su puesta en marcha. Las condiciones de baja ventilación en verano y otoño, y por tanto mayor humedad y condensación, acortan su uso. Cuando la ventilación es muy efectiva (época invernal) su uso se prolonga considerablemente.

Medidas de muestras de la parcela experimental

Una de las problemáticas específicas en esta investigación es que en la zona vadosa del sistema de la cueva de Nerja (parcela experimental) se obtienen muestras de aire que sobrepasan decenas de miles de ppmv de CO_2 , lo que supera el valor límite de medida (4.000 ppmv) y, aun con un cierto rango lineal por encima de esa concentración, los valores medidos de CH_4 y $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ en dichas muestras son analizados erróneamente por el equipo. Para solucionarlo ha sido necesario conectar una trampa de CO_2 (figura 1E) entre el analizador y la bolsa que contiene la muestra, lo cual reduce considerablemente el contenido de CO_2 de la muestra (< 5 ppm) y permite medidas de precisión de CH_4 y $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$.

Conclusiones

El desarrollo de los analizadores de espectroscopia laser CRDS ha favorecido su uso en entornos diversos y fuera de los laboratorios. La instalación de uno de ellos en la cueva de Nerja permite obtener medidas en continuo de las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y la relación isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ en las moléculas de CO_2 y CH_4 presentes en el aire de la cavidad. Dado que el equipo mide simultáneamente las concentraciones de CO_2 y CH_4 , es posible cuantificar y corregir las influencias cruzadas de estos gases y entender mejor los procesos de almacenamiento y tasas de renovación del aire, aspecto de gran trascendencia en la gestión de la cueva y la protección del patrimonio natural y cultural que yace en su interior.

Dadas las condiciones de elevada humedad y una temperatura media de 19-20 °C, las labores de diseño de la infraestructura y su instalación se han enfocado a reducir los problemas relativos a condensación y corrosión del sistema, así como a la entrada óptima de la muestra en el equipo para ser medida con precisión. Para ello, se utiliza un sistema de secado físico y químico (Membrana Nafion- CaSO_4 Drierite) y el aumento de la temperatura del compartimento que produce el propio calor emitido por los diversos elementos de la instalación.

Referencias

- Amundson, R., Stern, L., Baisden, T. y Wang, Y. 1998. The isotopic composition of soil and soil-respired CO_2 . *Geoderma*, 82, 83-114.
- Baldini, J.U.L., McDermott, F., Hoffmann, D.L., Richards, D.A. y Clipson, N. 2008. Very high-frequency and seasonal cave atmosphere P_{CO_2} variability: Implications for stalagmite growth and oxygen isotope-based paleoclimate records. *Earth and Planetary Science Letters*, 272, 118-129.
- Benavente, J., Vadillo, I., Carrasco, F., Soler, A., Liñán, C. y Moral, F. 2010. Air carbon dioxide contents in the vadose zone of a mediterranean karst. *Vadose Zone Journal*, 9, 126-136.
- Deaybrodt, W. 2000. Equilibrium Chemistry of Karst Waters in Limestone Terranes. En: A.B. Klimchouk,

- D.C. Ford, A.N. Palmer, y W. Dreybrodt (Eds.), *Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers*, Huntsville (Alabama, USA): National Speleological Society, 126-135.
- Houillon, N., Lastennet, R., Denis, A., Malaurent, P., Minvielle, S. y Peyraube, N. 2017. Assessing cave internal aerology in understanding carbon dioxide (CO₂) dynamics: implications on calcite mass variation on the wall of Lascaux Cave (France). *Environmental Earth Sciences*, 76, 4, 170.
- Liñán, C., del Rosal, Y., Carrasco, F., Vadillo, I., Benavente, J. y 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.
- Mattey, D.P., Fisher, R., Atkinson, T.C., Latin, J.-P., Durell, R., Ainsworth, M., Lowry, D. y Fairchild, I.J. 2013. Methane in underground air in Gibraltar karst. *Earth and Planetary Science Letters*, 374, 71-80.
- McDonough, L.K., Iverach, C.P., Beckman, S., Manfield, M., Rau, G.C., Baker, A. y Kelly, B.F.J. 2016. Spatial variability of cave-air carbon dioxide and methane concentrations and isotopic compositions in a semi-arid karst environment. *Environmental Earth Sciences*, 75, 700.
- Peyraube, N., Lastennet, R., Villanueva, J.D., Houillon, N., Malaurent, P. y Denis, A. 2016. Estimation of epikarst air P_{CO₂} using measurements of water δ¹³C_{TDIC}, cave air P_{CO₂} and δ¹³C_{CO₂}. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 118, 1-17.
- Smith, G.K. 1999. Foul air in limestone caves and its effect on cavers. En: 22nd Australian Speleological Federation's Conference Proceedings, January 1999, 44-58.
- Vadillo, I., Benavente, J., Soler, A., Carrasco, F. y Liñán, C. 2010. Isotopic (¹³C) Signature of CO₂ Sources in the Vadose Zone of a Mediterranean Karst (Nerja Cave Site, Southern Spain). Andreo, B. et al (Eds), *Advances in research in Karst Media*, 463-468.
- Whiticar, M.J. 1999. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chemical Geology*, 161, 291-314.
- Zalicki, P. y Zare, R.N. 1995. Cavity ring-down spectroscopy for quantitative absorption measurements. *The Journal of Chemical Physics*, 102, 2708.

R. Giménez Portero, *et al.*, 2018. Primeros resultados de la monitorización ambiental en la Cueva de las Güixas (Villanúa, Pirineo central). En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 265-278.

Primeros resultados de la monitorización ambiental en la cueva de las Güixas (Villanúa, Pirineo central)

R. Giménez Portero⁽¹⁾, M. Bartolomé Úcar⁽²⁾, L. Ezquerro Ruíz⁽³⁾, A. Moreno Caballud⁽²⁾ y C. Sancho Marcén⁽³⁾

(1) Cueva de las Güixas, Turismo Villanúa. Camino de la fuente 1, Villanúa, Huesca. reiesgimenez@gmail.com

(2) Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC). Avda. Montañana, 1005 Zaragoza.

mbartucar@gmail.com; amoreno@ipe.csic.es

(3) Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna 12, Zaragoza.

lope@unizar.es; csancho@unizar.es

RESUMEN

La cueva de las Güixas se localiza en el extremo occidental del sector sur-pirenaico central, en el entorno de la localidad de Villanúa (provincia de Huesca). Habilitada para visitas a principios del siglo XX y cerrada por diversas causas desde 1936, la cueva retomó la actividad turística en 1996. Se trata de uno de los puntos de descarga hidrológica del macizo de Collarada. En julio de 2017 se inicia la monitorización ambiental de la cueva que incluye el control de las variaciones de temperatura, humedad y CO₂ del aire, tasas de goteo y nivel del agua en la zona freática de la cavidad. Los datos recogidos hasta el momento han permitido diferenciar dos zonas desde el punto de vista higrótérmico. La zona formada por el nivel intermedio, de recorrido turístico, y la parte más externa del nivel superior, presenta una mayor ventilación y por lo tanto mayores variaciones de temperatura (hasta 10,3 °C de variación) y de humedad relativa (100-55%). La zona más interna de las galerías superiores, no abiertas al público, muestran una temperatura y una humedad relativa constantes (9,7 °C y 100%). La fuerte ventilación existente en la zona inferior provoca niveles bajos de CO₂ (373 ppm) y se observa una leve influencia del número de visitas sobre la concentración del CO₂. El control de los goteos indica una respuesta hidrológica lenta con bajas descargas y variabilidad. Los sensores de presión para detectar las variaciones del nivel de agua, instalados en un sifón, muestran una rápida respuesta del sistema kárstico ante las precipitaciones. La monitorización ambiental de la Cueva de las Güixas ayudará a un mayor conocimiento de su dinámica actual, facilitando una mejor gestión de las visitas turísticas, tanto desde el punto de vista de la conservación como de la divulgación científica. Por otro lado, este estudio constituye la base para futuros trabajos de reconstrucción paleoambiental basados en espeleotemas.

Palabras clave: dinámica kárstica, divulgación, macizo Collarada, variaciones ambientales.

First results of environmental monitoring in Güixas cave (Villanúa, Central Pyrenees)

ABSTRACT

Güixas Cave is located in the south-western central Pyrenees, next to Villanúa village (Huesca province). The cave was enabled as touristic cave at the beginning of 20th century, closing due to several reasons in 1936 and returns its activities in 1996. The cave represents one of the main active springs in the area, which waters drain the Collarada massif. Since July of 2017 an environmental monitoring study is being carrying out, including the study of air temperature and relative humidity, air CO₂ concentration, drip water response and water level in the phreatic sectors in the cave. Monitoring data point out to two different sectors. The composite sector forms by both middle galleries, open to touristic activities, and external zone of the upper galleries, shows a strong ventilation and high temperature variation (until 10.3 °C) and relative

humidity (100-55%). On the contrary, the internal zones of the upper galleries, closed to the public, show constant temperature and relative humidity (9.7°C and 100%) during the monitored period. The strong ventilation in the lower galleries leads to low CO₂ concentrations (373 ppm) that slightly increase with the touristic visits. Drip water control shows slow hydrological response with low discharges and variability. Pressure sensor in the siphon, show a fast response to precipitations. Güixas Cave monitoring will help to increase the knowledge of cave dynamic helping to better manage the cave including aspects related to its conservation and the increase of outreach activities. This work is also the first step for future paleoenvironmental reconstructions based in speleothems.

Keywords: Collarada massifs, environmental variations, karst dynamics, outreach activities.

Introducción

La cueva de las Güixas se localiza en la zona centroccidental del Pirineo aragonés, en el entorno de la localidad de Villanúa (Huesca), de fácil acceso desde el Camino de Santiago. Situada en esta clásica zona de paso, su ocupación ha sido continúa al menos desde la edad de bronce, como revelan los restos arqueológicos recuperados en su interior. La cueva fue habilitada para el turismo durante un breve periodo, desde 1929 a 1936, cuando fue cerrada al público para su uso como refugio o prisión militar. La actividad turística se retomó en 1996 y ha sido continuada hasta la actualidad.

El modelo de explotación turística actual pretende apostar por una gestión más ambiciosa, centrándose también en la divulgación científica y en la conservación de este espacio natural. Las características geológicas y ambientales de la cueva, junto con su particular dinámica interna ofrecen la posibilidad de realizar un gran número de estudios para aumentar el conocimiento de la misma y mejorar su oferta turística (Giménez y Ezquerro, 2016). Por todo ello, a principios de 2017 se inicia un proyecto en colaboración con el Instituto pirenaico de Ecología (IPE-CSIC) para convertir la cueva de las Güixas en un laboratorio natural para la investigación científica. El objetivo planteado persigue caracterizar los parámetros ambientales y la dinámica actual de la cavidad a partir de los datos recogidos mediante una monitorización de la misma. Los resultados obtenidos han de servir al mismo tiempo para establecer el origen y la evolución de la cueva, así como aportar datos para estudios regionales climáticos del Pirineo.

Marco geológico y descripción de la cavidad

La cueva de las Güixas se sitúa en la base del macizo de Collarada que forma parte del dominio geológico de las Sierras Interiores. Esta alineación montañosa de dirección pirenaica (WNW-ESE) tiene su origen en la Orogenia Alpina. Los materiales que lo componen son fundamentalmente de composición carbonatada con edades del Cretácico Superior y del Paleoceno – Eoceno (figura 1 A). En todo el macizo de Collarada la disolución generada por el agua de infiltración durante el Cuaternario ha generado un amplio sistema endokárstico de galerías kilométricas. Las direcciones preferentes de flujo y disolución del agua en el interior de la montaña están determinadas por la dirección de la estratificación ENE-WSW y la vergencia sur de las estructuras tectónicas, así como por la orientación de otras fallas y fracturas secundarias de dirección NNE-SSW. La fuerte incisión del entacamiento fluvial durante el Cuaternario del río Aragón y su red afluente en el entorno de Villanúa ha dejado al descubierto las surgencias del sistema endokárstico en el fondo de los valles.

La cueva de las Güixas se desarrolla en el contacto entre las calizas con nódulos de sílex y las brechas calcáreas pertenecientes a la base de la Megacapa de Villanúa (Cuisiense superior, Eoceno), que en los alrededores de Villanúa se apoya discordante sobre las calizas paleocenas (figura 1 A y B). La circulación preferente del agua por el contacto entre estas dos unidades ha favorecido una disolución más intensa de las calizas, en las que se desarrolla la mayor parte de la cavidad. Sobre el sustrato geológico se desarrollan suelos de tipo calcisol que soportan una cobertera vegetal arbustiva y de matorral, con ejemplares de pino, roble y carrasca y desarrollo de campos abandonados. El clima es de transición Mediterráneo - Oceánico, caracterizado por precipitaciones en torno a los 1100 mm/año y temperaturas medias anuales de 10°C. Internamente la cueva se encuentra conectada con el nivel de base de las aguas de infiltración de todo el sistema kárstico de Collarada, constituyendo una de los principales puntos de descarga del macizo.

La cueva presenta un recorrido de 1100 m con un desnivel de 67 m (entre los 943 m s.n.m. y los 1010 m s.n.m.) y una morfología alargada con dirección ENE-WSW como consecuencia del control ejercido por la estratificación y la fracturación (figura 1B y C). Se encuentra formada por tres niveles de galerías (figura 2), uno inferior por donde circula un río subterráneo permanente

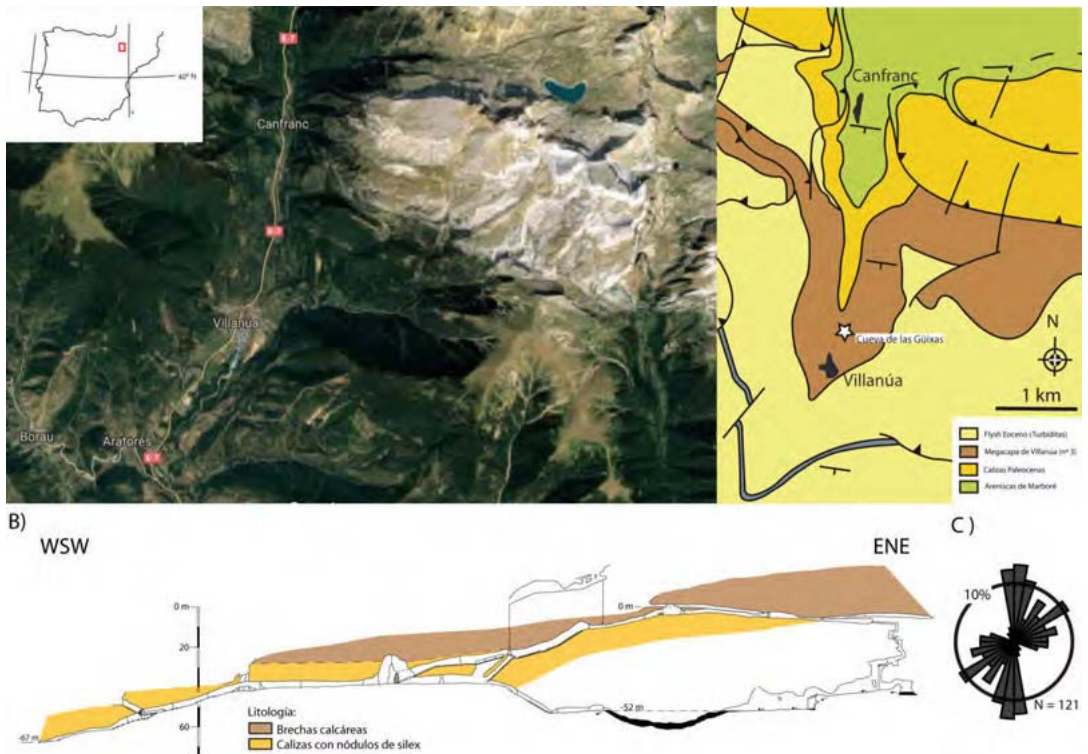


Figura 1. A) Situación geográfica y contexto geológico de la cueva de las Güixas. Modificado de Rios et al. (1987) y Teixell et al. (1994). B) Perfil topográfico y cartografía de los materiales que aparecen en la cueva. Modificado de Bengoetxea et al. (1994). C) Rosa de orientación de la red de fracturas del entorno.

con salida al exterior constituyendo la surgencia activa, uno intermedio que corresponde a la zona habilitada para el turismo y tiene dos aberturas al exterior y un nivel superior formado por dos galerías fósiles con salida al exterior. Por su nivel inferior circula un curso de agua permanente y en episodios de lluvias intensas o tras el deshielo el agua rebosa por el nivel medio de la cueva, inundando la zona habilitada para el turismo, y desembocando por el sumidero occidental localizado en la zona más deprimida del nivel intermedio.

Su situación próxima a la superficie (espesor del epikarst entre 5 y 27 m) y sus cuatro aberturas al exterior, como la dolina de colapso que se abre en el techo en el nivel intermedio, facilitan la circulación bidireccional de aire en las partes altas de la cueva. En las zonas situadas a mayor altura y protegidas de la erosión hídrica predominan los procesos de precipitación de carbonato desde el agua de infiltración que llega a la cueva formándose distintos tipos de espeleotemas. En las zonas bajas de la cueva aparecen formaciones erosivas y estructuras de colapso.

Metodología de trabajo

El método de trabajo planteado para la monitorización de la cueva se ha basado en un continuo e intenso trabajo de campo y laboratorio para la obtención de datos previo al análisis de resultados. La distribución de sensores y puntos de muestreo en la cavidad obedece a las diferentes situaciones ambientales e hidrodinámicas relacionadas con las características morfológicas de la cueva a lo largo de la zona monitorizada (figura 3).

El trabajo de campo ha consistido en la instalación de los equipos que conforman la red de monitorización, así como en el seguimiento instrumental de las variables ambientales, tanto en el exterior como en el interior de la cueva. En el exterior se lleva un control y seguimiento de las variaciones de temperatura, lluvia, viento y humedad de las estaciones meteorológicas cercanas a la cueva, situadas en las localidades de Canfranc y Villanúa. Además, este registro se completa con los datos de un pluviómetro que se ha instalado sobre la cavidad y que permite contabilizar la cantidad de lluvia caída en cada evento de precipitación, realizar un registro *in situ* de la temperatura del agua o nieve y la toma de muestras para su posterior análisis isotópico. Asimismo, cada 180 días se recogen los datos de otro pluviómetro que se ha instalado en la zona alta de Collarada a 2500 m s.n.m. El control de la surgencia permanente de la cueva se está realizando mensualmente con mediciones de temperatura, pH mediante un peachímetro *PCE-Ph22* de PCE

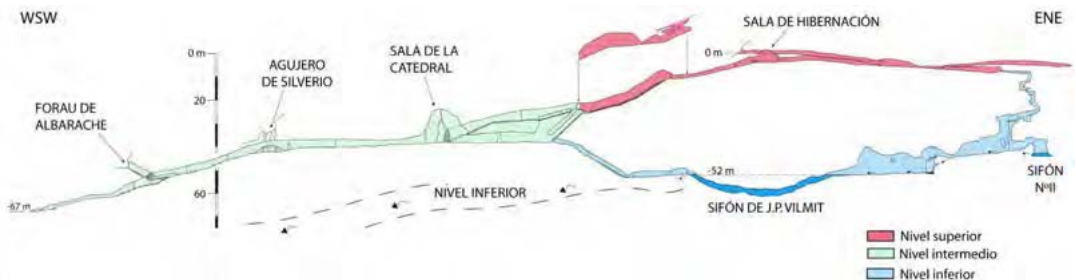


Figura 2. Niveles que conforman la cueva de las Güixas. Perfil topográfico modificado de Bengoetxea et al. (1994).

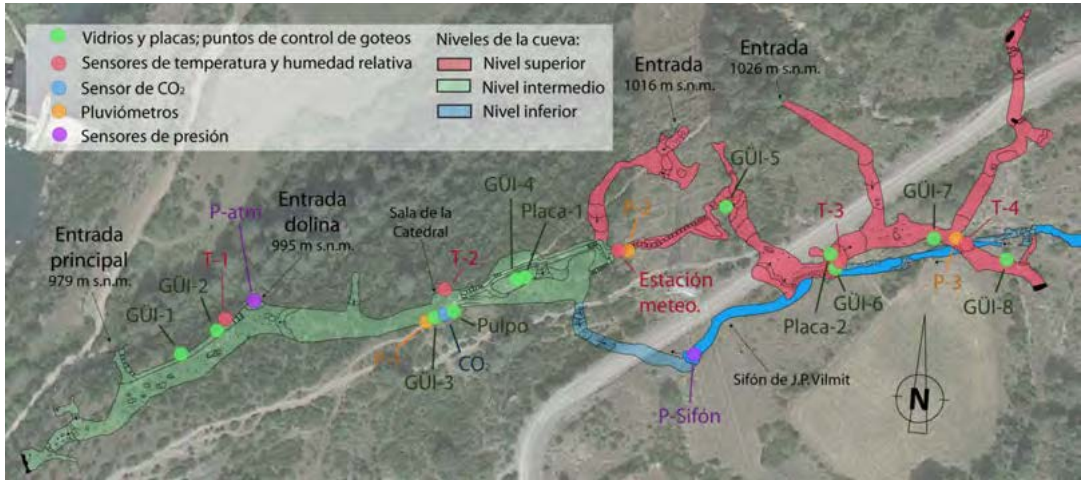


Figura 3. Topografía de las galerías monitorizadas de la cueva de las Güixas sobre foto aérea. Distribución de vidrios, placas y sensores instalados.

Ibérica y determinaciones de alcalinidad con un *HI-3811 alkalinity test* de Hanna Instruments. La alcalinidad se analiza en la zona habilitada como laboratorio de campo del CIN Subterránea (Centro de Interpretación de la cueva) tras el muestreo, a partir de 5 ml de agua, mediante el método de indicador colorimétrico (fenoltaleína y bromofenol).

En el interior de la cueva se han instalado distribuidos a lo largo de la cavidad (figura 3): i) 4 sensores de temperatura y humedad relativa (*U23-001 Data Logger de la empresa HOBO*) con adquisición de datos cada hora (T-1 a T-4 en figura 3); ii) un sensor de CO₂ (*U30-NRC sensor CO₂ HD37 de HOBO*) situado en la sala de la catedral del nivel intermedio; iii) una estación meteorológica *PCE-FWS 20* que registra la velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad en la zona de conexión de los dos niveles de la cueva (figura 4C); iv) tres pluviómetros (modelo *RAIN-O-MATIC de HOBO*), uno en el nivel medio, uno en el superior y otro en la zona de conexión de ambos, para controlar la tasa de goteo (P-1 a P-3 en figura 3); v) y dos sensores barométricos *U20L-02 registrador de HOBO*, que también incluyen registro de temperatura, para monitorizar las variaciones de caudal en relación con los eventos de precipitación/deshielo/estiaje. Un sensor se ha instalado en la dolina del nivel intermedio para control de la presión atmosférica (P-atm en figura 3) y otro en el curso de agua subterráneo del nivel inferior (P-Sifón). Este registro se completa con los avisos de las tres boyas de alarma de inundación de la cueva situadas en la rampa de acceso al sifón. La descarga de los datos de estos sensores automatizados se realiza cada 30 días.

Además, en el interior de la cueva, se realiza de forma manual un control de las tasas de goteo y temperatura del agua y se realiza un muestreo periódico de las aguas de infiltración. El seguimiento se ha establecido en un punto de control (denominado *Pulpo* por la geometría del recipiente) con una botella fija en el que el muestreo y mediciones se realizan semanalmente y en 8 puntos de control de goteo distribuidos a lo largo de la cavidad, con un muestreo mensual para su análisis isotópico y de elementos trazas para ver la influencia del epikarst. Todas las mues-

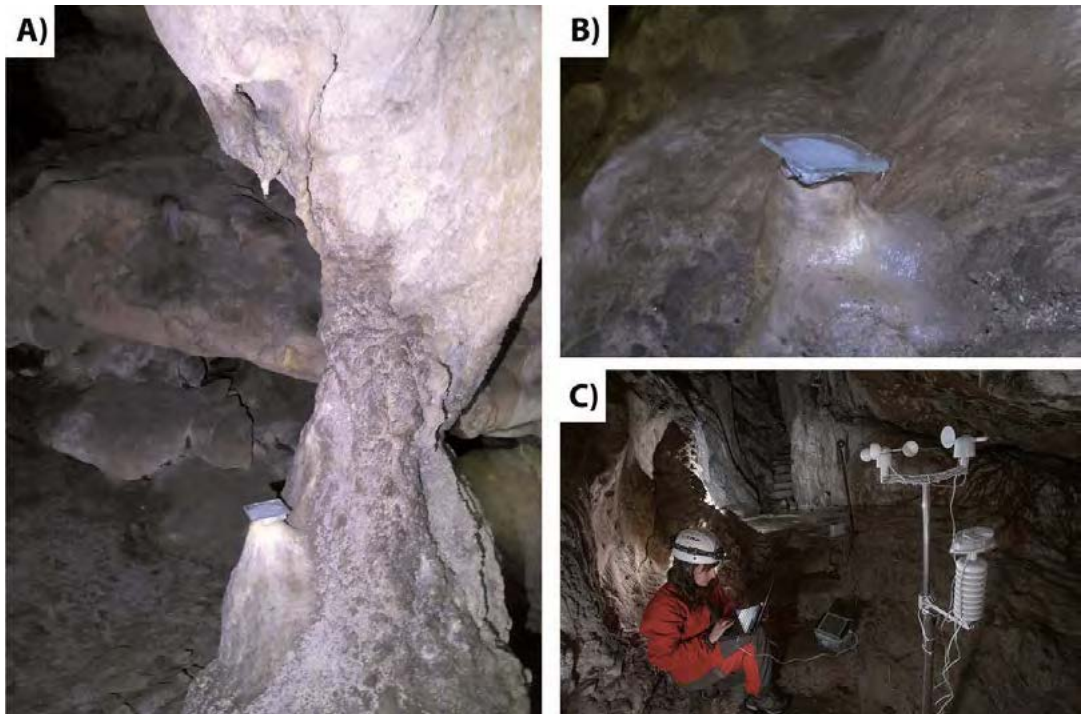


Figura 4. A) Vidrio colocado sobre estalagmita funcional y bajo una estalactita con goteo para recolectar el carbonato que precipita actualmente. B) Detalle de vidrio fijado al sustrato mediante una sustancia plástica e inocua. C) Recogida de datos de la estación meteorológica instalada en el interior de la cavidad.

tras de agua recogidas se filtran inmediatamente en el laboratorio de campo del CIN Subterránea y posteriormente son almacenadas en frío. Su análisis químico e isotópico se realiza en el laboratorio del Instituto Pirenaico de Ecología (IPE - CSIC). En estos puntos se han colocado vidrios de 5x5 cm a modo de sustratos artificiales para recoger el carbonato precipitado del agua de goteo (figuras 4A y 4B). Estacionalmente se mide y recoge el carbonato que precipita de esta agua sobre los vidrios para su análisis isotópico. Adicionalmente se han colocado dos placas de 20 x 20 cm (Placa-1 y Placa-2 en figura 3) para la recogida continua de carbonato a largo plazo.

Resultados e interpretación

Variación de la temperatura y de la humedad relativa

La temperatura y la humedad, junto con el CO₂, de las cuevas son los parámetros ambientales más estudiados en trabajos de monitorización. Las variaciones de temperatura en el interior de las cavidades suelen ser semejantes a la variación superficial media de este parámetro en las zonas colindantes. Estas variaciones suelen estar matizadas por tendencias hacia temperaturas más bajas en cuevas de mayor latitud o altitud y al contrario. En este sentido, cada vez existen más ejemplos de cuevas con una temperatura muy distinta a la media exterior (Atkinson, 1983;

Buecher, 1999) y los cambios estacionales en la temperatura se retardan y se amortiguan conforme nos adentramos en la cueva (Smerdon *et al.*, 2004). La temperatura media de la cueva de las Gúixas durante el periodo de estudio, de junio de 2017 a febrero de 2018, es del orden de 1,7 °C menor que la temperatura media exterior. Los sensores de temperatura y humedad colocados a lo largo de la cavidad (figura 3) permiten establecer dos zonaciones principales: i) las galerías intermedias, de recorrido turístico, junto con la parte más externa de las galerías superiores no abiertas al público, donde la existencia de oberturas al exterior genera una fuerte corriente de aire; ii) la parte más interna de las galerías superiores, no incluidas en el recorrido turístico, en las que la circulación de aire es menor. Los valores medios, máximos y mínimos quedan reflejados en la tabla 1.

Durante el periodo monitorizado, los sensores T-1, T-2 (galerías intermedias) y T-3 localizado en las galerías superiores (figura 3), muestran unas temperaturas medias de 9,2 °C, 9,3 °C y 10,9 °C respectivamente. La variación de temperatura total, entre la máxima y la mínima, registrada en la zona superior está en torno a 10,3 °C (figura 5A, tabla 1) correspondiente al sensor T-3. La presencia de espeleotemas de hielo durante el invierno en la zona de la dolina y a varios metros de la entrada principal (figura 3), indican que las temperaturas en momentos puntales del invierno son inferiores a los 0 °C (-2,3 °C, registrados en el sensor P-atm en figura 5A). Por el contrario, la parte superior y más interna de la cavidad donde se encuentra el sensor T-4 (figura 3) muestra una temperatura media casi constante muy próxima a 9,71 °C con una variación mínima de 0,3 °C, la cual se encuentra muy amortiguada respecto a la zona inferior (tabla 1). Así, en la zona intermedia de la cavidad y parte de la zona superior (sensores T-1, T-2 y T-3) son los procesos de advección térmica ligados a la ventilación producida por las diferentes entradas de la cavidad, además de su cercanía al exterior, los que controlan principalmente la temperatura. La baja variabilidad observada en la zona superior más interna indica que los procesos de advección térmica son limitados, y esta zona parece menos afectada por la ventilación por lo que la temperatura puede estar controlada principalmente por la conducción del calor por la roca, que a su vez depende del espesor del techo de la cueva.

La humedad relativa muestra igualmente diferencias significativas entre ambas zonas, presentando en la zona inferior importantes variaciones, más puntuales en verano e intensificadas en otoño-invierno alcanzando valores del 55% de humedad (sensor T-1) que corresponden con la entrada de aire frío y seco en la cavidad (figura 5B), aunque también hay zonas próximas 100% de humedad (sensor T-2). Contrariamente, en la zona superior y más alejada de las entradas la humedad permanece constante, próxima al 100% (sensor T-4).

Nº sensor	Temperatura (°C)			Humedad Relativa (%)		
	Media	Máx	Min	Media	Máx	Min
T-1	9,2	13,6	5,7	94,8	100	5,5
T-2	9,32	13,4	4,97	100	100	100
T-3	10,92	16,7	6,38	97,8	100	76,9
T-4	9,71	9,92	9,55	99,9	100	98,7

Tabla 1. Resumen de las temperaturas medias, máximas y mínimas registradas en los sensores durante el periodo monitorizado.

Un periodo de monitorización más largo de las temperaturas permitirá conocer el régimen térmico, relaciones concretas entre la temperatura exterior e interior o incluso plantear modelos de circulación en la cavidad. Las variaciones de temperatura y humedad relativa pueden provocar condiciones fuera de equilibrio (*p.e.* evaporación) durante el fraccionamiento agua-carbonato.

Variabilidad térmica en las aguas de goteo

La temperatura del agua de goteo medida en ocho puntos a lo largo de la cavidad (GÜI-1 a GÜI-8, figura 3), muestra un patrón similar al observado en la temperatura ambiente del interior de la cueva. Así, los goteos localizados en el nivel intermedio (GÜI-1 a GÜI-4) y dos situados en los niveles superiores (GÜI-5 y GÜI-6) siguen el patrón de variación térmica observado en la temperatura del aire (figura 6), mientras que los localizados en las zonas más internas del nivel superior (GÜI-7 y GÜI-8) muestran una temperatura constante, similar a la de la atmosfera de la cueva. La temperatura de los goteos, controlada en parte por la temperatura de la cavidad, afecta al proceso de fraccionamiento isotópico durante la precipitación de carbonato (Kim y O'Neil, 1997; Tremaine *et al.*, 2011).

Variabilidad en la concentración de CO₂: influencia de la ventilación y de las visitas

En condiciones naturales la concentración de CO₂ en la atmósfera de la cueva proviene de diversas fuentes, como la respiración del suelo, el intercambio de masas de aire con el exterior, la disolución de la roca caliza o incluso de CO₂ de origen profundo (hipogénico) (Lambert y Aha-

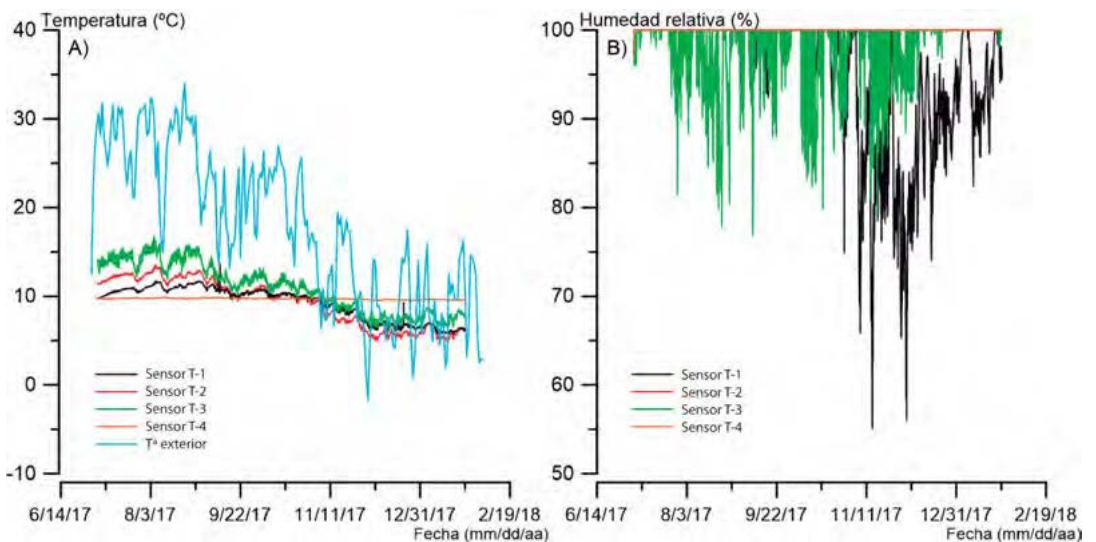


Figura 5. A) Variación de temperatura registrada por los diferentes sensores a lo largo de la cavidad. B) Variaciones en la humedad relativa.

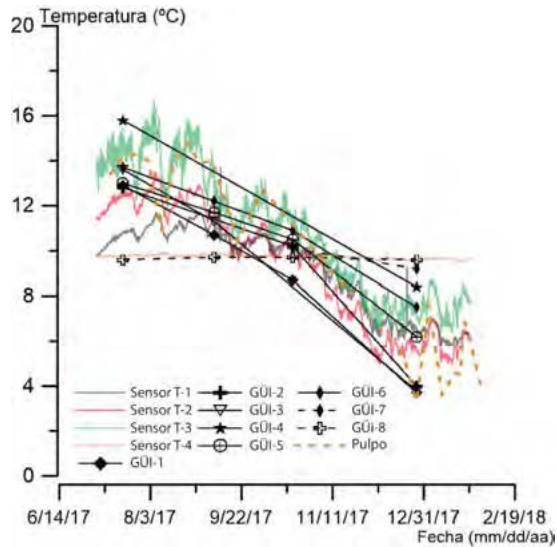


Figura 6. Variaciones de la temperatura de los diferentes puntos de goteo seleccionados en la cueva.

ron, 2011). La concentración de CO₂ ha sido ampliamente estudiada de cara a evaluar los efectos de las visitas en cuevas turísticas, observándose en algunos casos un incremento del CO₂ en función del número de visitantes (e.g. Lang *et al.*, 2015). Durante el periodo estudiado, la concentración de CO₂ en la cueva generalmente es baja variando entre las 373 ppm y las 557 ppm. Las medidas de CO₂ muestran una influencia directa entre las visitas en la cueva y el aumento de CO₂ en la atmósfera de la cavidad, de manera que la concentración aumenta en más de 100 ppm los días de visita durante el desarrollo de la misma. Sin embargo, debido probablemente a la intensa ventilación de la cueva en la zona inferior, los picos de CO₂ se recuperan en menos de

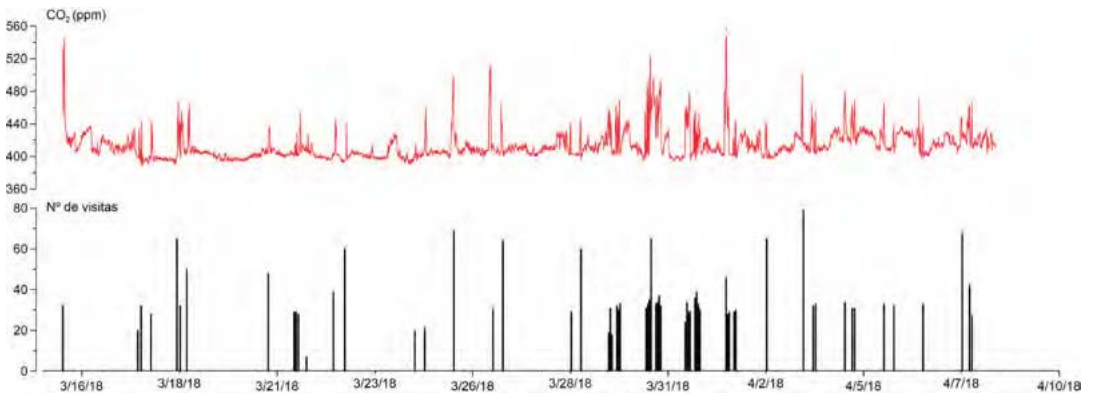


Figura 7. Relación entre la variación de la concentración de CO₂ en la zona inferior turística y el número de personas que visitaron la cavidad.

una hora después del paso de los visitantes indicando una rápida eliminación del CO₂ antrópico ocasionado por las visitas (figura 7). Por otra parte, no se ha podido reconocer una relación directa entre el número de visitantes (grupos de 40 personas máximo) y el valor máximo de concentración de CO₂, pudiendo darse picos más altos en entradas no muy numerosas frente a otras con escaso número de visitantes que alcanzan picos mayores. En días con numerosas visitas, en turnos de mañana y de tarde, los valores tardan en recuperarse (e.g. del 29 de marzo al 21 de abril, días de Semana Santa).

Variabilidad de goteos y niveles de agua: respuesta ante las precipitaciones

La respuesta de los goteos y ríos activos en el interior de las cavidades permite conocer los tiempos de respuesta ante las precipitaciones exteriores y entender los complejos procesos que tienen lugar en el epikarst. En este sentido las tasas de goteo durante el corto periodo monitorizado en los puntos seleccionados (GÜI-1 a GÜI-8 y Pulpo) son generalmente bajas y con poca descarga (0,05-0,65 ml/min), indicando una lenta respuesta hidrológica de los goteos (figura 8 A). Al inicio del verano, los goteos muestran tasas en torno a una gota por minuto que disminuye hacia el final de la estación estival llegando a secarse completamente (e.g. Pulpo) o con tasas de goteo muy bajas (1 gota cada 15 min), aunque los datos puntuales medidos en los goteos son variables y es necesario más tiempo de monitorización para observar su relación con las precipitaciones. Esta disminución se relaciona probablemente con una menor saturación en agua del epikarst, junto con una alta evapotranspiración que impide la recarga del mismo durante los eventos de lluvias. Durante el otoño, conforme disminuye la temperatura exterior y las precipitaciones se hacen más efectivas, el epikarst se recarga y se produce un aumento de las tasas de goteo, tal

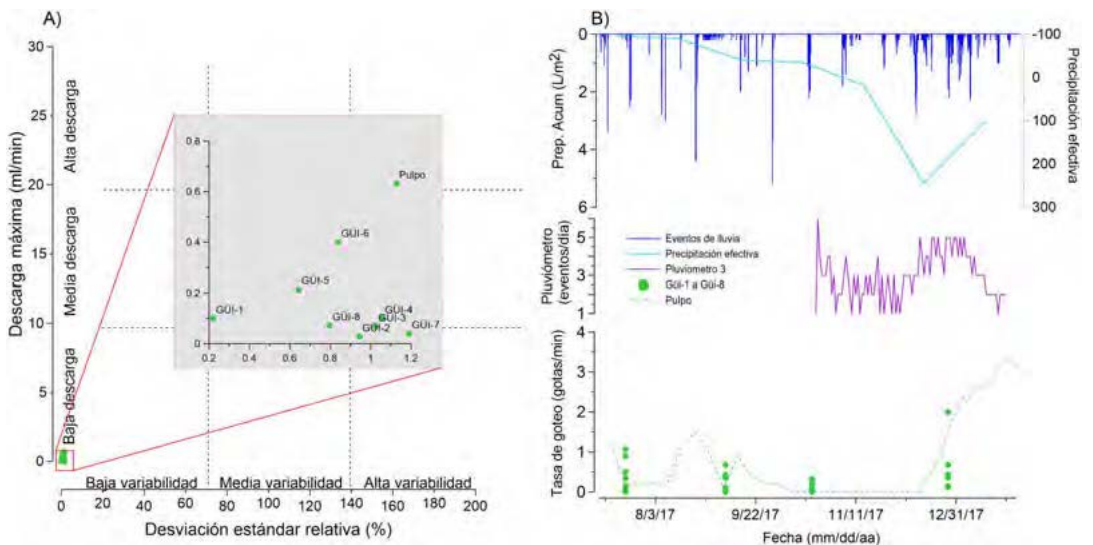


Figura 8. A) Clasificación de los goteos en función de la descarga y la variabilidad a lo largo del tiempo monitorizado. B) Respuesta de los goteos ante las precipitaciones.

como se observa en el pluviómetro P-3 y en el Pulpo aunque es cierto que existen diferentes tiempos de respuesta (figura 8 B).

El sensor de nivel instalado en el sifón (nivel inferior permanentemente inundado) y las diferentes boyas-alarma del sistema de seguridad de la cueva ante las inundaciones, han permitido observar una correlación de los niveles de agua con eventos de lluvia de 1 a 3 l/m² (quinceminutal). Estos aumentos del nivel de agua muestran de la misma forma una correlación directa con los aumentos de caudal del río Aragón en la estación de aforo de Canfranc (figura 9). Así, se puede aproximar que la respuesta del agua escorrentía y del agua infiltrada que circula por el sistema kárstico es muy similar, aunque siempre existirán diferentes respuestas en función del agua previa retenida en el endokarst. Del mismo modo, las surgencias de las distintas cavidades a lo largo del río Aragón contribuyen de una forma importante al aumento caudal del río, ya que este último aumenta en momentos de deshielo al igual que ocurre con el nivel del agua en el interior de las cuevas. Las inundaciones en la Cueva de las Güixas son frecuentes, principalmente durante la primavera, debido al deshielo o durante eventos extremos en verano u otoño, tal como ocurrió en el otoño de 2012 donde las instalaciones de la cueva fueron dañadas por una gran avenida de agua, lo que supuso pérdidas materiales.

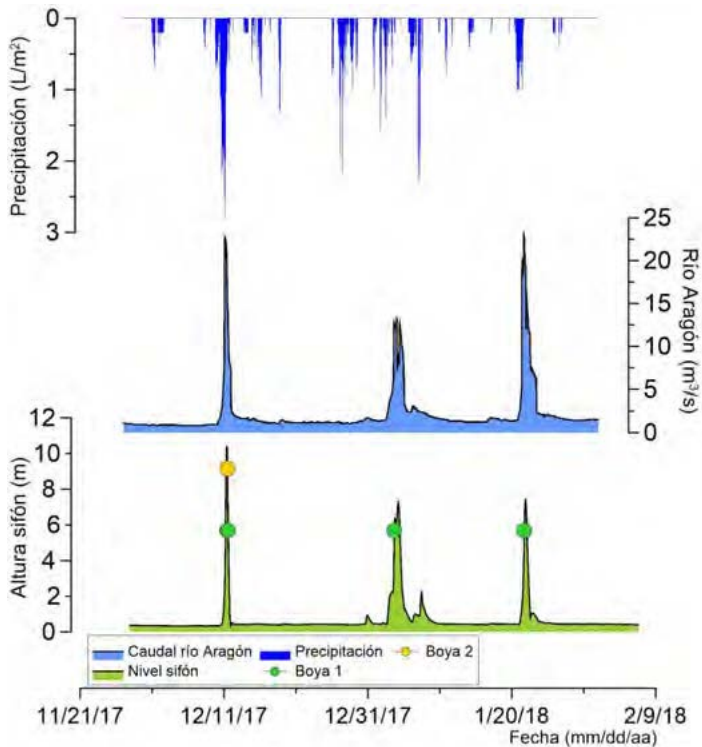


Figura 9. Respuesta del nivel del sifón ante las precipitaciones (medidas quinceminutales) y su relación con el caudal del río Aragón.

El estudio de la morfología de la cavidad, de los depósitos presentes, de las cuevas o sistemas kársticos adyacentes y de la respuesta de los niveles de agua ante las precipitaciones es fundamental para la realización de futuras reconstrucciones de paleoavenidas basados en espeleotemas (e.g. Denniston *et al.*, 2015; Denniston y Luetscher, 2017; Gázquez *et al.*, 2014; González-Lemos *et al.*, 2015b, 2015a).

La divulgación científica desde la cueva de las Güixas

La transferencia del conocimiento científico es una tarea pendiente de los investigadores en la actualidad, al igual que la de los centros turísticos vinculados con los recursos naturales de ampliar y mejorar la difusión de estos conocimientos. Por ello, la colaboración entre centros con medios para desarrollar proyectos de investigación como el IPE-CSIC y centros como el CIN-Subterránea, con capacidad de transmitir de manera sencilla los resultados al público, es cada vez más necesaria. Es indudable que en esta sociedad actual “de la información” existe una creciente demanda e interés por el conocimiento, que tiene que ser satisfecho por una oferta turística y de calidad. Así, muchas cuevas turísticas como la cueva de las Güixas están optando por la instrumentación de las mismas de cara a poder ampliar y enriquecer las visitas, dejando de lado pobres descripciones relacionadas con la morfología de los espeleotemas o formas erosivas presentes en las cavidades (pareidolia), y pasando a explicar de manera sencilla su origen, geomorfología e interés científico, entre otros aspectos.

Paralelamente a esta labor de investigación se ha comenzado a desarrollar una labor de divulgación tratando de acercar al público en general diversas cuestiones científicas, especialmente las relacionadas con el patrimonio subterráneo. Estas actividades están centradas en dar a conocer los estudios que se realizan en la cueva pero también otros trabajos y proyectos que confluyen en el mundo subterráneo. La finalidad es facilitar el acceso y comprensión de la información generada, basada tanto en los resultados obtenidos en la cueva como en cuestiones más genéricas del ámbito científico. Con este objetivo, desde la cueva de las Güixas se están desarrollando acciones divulgativas enfocadas a todo tipo de público: jornadas de divulgación científica, semanas temáticas como “la prehistoria”, talleres, charlas y salidas de campo guiadas.

Además, otra actuación importante para la difusión ha sido la puesta en funcionamiento de un blog-científico donde se expone y desarrolla de modo sencillo e informativo los aspectos geológicos, biológicos y arqueológicos relacionados con la cavidad, así como las cuestiones relacionadas con los proyectos de investigación que se llevan a cabo. También, se pretende que este blog sirva como portal de referencia para otras actividades de carácter divulgativo que se organizan en el entorno y que confluyen de alguna manera con la labor realizada en la cueva.

Finalmente, la transferencia del conocimiento científico también se realiza a través de la formación continua de guías, para que tengan la capacidad de transmitir estos conocimientos durante las visitas turísticas, enriqueciendo más las explicaciones y la oferta de conocimientos. Esta labor es muy directa dado que parte del personal investigador de la empresa realiza a su vez la función de formación de otros guías.

Conclusiones

Los datos preliminares obtenidos en la cueva de las Güixas han permitido caracterizar la dinámica actual de la cavidad durante el tiempo monitorizado. A partir del control de la temperatura se han podido diferenciar dos zonas térmicas: i) el nivel intermedio de recorrido turístico junto con la parte más externa del nivel superior, con una fuerte ventilación que parece controlar las variaciones de temperatura y de humedad relativa; y la zona más interna del nivel superior, no turística, donde la temperatura permanece constante y parece estar controlada principalmente por procesos de conducción térmica y donde la humedad relativa tiene un valor constante. Las variaciones térmicas de los goteos siguen el mismo patrón que la temperatura del aire, en este sentido la temperatura de los goteos se re-equilibra con la temperatura de la atmósfera de la cueva. La respuesta de dichos goteos en general es lenta, con baja descarga y diferentes tiempos de respuesta en función de su situación en la cueva y del estado de recarga del epikarst. El control de nivel de las aguas muestra una buena relación con los caudales observados en el río Aragón, siendo la respuesta prácticamente sincrónica. La concentración de CO₂ muestra un valor de fondo inferior a 400 ppm de CO₂, con picos de hasta 557 ppm durante las visitas que se recuperan en intervalos temporales inferiores a una hora, lo que apunta a una buena ventilación de la cavidad. Una monitorización más larga en el tiempo permitirá comprender la dinámica actual de la cavidad y verificar los resultados previos aquí presentados.

Este trabajo supone también una fase fundamental para futuros trabajos de reconstrucción paleoambiental basados en espeleotemas. La información obtenida también es clave para comprender el origen, evolución y el presente estado de la cueva. Todo ello, ha de servir para determinar cómo afecta la presencia de las visitas turísticas y poder mejorar el modelo de gestión. Además será de gran utilidad para garantizar la sostenibilidad de las visitas, la mejora de la oferta turística y la conservación de la cavidad.

Referencias

- Atkinson, T.C. 1983. Growth Mechanisms of Speleothems in Castleguard Cave, Columbia Icefields, Alberta, Canada, *Arct, Alp, Res*, 15, 523.
- Bengoetxea, A., García, D., García, J.M. e Yzaguirre, I. 1994. Exploraciones del G,E,R,S en el Macizo de la Collarada (Huesca), *Subterránea* 2, 66, 8–14.
- Buecher, R.H. 1999. Microclimate study of Kartchner Caverns, Arizona, *J. Cave Karst Stud*, 61, 108–120.
- Denniston, R. F. y Luetscher, M. 2017. Speleothems as high-resolution paleoflood archives, *Quat, Sci, Rev*, 170, 1–13.
- Denniston, R.F. Villarini, G., Gonzales, A.N., Wyrwoll, K.-H., Polyak, V.J., Ummenhofer, C.C. Lachniet, M.S. Wanamaker, A.D. Humphreys, W.F. Woods, D. y Cugley, J. 2015. Extreme rainfall activity in the Australian tropics reflects changes in the El Niño/Southern Oscillation over the last two millennia, *Proc, Natl, Acad, Sci*, 112, 4576–4581.
- Gázquez, F. Calaforra, J.M. Forti, P., Stoll, H., Ghaleb, B. y Delgado-Huertas, A. 2014. Paleoflood events recorded by speleothems in caves, *Earth Surf, Process, Landf*, n/a–n/a, <https://doi.org/10.1002/esp.3543>.
- Giménez, R, y Ezquerro, L, 2016. Aspectos geológicos y morfológicos de la Cueva de las Güixas (Villanúa, Huesca), *VI Congreso español sobre cuevas turísticas*, 205-216.
- González-Lemos, S. Jiménez-Sánchez, M. y Stoll, H.M. 2015a. Sediment transport during recent cave flooding events and characterization of speleothem archives of past flooding, *Geomorphology* 228, 87–100.
- González-Lemos, S., Müller, W., Pisonero, J., Cheng, H., Edwards, R.L. y Stoll, H.M. 2015b. Holocene flood

- frequency reconstruction from speleothems in northern Spain, *Quat, Sci, Rev., Novel approaches to and new insights from speleothem-based climate reconstructions* 127, 129–140.
- Kim, S.-T. y O'Neil, J.R. 1997. Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates, *Geochim, Cosmochim, Acta* 61, 3461–3475.
- Lambert, W.J. y Aharon, P. 2011, Controls on dissolved inorganic carbon and $\delta^{13}\text{C}$ in cave waters from DeSoto Caverns: Implications for speleothem ^{13}C assessments, *Geochim, Cosmochim, Acta* 75, 753–768.
- Lang, M., Faimon, J. y Ek, C. 2015. The relationship between carbon dioxide concentration and visitor numbers in the homothermic zone of the Balcarka Cave (Moravian Karst) during a period of limited ventilation, *Int, J, Speleol*, 44, 167–176.
- Ríos, J., Galera, J., Baretino, D. y Lanaja, J. 1987. *Mapa Geológico de España a escala 1:50,000 hoja nº 145 (Sallent) y memoria IGME.*
- Smerdon, J.E. Pollack, H.N., Cermak, V., Enz, J.W. Kresl, M., Safanda, J. y Wehmiller, J.F. 2004. Air-ground temperature coupling and subsurface propagation of annual temperature signals, *J, Geophys, Res, Atmospheres* 109.
- Teixell, A., García-Sansegundo, J., Zamorano, M. y Barnolas, A. 1994, *Mapa Geológico de España a escala 1:50,000, hoja nº 144 (Ansó) y memoria IGME.*
- Tremaine, D.M. Froelich, P.N. y Wang, Y. 2011. Speleothem calcite farmed in situ: Modern calibration of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ paleoclimate proxies in a continuously-monitored natural cave system, *Geochim, Cosmochim, Acta* 75, 4929-4950.

R. Jordá Bordehore, et al., 2018. Estudio de estabilidad del Monumento Natural "Mina de la Jayona", Fuente del Arco, Badajoz. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 279-290.

Estudio de estabilidad del Monumento Natural "Mina de la Jayona", Fuente del Arco, Badajoz

R. Jordá Bordehore⁽¹⁾, G. Umpiérrez Navarro⁽²⁾, M. Arlandi Rodríguez⁽³⁾, P. Muñoz Barco⁽⁴⁾,
E. Rebollada Casado⁽⁴⁾ y C. Crisóstomo Miranda⁽⁴⁾

(1) Geólogos del Mundo-World Geologist, Madrid (España). rafaél_jordá@hotmail.com

(2) Dpto. Paleontología. Universidad Complutense de Madrid, Madrid (España)

(3) Túneles y Geomecánica, Madrid (España)

(4) Dirección General de Medio Ambiente, Extremadura (España)

RESUMEN

El Monumento Natural Mina La Jayona constituye un ejemplo de explotación minera abandonada, cuya recuperación ambiental ha generado un hábitat singular de gran interés geo-ecológico que le ha valido el reconocimiento y la declaración como Monumento Natural desde el 30 de septiembre de 1997. La mina de la Jayona ha recibido más 220.000 visitas desde su declaración hasta el día de hoy, habiéndose habilitado al turismo cuatro niveles de los once que contaba la antigua explotación. El 10 de enero de 2010 tuvo lugar un colapso en un sector de la mina, que afectó a algunas zonas del Nivel 2 y principalmente al Nivel 3, cerrándose la visita a las zonas más espectaculares del recorrido turístico. Durante el año 2016 y 2017 se realizó un estudio geológico-geotécnico con el objetivo de analizar la problemática que generó el colapso y realizar unas propuestas de actuación para garantizar la estabilidad de la mina y poder reabrir al público general los niveles afectados. En el presente trabajo se resume los estudios, propuestas y conclusiones de dicho trabajo.

Palabras clave: estabilidad, Extremadura, geotecnia, mina La Jayona, turismo minero.

Study of the stability of the Natural Monument "Jayona Mine", Fuente del Arco, Badajoz

ABSTRACT

The La Jayona Mine Natural Monument is an example of abandoned mining, whose environmental recovery has generated a unique habitat of great geo-ecological interest that has earned it recognition and declaration as a Natural Monument since September 30, 1997. The Jayona mine has received more than 220,000 visits since its declaration to date, with four levels of the eleven existing in the mine being visited for tourism. On January 10, 2010, there was a collapse in a sector of the mine, which affected some areas of Level 2 and mainly Level 3, closing the visit to the most spectacular areas of the tourist route. During 2016 and 2017, a geological-geotechnical report was carried out with the objective of analyzing the problem that generated the collapse and making proposals for action to guarantee the stability of the mine and to reopen the affected levels to the general public. In the present work the studies, proposals and conclusions of that report are summarized.

Keywords: Extremadura, geotechnics, La Jayona mine, mining tourism, stability.

Introducción

La mina de la Jayona fue explotada para la extracción de hierro desde la época romana hasta

1921. Desde ese año, la mina sufrió un desmantelamiento y un expolio, que llevaron a la pérdida de gran parte del patrimonio minero. La dejadez por parte de las administraciones de la época, contribuyó a que la lluvia, el viento, la vegetación y la fauna actuaran sobre el medio. Fue precisamente esa acción natural, la que llevó a que se convirtiesen las antiguas explotaciones en un lugar vivo y singular, ejemplo perfecto de colonización de un espacio degradado.

Por su pasado histórico-minero y sobre todo por su elevado valor geológico y ambiental, la Mina de la Jayona fue declarada Monumento Natural el 30 de septiembre de 1997. A partir de ese momento la Dirección General de Medio Ambiente de la Junta de Extremadura inició los trabajos con el objetivo de realizar un uso y disfrute del espacio natural de manera compatible con la conservación del entorno y la seguridad de los visitantes. La puesta en valor del yacimiento, además de contribuir a la divulgación del patrimonio tanto natural como minero, serviría para la activación socioeconómica de la zona y la calidad de vida de sus poblaciones.

En enero de 2010, tras un período de intensas lluvias, se produjo un colapso en un sector de la mina, que afectó a algunas zonas del Nivel 2 y principalmente al Nivel 3, cerrándose las visitas en ambos niveles. Si bien durante años se ha seguido con la actividad turística y divulgativa en la mina, las autoridades consideraron necesario la realización de un estudio de detalle de todos los recorridos actuales, así como valorar diferentes alternativas. Una de las principales preocupaciones era estudiar el colapso producido en el año 2010, eliminar el riesgo existente y poder así acceder de nuevo a las zonas más espectaculares del recorrido turístico.

Con este fin, durante los años 2016 y 2017 se llevaron a cabo estudios geológico-geotécnicos en los cuales se propusieron las medidas de actuación para garantizar la estabilidad de la mina y poder reabrir al público general los niveles afectados.

Geología

Desde el punto de vista tectónico y estratigráfico, según la clásica división del Macizo Ibérico realizada por Lotze (1945) y posteriormente por Julivert *et al.* (1972), el área de estudio se sitúa en la Zona de Ossa-Morena (figura 1).

La Zona de Ossa-Morena se encuentra separada de la Zona Centro Ibérica y de la Zona Surportuguesa por dos accidentes tectónicos importantes producto de los últimos episodios de la Orogenia Hercínica. Se caracteriza por presentar afloramientos Precámbricos a lo largo de núcleos de antiformes con una dirección SE-NO. El metamorfismo regional existente en la zona coincide además con las áreas precámbricas, existiendo numerosos afloramientos pertenecientes a cuerpos intrusivos de edad Hercínica.

Según la división que Delgado Quesada *et al.* (1977) hace de Ossa Morena, la mina de La Jayona se encuentra en el Dominio de Zafra-Alanis-Córdoba. Dentro de este dominio se encuentran materiales de origen Precámbrico, Cámbrico, Carbonífero y Pérmico. Los sedimentos de este dominio aparecen compartimentados por grandes fallas longitudinales que aíslan distintas unidades tectosedimentarias.

Dentro de las grandes fallas que aparecen en la zona se encuentra la falla de Guadalcanal que

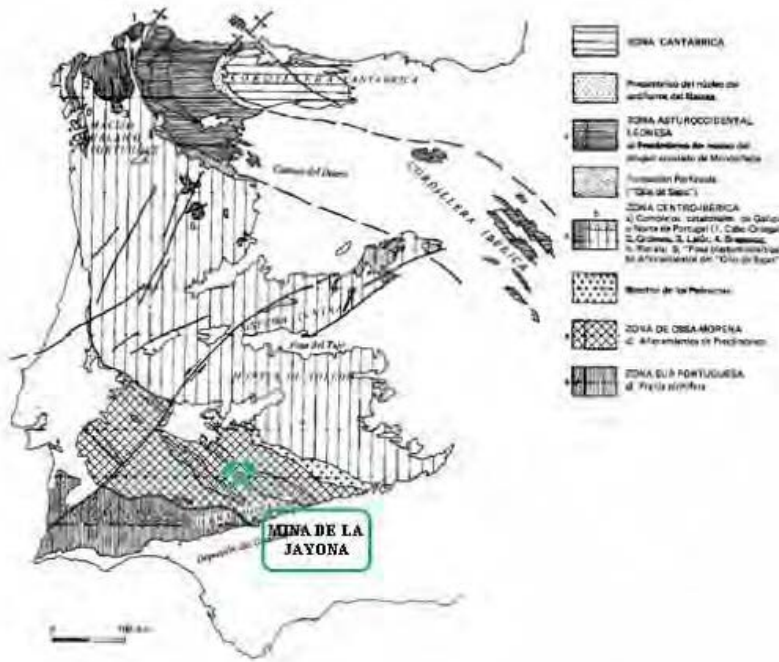


Figura 1. Situación de la mina de La Jayona en la Zona de Ossa-Morena.

divide a la zona de estudio en dos áreas pertenecientes, la primera, a la Unidad Loma del Aire y la segunda, en la cual se sitúa la mina de La Jayona, a la Unidad Benalija.

Esta unidad se encuentra limitada por dos fallas, una situada al sur, formada por fallas inversas de dirección N 140°-160° E, compartimentadas por fracturas tardihercínicas de descompresión y otra situada al norte denominada Falla de Guadalcanal, que separa esta unidad de la Unidad Loma del Aire. Esta sucesión detrítico-carbonatada se dispone en concordancia sobre los sedimentos de la Unidad Alconera que aflora más al sur.

Dentro de esta unidad, los materiales que afloran en el área en la que se ubica la mina son:

1. Formación Caliza de Agua. Cámbrico Inferior. Está formada por dos niveles que de muro a techo son:
 Alternancia de pizarras y calizas.
 Calizas y dolomías marmóreas. En este nivel se localiza la mina de La Jayona (figura 2), aunque las mineralizaciones de Fe son frecuentes tanto en este nivel como en el anterior.
2. Pizarras verdes con nódulos de carbonatos. Cámbrico Inferior. Esta formación aflora al sur de la zona.

La paragénesis que se encuentra en la zona es de baja temperatura, pues el tipo de hematites que aparece (oligisto micáceo) es un indicador de temperaturas bajas (Fernández Amo y Rebo-

llada, 2005). Tampoco se identifican minerales que indiquen lo contrario, por lo que se deduce el origen sedimentario de este yacimiento. El tipo de yacimiento que se tiene en la zona es básicamente diagenético. No se sabe con claridad el origen del hierro que da lugar a la mineralización presente en la mina, aunque se piensa que es singenético (se han encontrado trazas de sulfuros de hierro en los carbonatos).

Durante su removilización, el hierro sustituyó a gran parte del calcio de la estructura molecular de las calizas, originándose $FeCO_3$ (siderita). Una posible karstificación previa del nivel calizo masivo favorecería el movimiento de los fluidos (Rebollada et al., in press).

Este hierro, mediante procesos diagenéticos y posiblemente también con una componente tectónica (se aprecia una disposición de las zonas mineralizadas relacionadas con las fracturas y fallas principales de la mina, con una dirección predominante N 40° E), dio lugar a una removilización de los fluidos que precipitaron sobre las diferentes fallas y diaclasas que afectaban al tramo superior de la Formación Caliza del Agua. Al aflorar en superficie estos materiales, y verse expuestos a la intemperie (oxidación), se desarrolló una montera de óxidos (hematites u oligisto) e hidróxidos de hierro (goethita), además de producirse una hidratación por el contacto con las aguas freáticas. Como resultado aparecen paragénesis minerales pobres en fases, entre las que se incluye una baja diversidad de óxidos, hidróxidos y carbonatos.

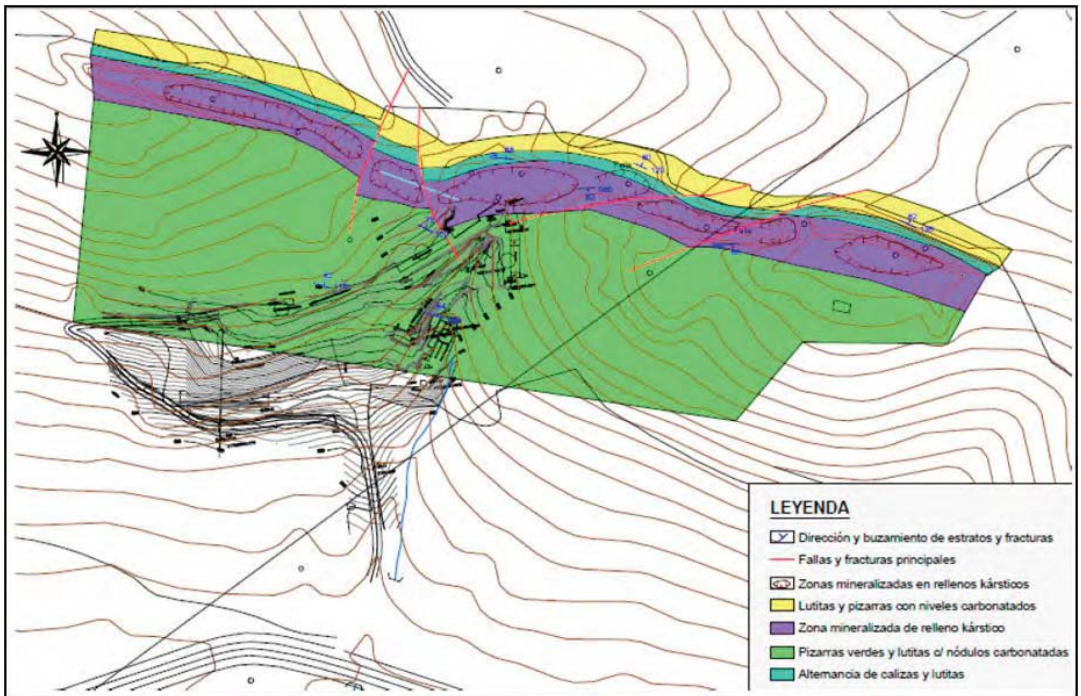


Figura 2. Geología de la mina de La Jayona. La capa de color morado corresponde con las calizas y dolomías marmóreas donde se localiza la mayor parte de la mineralización (Arlandi et al., 2016).

Contexto histórico

Los primeros indicios fidedignos de minería del hierro en Extremadura se remontan a la época romana. Existen restos de antiguas explotaciones de hierro en Jerez de los Caballeros, Zalamea, Alcollarín, Aliseda, Cañamero y Cabeza del Buey. En Fuente del Arco, la ubicación de la ciudad romana de Regina Turdulorum no es casual, sino que se sitúa en un cruce de caminos, al amparo de las fértiles tierras de la campiña y las cercanas minas de hierro y plomo de la sierra. Más aún, en la propia Sierra de la Jayona, la Ermita de la Virgen del Ara tiene documentado su origen como asentamiento romano, apreciándose todavía los vestigios de esta época.

La actividad se continuó en época visigótica y musulmana. De esta última se conservan numerosas palabras árabes en relación con la minería, testimonio de ello es el paraje minero de Fuente del Arco conocido como “Los Almadenes” (las minas).

Tras un largo período de inactividad, hasta el siglo XIX no se retoma la actividad extractiva. Hacia finales de ese siglo se tienen más referencias de la minería en la Sierra de la Jayona.

En la Estadística Minera de España, en 1888, se cita: *“Fuente del Arco es una zona minera de mucha extensión, pues en un radio de muchas leguas existen innumerables minas de plomo, plata, cobre, azogue y hulla”*. Ninguna mención a las explotaciones de hierro, aunque al año siguiente dicha estadística menciona la existencia de *“criaderos de hierro oligisto en (...) y Fuente del Arco, que no se explotan a causa de lo costoso del transporte a los puertos más inmediatos de Sevilla, Huelva y Lisboa”*.

La principal problemática era el transporte del material, por lo que no se dinamiza la actividad minera hasta 1895. La Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya finalizó la construcción del ferrocarril minero entre esta localidad y Fuente del Arco con una longitud total de 67 kilómetros. Esta infraestructura supuso, durante la primera década del siglo XX, una clara ventaja para los yacimientos de mineral situados en las proximidades de la línea férrea por el abaratamiento de los costes de transporte.

En 1914, con el estallido de la I Guerra Mundial, se generó una gran demanda posibilitando que la mayoría de minas y fábricas funcionaran a pleno rendimiento, pero la producción se resintió al término del conflicto. A los efectos del fin de la Gran Guerra se unieron los conflictos sociales en España entre los años 1917 y 1921.

Desde 1921, las referencias que se tienen de la minería de hierro en la zona son relativas a concesiones de investigación. Tanto la explotación como el entorno de la mina sufrieron un abandono completo, desmantelándose durante el período de la guerra civil el teleférico minero construido a principios del siglo XX. La ausencia de actividad e interés por parte de la administración llevó a la colonización natural del entorno, convirtiéndose la explotación en un espacio natural de gran valor paisajístico y natural. El 30 de septiembre de 1997 se declaró a la mina de la Jayona como Monumento Natural.

A partir de 1998, inician los trabajos de acondicionamiento para su uso turístico, con las primeras intervenciones de estabilización de taludes (figura 3). Se crearon una serie de itinerarios por di-



Figura 3. Acondicionamiento de la mina. Trabajos de bulonado con grúa en la zona del colapso.

ferentes niveles de galerías, se rehabilitaron varios edificios como centro de recepción de visitantes y museos y se logró que la mina fuera accesible para todos los públicos. Desde entonces más de 200.000 visitantes han podido disfrutar de este antiguo espacio minero.

Colapso parcial y cierre de los niveles 2 y 3

El 10 de enero de 2010, tras un período de intensa precipitación, tuvo lugar el vuelco de una gran masa de roca en el sector denominado “hueco central”. A consecuencia del mismo se tuvieron que cerrar a las visitas los niveles 2 y 3 de la mina que incluyen una de las zonas más espectaculares del recorrido, la Sala de las Columnas.

El colapso afectó a una zona del talud norte que estaba en extraplomada. Dicha zona se encontraba ya reforzada con pernos. Tras el colapso se apreció que el desprendimiento se producía a favor de un plano de estratificación.

El derrumbe debió caer directamente sobre el tramo del Nivel 3 que discurre entre las Galerías 2 y 3, ya que tras él desaparecieron completamente las barandillas y el piso de tramex. También mostraba desgarros la malla de triple torsión que se localiza en el talud entre los niveles 3 y 4. Incluso la propia vereda del Nivel 3 mostraba desprendimientos en el suelo que hacían que el mismo se estrechase, haciendo peligroso caminar sobre él.

Los daños eran menores en el Nivel 2. En este nivel aparentemente solo sufrieron daños las barandillas de madera.

Estudios de estabilidad realizados

Ante el estado de deterioro en el que quedaron varios tramos de camino y el interés por evitar riesgos futuros, se realizó un estudio geotécnico para determinar el grado de estabilidad de las zonas visitables de la mina. El estudio consistió en dos trabajos diferenciados:

En primer lugar se estudió la zona del colapso de enero de 2010, con el fin de identificar sus causas y establecer medidas de estabilización necesarias que permitan realizar las visitas con seguridad.

En segundo lugar se inspeccionó el resto de la mina, con el fin de determinar si pudieran existir otras zonas que en el futuro pudieran ser inestables. Se estudiaron tanto los taludes como la gran cámara llamada "Sala de las Columnas"

Para realizar estos estudios, en primer lugar se abordó una caracterización geomecánica del macizo rocoso. Para ello se realizó una toma de datos siguiendo un protocolo predeterminado, con la metodología que se denomina "estación geomecánica". En este tipo de reconocimientos, se toman datos de fracturación de la roca (orientación de las fracturas, persistencia, rugosidad, etc.) y su resistencia esclerométrica. Con estos datos se procede a determinar la clasificación geomecánica del terreno, empleando tres tipos de índice de clasificación (RMR de Bieniawski, el GSI de Hoek y el índice Q de Barton). La determinación de estos índices es fundamental para la obtención de los parámetros de cálculo tenso-deformacional, que sirve para el cálculo de estabilidad de excavaciones subterráneas.

A continuación se expondrán los resultados de los estudios de estabilidad anteriormente indicados.

Estudio del colapso de los taludes en enero de 2010

Para estudiar la zona del colapso, se partió de los datos de fracturación de la roca en la zona próxima al mismo. Las orientaciones de las fracturas se representaron en forma de estereograma, para determinar cuál es la orientación media de cada familia de fracturas presente, tal como se muestra en la figura 4.

Mediante este procedimiento se censaron todas las fracturas del entorno, y se llegó a la conclusión de que en la zona colapsada existían dos familias de fracturas principales en la roca: S_0 estratificación y una familia de diaclasas denominada J_1 .

El talud colapsado tiene una disposición vertical, y un rumbo aproximado $N 95^\circ E$, o lo que es lo mismo, una orientación en términos de dirección de buzamiento / buzamiento de valor (185/90). Si representamos el valor de orientación de las familias S_0 y J_1 junto con la orientación del talud colapsado en proyección estereográfica, obtenemos lo siguiente (figura 5):

En el estereograma se aprecia claramente que el mecanismo de rotura es por "vuelco" o "toppling", tal como se aprecia en los esquemas patrones adjuntos (figura 6).

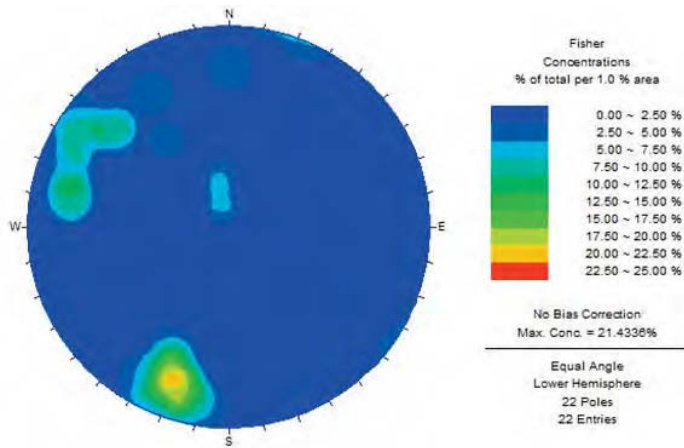


Figura 4. Censado en proyección estereográfica de las fracturas localizadas en las proximidades del colapso. Las orientaciones de las familias de fracturas principales corresponden a los centros de gravedad de las zonas con mayor porcentaje de fracturas presentes.

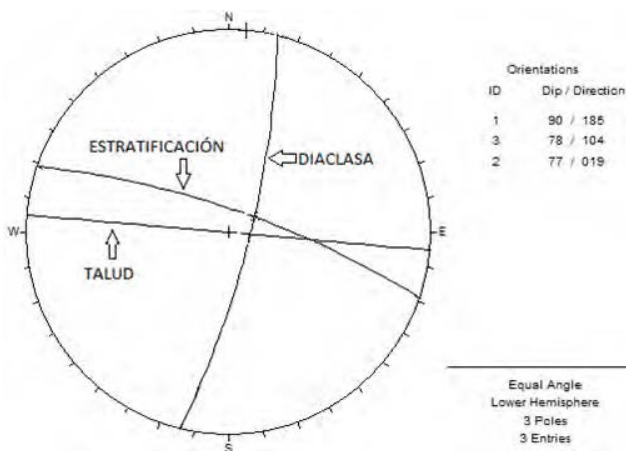


Figura 5. Estereograma de la zona del colapso.

De acuerdo a estos datos y conclusiones, el proceso de colapso se representa en el siguiente esquema (figura 7).

La zona colapsada ya estaba sostenida por bulones, pero estos se mostraron insuficientes para contener el empuje de la roca. Probablemente, en el diseño original se desconocía el mecanismo de rotura que eventualmente podía operar en este talud, y por ello posiblemente la cantidad de bulones colocados fue escasa.

Dentro del marco del estudio, una vez determinado el mecanismo de inestabilidad que generó el colapso, fue posible definir un sostenimiento con un factor de seguridad elevado. Con ayuda

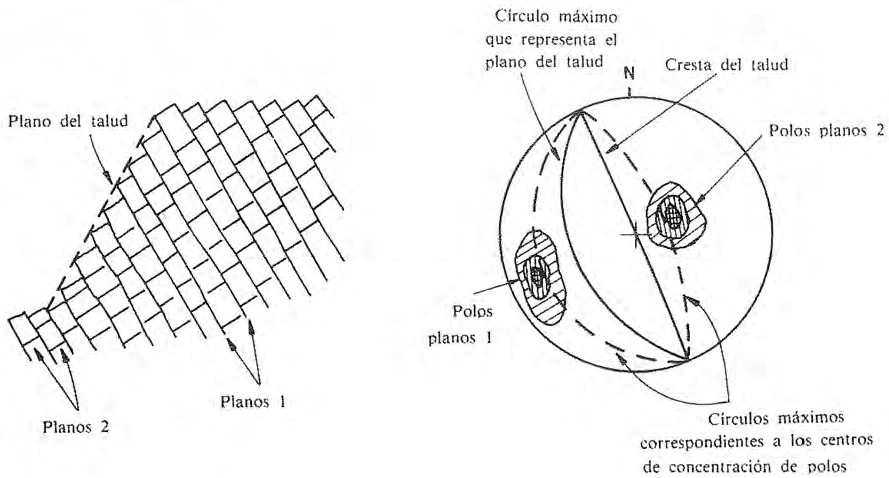


Figura 6. Patrón para la identificación de las roturas por vuelco (toppling) en proyección estereográfica.

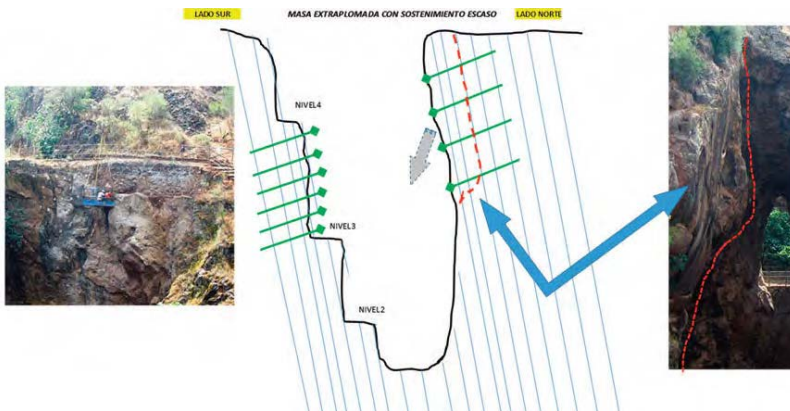


Figura 7. Esquema del colapso por vuelco de estratos escasamente bulonados.

de software especializado, se estimó que con una malla de pernos de acero de 32 mm de diámetro, en malla de 2 x 2 m, la zona del talud colapsado quedaría definitivamente estabilizada.

Análisis de estabilidad del resto de la mina

Una vez analizada la causa del colapso que cerró a las visitas los Niveles 2 y 3, se estudió el conjunto de la mina para valorar si existían otras zonas que pudieran ser susceptibles de sufrir problemas en el futuro. Se detectaron zonas con potenciales vuelcos de estratos, todos ellos en la margen norte de la mina, al igual que la zona colapsada.

La ubicación en la zona norte de estas potenciales inestabilidades es coherente con el desarrollo que tienen los niveles de acceso a la mina, todos ellos en la margen sur. Los mineros que explotaban el yacimiento a principios del siglo XX, ya debieron percatarse que la zona norte era más inestable, y por eso todos los niveles de acceso se ejecutaron por la más estable zona sur.

Como se ha indicado, las inestabilidades observadas en la zona norte, son también vuelcos de estratos. Las posibles zonas con riesgo, están fuera de la zona de visitas, pero se recomienda vigilarlas para anticiparse a los problemas, para lo cual se ha establecido un protocolo específico. La zona más espectacular de la mina es probablemente la conocida "Sala de las Columnas", que es una gran cámara subterránea (figura 8).

Para estudiar la estabilidad de esta sala se empleó la técnica de cálculo matemático conocido como "Elementos Finitos", que determina el nivel de tensión en la roca y valora si está cerca o lejos de romperse y generar el colapso de la excavación. Los cálculos indicaron que la tensión en la roca alcanzaba un valor máximo de 6,83 MPa. Teniendo en cuenta que, de acuerdo a los ensayos esclerométricos realizados, la resistencia a la compresión de la roca es mayor de 30MPa, obtenemos un factor de seguridad mayor a 5. Por tanto, desde el punto de vista tensional, podemos concluir, que la caverna es muy estable.

Sistema de vigilancia y monitorización de riesgos

Como complemento al estudio realizado, se recomendó la adopción de un sistema de vigilancia y monitorización de riesgos, que evite problemas en el futuro. Se definió un sistema económico y de fácil aplicación por parte del personal de la mina, que constaba de tres actividades:

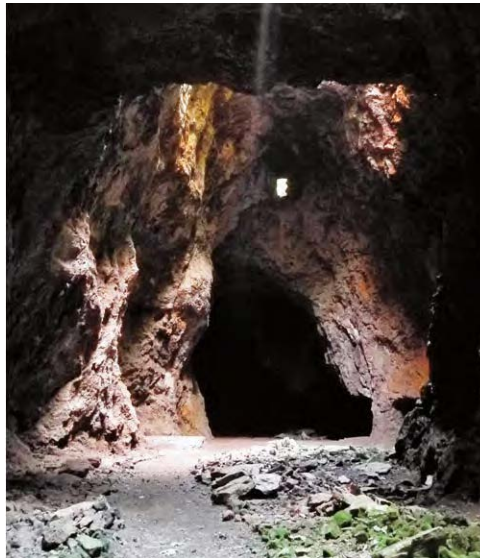


Figura 8. Sala de las Columnas.

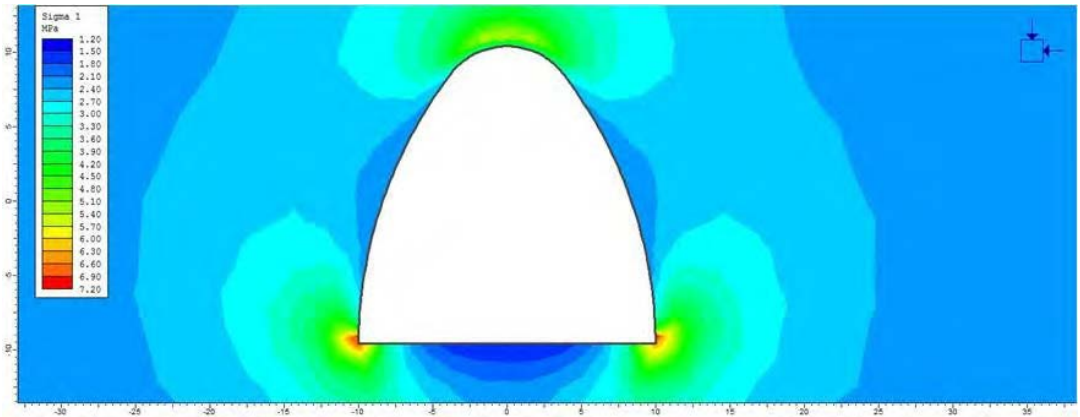


Figura 9. Tensiones principales en la roca en la Sala de las Columnas obtenidas mediante el método de los elementos finitos.

- Elaboración rutinaria de ficha de registro de incidencias: en ellas se recogen los diferentes indicios de inestabilidades que pudieran tener lugar (caída de piedras, etc.).
- Control de fisuras mediante fisurómetro: se monitoriza la apertura de fisuras y fracturas pre-existentes, mediante sencillas regletas fijadas a la roca. Se registrarán las lecturas, para calcular la velocidad de apertura de las mismas. A partir de este dato se tomarán las decisiones de actuación pertinentes.
- Visita anual de especialista en geotecnia: inspeccionará la mina, revisará las fichas y lecturas de fisurómetros.

Este tipo de controles es muy eficaz y barato para evitar problemas, especialmente en minas con un alto volumen de visitas anuales.

Conclusiones


Desde su apertura al público, la Mina la Jayona ha mostrado algunas inestabilidades geotécnicas, que incluso han llevado a cerrar a las visitas algunos niveles. Por este motivo, la "Dirección General de Medio Ambiente de la Junta de Extremadura" encargó un estudio técnico que determinase las causas de las inestabilidades y propusiese medidas de estabilización y control que en un futuro eviten problemas.

Se realizó una campaña de toma de datos geotécnicos, que permitió determinar que las causas de los colapsos son los vuelcos de estratos que potencialmente pueden tener lugar sobre la margen norte del yacimiento, siempre en los taludes. El estudio propuso medidas de refuerzo y un sencillo protocolo de vigilancia para evitar problemas en el futuro.

Así mismo, se aplicaron modernas técnicas matemáticas para estudiar la estabilidad de las excavaciones subterráneas, y en especial de la "Sala de las Columnas". Los resultados obtenidos avalan su estabilidad.

Referencias

- Arlandi, M., Jordá, R. y Bernardo, A. 2016. *Estudio de estabilidad del Monumento Natural Mina de la Jayona*. Informe interno para la Dirección General de Medio Ambiente de la Junta de Extremadura. Memoria y planos.
- Delgado Quesada, M., Liñán, E., Pacual, E. y Pérez Lorente, F. 1977. Criterios para la diferenciación de dominios en Sierra Morena Central. *Estudios Geol.* Vol. 12, 75-90.
- Fernández, F.J. y Rebollada, E. 2005. PIG Mina La Jayona. En: Muñoz y Martínez (Ed.). *Patrimonio Geológico de Extremadura*. Consejería de Agricultura y Medio Ambiente. Badajoz.
- Julivert, M., Fontboté, J.M., Ribeiro, A. y Nabais-Conde, L.E. 1972. *Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares* 1:1.000.000. IGME.
- Lotze, F. 1945. Zur Gliderung des Varisciden der Iberischen Meseta. *Geotektonische Forschungen*, 6: 78-92. Trad. en: *Publicaciones Extranjeras sobre Geología de España*, 5, 149-166.
- Merino, T. 1889. Estadística minera de España (Badajoz). Consejo de Minería. Madrid, 63-67.
- Rebollada, E., Fernández-Amo, F.J., Muñoz Barco, P., De Tena Rey, M^a T. y Tejado Ramos, J.J. (En prensa). Geología. En: Crisóstomo, Rebollada, Muñoz y Espina (Eds.). *Monumento Natural Mina La Jayona. Un Museo de Ciencias Naturales al Aire Libre*. Consejería de Medio Ambiente y Rural, Políticas agrarias y Territorio. Junta de Extremadura. 223.
- Villar y Lavin, M. 1888. *Estadística minera de España (Badajoz)*. Consejo de Minería. Madrid, 125-127.



Gestión y desarrollo del turismo subterráneo

A.M. Fas Botias, 2018. La gestión de las Coves de Sant Josep: hacia una nueva cultura del turismo subterráneo. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 293-304.

La gestión de las Coves de Sant Josep: hacia una nueva cultura del turismo subterráneo

A.M. Fas Botias

Coves de Sant Josep, Paratge de Sant Josep, s/n. 12600 La Vall d'Uixó, Castellón. info@covesdesantjosep.es

RESUMEN

Allá, junto a una planicie donde duermen las montañas, a través de las aguas glaucas nace el río subterráneo de les Coves de Sant Josep, en La Vall d'Uixó, ubicadas en la provincia de Castellón en pleno corazón del Mediterráneo. Se ubican justo dónde se abre como puerta del paraje el Parque Natural de la Sierra de Espadán, donde el visitante se sorprende del encuentro con la naturaleza en general y con el mundo subterráneo en particular, un espacio único y misterioso, dónde la historia, sus formaciones geológicas, el agua y la luz, lo convierten en uno de los mayores referentes de la oferta turística de la Comunidad Valenciana. Desde hace unos años, se lleva implantado un nuevo modelo de gestión turística que tiende hacia la excelencia, poniendo en valor su patrimonio natural y cultural, un equipo humanista, conservador con el medio, más tecnológico y en la búsqueda continua de un turismo de experiencia. Se trata de un modelo de gestión cuyo objetivo es implantar la nueva cultura del turismo subterráneo, basado en que el turista, más allá de una vista clásica, perciba nuevas sensaciones, como el imponente silencio de una cueva, el misterio de su origen o la sensación de estar realizando un viaje a través del tiempo. Se han desarrollado nuevas y emergentes tipologías de vista, como explorar la cavidad en kayak disfrutando de un fascinante recorrido por sus galerías inundadas (Espeleokayak); *Singin in the Cave* que desde 2016 se inició como una innovadora iniciativa musical aprovechando la acústica que ofrece la cavidad, visitas temáticas o visitas exclusivas entre otras. Todo este conjunto de iniciativas, refuerzan el proceso para la obtención de la Certificación Q Calidad Turística por el ICTE, programas de formación a través del *coaching* emocional desarrolladas para el equipo humano. Se han iniciado nuevas exploraciones después de 30 años por el grupo de Espeleobuceo EOM y Espeleoclub La Vall, un nuevo proyecto de iluminación, junto a una de las instalaciones de localización a través de fibra óptica que convertirá la cueva en una de las más tecnológicas a nivel mundial.

Palabras clave: cueva turística, espeleokayak, turismo subterráneo.

The management of the Sant Josep caves: towards a new culture of the subterranean world

ABSTRACT

In a plain where the mountains sleep, glaucous waters give birth to the underground river of Les Coves de Sant Josep, in La Vall d'Uixó, located in the Castellón Province and in the heart of the Mediterranean. The river is the main entrance to the Natural Park of Sierra de Espadán, where the visitor will be surprised by nature and the underground world, a unique and mysterious place which is one of the main tourist attractions in the Community of Valencia thanks to its history, geological formations, water and light. For some years, a new model of tourism management is being implemented so as to achieve excellence, placing value on its natural and cultural heritage, a human team, environmentally friendly, more technological and constantly searching for experience-based tourism. It is a management model with the objective of implementing a new culture of underground tourism, based on the fact that the tourist can experience new sensations such as the silence of a cave, the mystery of its origin or the sensation of being travelling through time. New and emerging visit typologies have been developed, as exploring the cave on a kayak in order to enjoy the fascinating route through the different underground passages (speleokayaking); Singin in the Cave, which in 2016 became an innovative musical

step leveraging the acoustics in the cave, themed and exclusive visits, among others. These initiatives reinforce the process to obtain the Q for Tourist Quality by the Institute for Spanish Tourism Quality (ICTE), training programs by means of emotional coaching focused on the human team. After 30 years, EOM's cave diving group have commenced new explorations, a new lighting project is being studied and, together with a location installation of fiber optic will help the cave to become one of the most technological in the world.

Keywords: show cave, speleokayaking, underground tourism.

Introducción: Una mirada al pasado

El municipio de la Vall d'Uixó se sitúa al este de España, en la provincia de Castellón, (figura 1) a pocos kilómetros de la costa del levante español. Las Coves de Sant Josep están situadas a la entrada del Parque Natural de la Sierra del Espadán y son un ejemplo de sistema kárstico atravesado en su interior por un río subterráneo, que en este caso, es navegable en algunos tramos para realizar visitas turísticas.

Antes de los adelantos del siglo XX, importantes historiadores como J. Cavanilles, Sebastián Miñano, o Pascual Madoz entre otros, ya citaron en sus obras sobre geografía la existencia de esta cavidad (Valle de Uxó, Almenára y Murviedro con su Termino General). También, se tiene constancia de que la cavidad era conocida desde el Paleolítico superior (pobladores mesolíticos y neolíticos, transición entre el Paleolítico y el Neolítico, hará unos 17.000 años), como lo demuestran los yacimientos arqueológicos encontrados en la boca de acceso junto a las pinturas rupestres del período Magdaleniense. Incluso, la proximidad de un poblado íbero también indicaba que durante esa época la cueva ya era conocida y explorada, al igual que durante la larga dominación romana, a la vista de una lápida encontrada dedicada a Caio Cneo Craso, hijo del cónsul romano Marco Licinio Craso.

Actualmente, el visitante encuentra al acceder a la cueva una representación de realidad aumentada en el embarcadero. En ella, ponemos en contexto al visitante sobre los hallazgos arqueológicos identificados en la cueva y su entorno, declarados Patrimonio Mundial por la UNESCO. A día de hoy, siguen los trabajos de exploración y estudios del arte rupestre en el interior de la cueva. La cavidad representa la surgencia activa de un acuífero desarrollada en calizas del Triásico medio (Dupuy de Lome, 1959; Llamas y Casabo, 1981; Blázquez *et al.*, 1994; Garay y Medina, 1994), pero a pesar de las múltiples exploraciones de diferentes grupos de espeleología, aún no se conoce el inicio del río subterráneo hacia el interior.

La primera exploración de la que se tiene constancia se realizó en 1902 aunque la cavidad no fue visitable hasta mediados de los años 50 del siglo XX mediante un sistema de pasarelas que llegaban tan sólo hasta la "Boca del Forn". Posteriormente, se amplió el recorrido mediante barrenos, incrementando el volumen de algunas galerías para permitir el paso de las barcas. En 1961 se inauguró el recorrido por la galería seca y se completó el recorrido que se visita actualmente de aproximadamente algo más de 2 km.

Desde la apertura al público hasta la fecha las Coves de Sant Josep han sido visitadas por millones de personas, convirtiendo a esta cavidad en un referente turístico y natural de La Vall d Uixó y de la propia Comunidad Valenciana.



Figura 1. Ubicación geográfica de las Coves de Sant Josep, en La Vall d'Uixó (esquema geográfico sin escala)

De la visita a la búsqueda de la experiencia

La estrategia de marketing o campaña "offline", como le llamaríamos hoy día al método que se utilizó durante los años 70, 80 y 90 del siglo pasado, fueron las excursiones escolares. La gran mayoría de personas que proceden de la Comunidad Valenciana y visitan la cavidad junto a su familia, pareja o amigos, con una media entre 30 y 50 años, recuerdan esas vistas escolares, que fueron sumamente populares durante esas décadas.

Es evidente que la perspectiva de la cueva ha cambiado y se modifican sus expectativas ya que este visitante que repite la experiencia ya no sólo busca navegar sobre una barca junto con un grupo de personas y junto a guía-barquero en un río subterráneo, si no que vienen a descubrir uno de los tesoros naturales de la región que se esconde junto al Mediterráneo. Tal vez, viene a revivir la experiencia de su niñez y como métricamente diríamos, este visitante se convierte en un usuario, es decir, cuando un visitante repite como mínimo una vez la visita a la cueva.

Eslogans como "Viaje al Centro de la Tierra", "Descúbrelo", "Belleza Interior" o el más actual "Río de Sensaciones" entre otros, han viajado en el tiempo intentando transportar al visitante hacia algo desconocido, hacia el interior de las entrañas de la Tierra. La diversificación del tipo de visita es el precedente de esta nueva gestión innovadora y sostenible. Sin embargo, el proceso en su conjunto está basado en tres pilares: a) la innovación, B) la conservación y c) la puesta en valor del patrimonio natural y cultural. La investigación no sólo permite el aporte de información

y de conocimientos, sino que retroalimenta a la innovación y se plasma en la conservación de la cavidad.

Pero la difusión es también una parte de la estrategia de gestión en los últimos años. Medios nacionales de comunicación como el programa de divulgación científica *El Escarabajo Verde*, Radio Televisión Española (RTVE), *la revista Vogue*, (una de las que tiene más suscriptores a nivel mundial), el especial de viajes de *la revista Hola* de 2018 o la reciente publicación en mayo de 2018 en la revista de más tirada nacional especializada en actividades que se practican en la naturaleza, *Grandes Espacios*, han sido los altavoces de dichos productos emergentes que despierten emociones o productos vivos como la propia cueva.

Singin in the Cave; un proyecto con alma

Singin in the Cave nació en 2016 como un proyecto cultural en el que la música, aprovechando la incomparable acústica de la cueva, y el patrimonio natural, crean sinergias para aportar lo mejor de ambos aspectos. Es una experiencia que podría tildarse de innovadora y casi única, ya que incluye la visita a las Coves de Sant Josep, además de un mini concierto acústico, en el cual lo músicos cantan desde una barca en uno de los lagos más grandes de las Coves de Sant Josep: la Sala de los Murciélagos (figura 2).

Posteriormente, público y músicos se desplazan a otra sala dónde desembarcan y ahí continúa el concierto, ya con sonido amplificado y tierra firme, pero todavía en el interior de la cueva. Año tras año apuesta por propuestas íntimas y de calidad, que encajan a la perfección en un espacio, visual y acústicamente incomparable. Todos los conciertos se celebran los viernes noche en la época estival, con un aforo máximo de 50 personas dónde se pretende que el espectador disfrute un producto que muy pocas cuevas del mundo ofrecen.

Un ejemplo es la actuación de Morgan, una banda Madrileña con la fascinante voz pop-rock española, el pasado abril de 2017 dónde se pudo comprobar y experimentar como elevaron la emotividad de los visitantes.

Espeleokayak: la visión del turismo de aventura sostenible

Cada vez se oye más el vocablo activo o aventura unido al de turismo desde todos los ámbitos, tanto viajeros, como agentes turísticos y los destinos receptores van comprendiendo su significado y, tomando conciencia, de por qué adoptar un modelo turístico sostenible es fundamental para el futuro de la industria turística y la preservación de los entornos sociales, culturales y naturales de dichos destinos.

Esta actividad de aventura combina la navegación en kayak con la vista de la cueva por uno de los ríos subterráneos navegables más largos de Europa. Las travesías son en grupos reducidos y equipados con trajes de neopreno y material técnico, tienen una duración de unas dos horas. La excursión también incluye la visita a pie de 250 m por la galería seca de la cueva (figura 3).

Es una actividad de bajo impacto, tan sólo 14 kayaks, y que se ofrece en periodos de baja afluencia



Figura 2. Imagen de un concierto durante el ciclo de Singin in the Cave de 2017 y código QR para poder acceder al audiovisual.

cia (de noviembre a abril), dónde el visitante toma conciencia del entorno, sus características y particularidades singulares de dicha cavidad, lo que la convierte en una iniciativa única en Europa.

El camino hacia la excelencia

Existen paradigmas empresariales y sociales que están obsoletos y lo que funcionaba antes hoy no genera un producto sugerente ni atractivo para el turista. Hoy más que nunca, el equipo de trabajo debe de ser proactivo, la gerencia debe tener una cultura sólida en cuanto a su personal humano que atraiga talentos y los retenga, que cree una inercia de crecimiento constante y aprendizaje, que se adapte al cambio del tipo visitante y a sus necesidades, en definitiva que de respuestas a la demanda y que a la vez pueda generar una nueva oferta.

Para que esto suceda, es necesario superar los modelos de liderazgo autoritario pretéritos, un ambiente de trabajo tenso basado en órdenes y, que no permite la comunicación abierta entre los diferentes estratos de jerarquía laboral, de forma que el propio talento dentro del equipo de trabajo, se desarrolle y finalice en proyectos, que en su gran mayoría, son un éxito. Pero si sucediera lo contrario, la respuesta debe ser la misma, comunicación e impulso, porque el fracaso de



Figura 3. Visita en Espeleokayak a las Coves de Sant Josep.

un proyecto en este contexto, es con total seguridad el inicio de un proyecto exitoso. Para ello, este equipo ha sufrido un cambio en su modelo de trabajo más humanista, en contacto con el visitante, mejorando cada día los procesos internos de trabajo para dar el mejor servicio posible al cliente. Programas de *coaching* o aprendizaje para generar modelos de trabajo en equipo ha sido la clave del éxito durante estos más de 2 años (figura 4).

El Certificado de Excelencia de TripAdvisor 2016 y 2017 y en proceso de la Certificación de la Q de Calidad Turística (ICTE) que nos convertirá en una de las pocas cavidades subterráneas de uso turístico en la obtención de este distintivo en España dentro del catalogado Turismo Industrial. Se inició la formación en 2017 y el proceso de solicitud en febrero de 2018, en el cuál todavía estamos inmersos en la elaboración de un manual de calidad que será auditado para su verificación. En noviembre en el Comité de ICTE evaluará y valorará dicho procedimiento para la obtención de dicha certificación.

Por otra parte, la conservación de la cavidad es prioritaria en este nuevo modelo de gestión del turismo subterráneo implantado en las Coves de Sant Josep y supone uno de los pasos más importantes para acercarse a la excelencia. Uno de los proyectos más destacados para finales de 2018 es el nuevo sistema de iluminación LED subvencionado por la Agencia Valenciana de Turismo de la Comunitat Valenciana y que se convertirá en un nuevo activo más para el visitante. En este sentido, se han iniciado la colaboración con diversos organismos públicos de investigación

y universidades; el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), La Universidad de Cantabria (UC), entre otros, para que se realicen diferentes estudios científicos básicos para la mejorar la conservación de la cueva. De estas colaboraciones, destacan el proyecto científico en relación al desarrollo de productos poco invasivos para erradicar en el mal verde, que lleva a cabo el IGME. Se trata de en un proyecto pionero en Europa, donde las Coves de Sant Josep forman parte de un grupo reducidos de cavidades en toda la geografía española que han sido seleccionadas como cueva piloto (en la actualidad realizamos una parada técnica anual para labores de mantenimiento y limpieza del mal verde y desde 2017). También con el IGME y junto con la UC, se ha desarrollado una red de muestreo dentro de la cueva para obtener medidas de las concentraciones de gas radón y, así, dar cumplimiento a la Directiva Europea transpuesta a la legislación española. Se han realizado también estudios biológicos, geoquímicos y paleoclimáticos y, en breve, se firmará un convenio de colaboración entre el IGME y el Ayuntamiento de la Vall d'Uixó para llevar a cabo diferentes estudios que son básicos si queremos que la cueva mantenga un estado de conservación óptimo.

Coves de Sant Josep para todos: visita inclusiva

Uno de los objetivos durante estos últimos años es que el recurso turístico se convierta en 100% accesible, para ello se ha estado llevando a cabo junto al Comité de Accesibilidad local de La



Figura 4. Equipo de trabajadores de las Coves de Sant Josep junto con la alcaldesa, Tania Baños.

Vall d Uixó y participando activamente en el Plan Estratégico de Accesibilidad de la Comunitat Valenciana, diversas acciones para mejorar las condiciones de accesibilidad y eliminar las barreras arquitectónicas para vistas de personas con algún tipo de discapacidad.

Con el uso de las nuevas tecnologías hemos podido acercar nuestra cavidad de manera inclusiva a discapacitados auditivos, visuales y físicos. La celebración del Día Internacional del Turismo el pasado 2017 bajo el lema "*Un turismo para todos*", marcó un antes y un después en esta materia pendiente. Par ello, tres elementos de gran relevancia dan cobertura a la cavidad:

- La visita virtual inmersiva: el usuario conoce el recurso mediante un dispositivo (gafas de realidad virtual) y vive una experiencia 360º del interior de la cueva, con la audioguía informativa y la sensación de deslizarte por sus tranquilas aguas mediante la barca conducida por el propio barquero. Este recurso se utiliza en casos de visitantes con una movilidad muy reducida y con claustrofobia (figura 5).
- Sistema audiovisual doblado con lenguaje de signos: se trata de un video dónde se realiza una explicación antes de embarcar. El video está doblado en lengua de signos para los discapacitados auditivos.
- Una silla de ruedas permanente de PVC en la Galería Seca para todos los usuarios con discapacidad física puedan realizar la visita y que está sea de forma autónoma.
- Los accesos y la taquilla adaptada: con la remodelación integral del punto de venta de entradas y fotografía en 2016 disponemos de todos los accesos habilitados para discapacitados desde el parking hasta el interior de la cueva (figura 5).

El objetivo para 2019 es eliminar todas las barreras arquitectónicas posibles (físicas y sensoriales) y, que el embarque, sea posible para los visitantes con movilidad reducida a través de la instalación de una silla hidráulica para garantizar el acceso completamente autónomo. También, está en comunicación permanente con el Comité de Accesibilidad local y en proceso el diseño de una barca adaptada para discapacitados con una movilidad muy reducida.

Facilitamos a centros especializados, agrupaciones y asociaciones de discapacitados la reorganización de la visita y nos adaptamos en todo momento a sus necesidades según la discapacidad que presenten, siempre preservando su seguridad y el conocimiento del recurso turístico.

En 2017 nos visitaron alrededor de 1500 visitantes con discapacidad.

La cueva del Siglo XXI

Nos encontramos inmersos en la era de las nuevas tecnologías, de la generación digital y para ello, también hemos tenido que readaptar el recurso turístico a todos estos cambios continuos.

Para lograr que nuestra visita se adapte a los parámetros tecnológicos del siglo XXI se han desarrollado; una nueva imagen digital a través de la nueva web, campañas *online*, posicionamiento



Figura 5. Imagen de una audioguía junto con las gafas de realidad virtual en una zona de la cueva con un acceso habilitado para la vista de turistas con movilidad reducida.

SEM (*Search Engine Optimization*) y SEO (*Search Engine Marketing*), nos hemos convertido en el primer criterio de búsqueda en Google como referente turístico en Castellón, la instalación de un tótem digital en la oficina de información para la venta de entradas virtual in-situ, la instalación de nuevo *software* de venta de entradas, promociones activas en redes sociales o la futura instalación de fibra óptica que permitirá que el visitante pueda acceder a las redes sociales durante la visita. Todo ello, acompañado de un nuevo sistema de audioguías y un sistema de geolocalización avanzado, son las acciones desarrolladas durante el último trienio (figura 6).

Uno de los nuevos proyectos y en el que acabamos de inscribirnos y presentar documentación para el programa Europeo Wifi4EU, el cual conceden un bono y cubren los costes de equipamiento e instalación de puntos de acceso a Wifi gratuitos en espacios municipales y turísticos.

Conclusiones

En este artículo se traza un camino hacia la transformación del turismo subterráneo, con el fin de acercar la cavidad al visitante, romper modelos de gestión obsoletos, eliminar barreras arquitectónicas, transformar los sistemas de gestión turística en modelos más humanos y cercanos al trabajador y entre los trabajadores y el turista. Tal y como se ha expuesto en el texto, es necesario

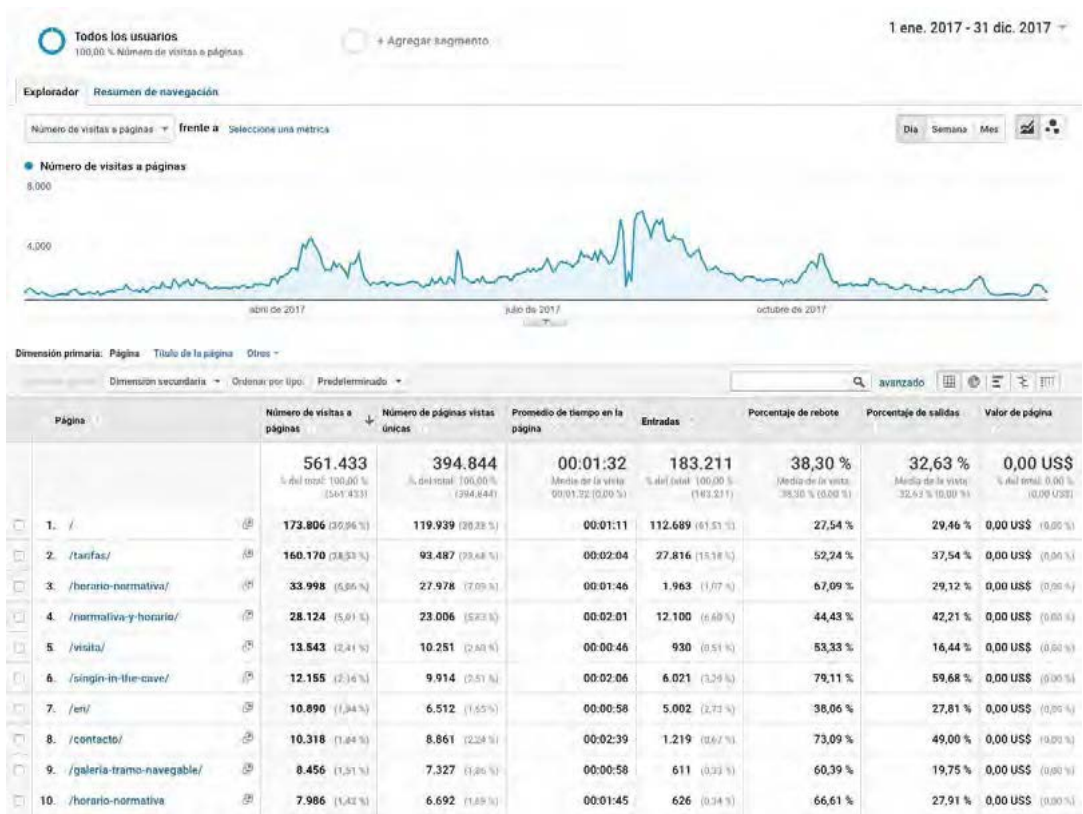


Figura 6. Evolución de la visitas web y venta de entradas online.

crear nuevos productos que despierten la curiosidad y emoción del turista, de la misma forma que ayuden a sensibilizarnos con el entorno, de manera que la sostenibilidad de la cueva sea una de las prioridades. Para ello, entre otras acciones, se están implantando equipos de horro energético, actuaciones como el tratamiento del mal verde, que mejora notablemente la conservación de la cavidad y, por supuesto, todo aquello relacionado con la calidad de la visita.

Agradecimientos

Este trabajo es fruto de la colaboración entre el equipo de las Coves de Sant Josep, el quipo de Gobierno del Ayuntamiento de La Vall d Uixó, la Agencia Valenciana de Turismo y el Patronato de Turismo de Castellón. Quiero hacer extensible este agradecimiento a Raúl Rubio, Director de Singin in the Cave, Fernando Falomir y todo el equipo de Viunatura, al Club de Espeleología La Vall y de Espeleobuceo, Antonio Beltrán Pueyo, Coach, Vicent Martell, Marketing, David Tur, Diseñador Gráfico y *Community Manager* y al Comité local de accesibilidad de la Vall d Uixó. También y de forma muy especial por su apoyo constante agradezco a ACTE y actiba en general y a la junta directiva en particular, con especial mención a Pedro A. Robledo Ardila. Entre los mim-

braos del equipo de trabajo de la cueva mi reconocimiento a Chema Lorenzo González, por sus magníficas fotografías; a Juan José Tíscar por su apoyo con las traducciones y a José Enrique Puchol por su ayuda en el tratamiento del texto.

Referencias

- Blázquez, A., Garay, P. y Medina, R. 1994. Estudio de la Cova de Sant Josep (LaVall d'Uixó, Comparaca de la Plana Baja). Parte 1. Topografía. *LAPIAZ*, 23, 19-34.
- Cavanilles, Antonio Josef 1795. Valle de Uxó, Almenára y Murviedro con su Termino General. *Observaciones Sobre la Historia Natural, Geografía, Agricultura, Población y Frutos del Reyno de Valencia*. Caja de Ahorros y Monte de Piedad de Castellon (1991). 115-128
- Garay, P. y Medina , R. (1994) Estudio de la Cova de Sant Josep (La Vall d'Uixó, La Plana Baixa). *Lapiaz* nº 24. Federaci3n Valenciana de Espeleología 3-16.
- García García, H. 1962 *Notas Para la Historia de Vall de Uxó*. Excmo. Ayuntamiento e Instituto Laboral de Vall de Uxó.
- Dupuy de Lome, E. 1959. Mapa geológico de España, *escala 1:50.000*. Hoja y Memoria no. 668 (Sagunto). IGME, 80 p.
- Llamas, N. A. y Casabo, A. J. (1981). Informe espeleológico para el conocimiento del Karst de Espadán. *Lapiaz*, 8, 7-11.
- Lumières, Antonio Valcárcel Pío de Saboya y Moura, Conde de. 1852. Vall de Ujó. *Inscripciones del Reyno de Valencia: la mayor parte inéditas*. 181-182. Madrid.
- Madoz, Pascual 1849. *Diccionario Geográfico-Estadístico-Histórico de España y sus posesiones de ultramar*, Vol. XV, 505-506. Madrid.
- Miñano y Bedoya, Sebastian. 1828. *Diccionario geográfico-estadístico de España y Portugal*. Vol. IX 241.
- Nebot i Porcar, V. y Borràs i Xavier, J. 1994. El Riu Subterrani de Sant Josep. *Aigualit, Revista del Centre d'Estudis Vallers*, nº 1, 23-43.

A. Torres Asensio, et al., 2018. La Gruta de las Maravillas y el modelo de gestión en el desarrollo turístico del destino Aracena. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 305-314.

La Gruta de las Maravillas y el modelo de gestión en el desarrollo turístico del destino Aracena

A. Torres Asensio⁽¹⁾, E. Romero Bomba⁽¹⁾, C. Moya Díaz⁽¹⁾, L. Hacha Bernal⁽¹⁾, M. Guerra González⁽¹⁾ y W. Martín Rosales⁽²⁾

(1) Ayuntamiento de Aracena. Plaza Marquesa de Aracena, s/n. 21200. Aracena (Huelva)
anatorres@ayto-aracena.es, castillo@ayto-aracena.es, oficinaturismo@ayto-aracena.es, desarrollolocal@ayto-aracena.es,
alcaldia@ayto-aracena.es

(2) Dpto. Geodinámica. Universidad Granada. Campus Fuentenueva, s/n. 18071. Granada
wmartin@ugr.es

RESUMEN

La gestión turística en la Gruta de las Maravillas está repercutiendo en el posicionamiento del destino Aracena al generarse sinergias con otros productos. Se expone el modelo de desarrollo turístico que cuenta con un método de trabajo basado en tres premisas: investigación, conservación y puesta en valor. Este modelo está dando sus frutos potenciando el sector terciario de la población.

Palabras claves: Aracena, Gruta de las Maravillas, sinergias, turismo.

The Maravillas cave and the management model linked to the tourist development of the Aracena destination

ABSTRACT

Tourism management in the Maravillas cave is having and impact on the positioning of Aracena as a target thanks to generate synergies with other products. This model of tourist development has a working method based on three premises: research, conservation and revitalizing. This model is paying off by increasing the tertiary sector of the population.

Keywords: Aracena, Maravillas cave, synergies, tourism.

Introducción

La trayectoria en la gestión de la Gruta de las Maravillas desde su apertura en 1914 ha generado una experiencia y unos valores promocionales que se han trasladado a otros recursos turísticos de la localidad, generando sinergias que están posicionando en el mercado al destino Aracena. Especialmente, por su ubicación geográfica (figura 1), se está potenciando la relación entre la cavidad, el Museo del Jamón y el Recinto Fortificado. Este planteamiento de desarrollo turístico, al cual se está contribuyendo con diversas acciones, parte con tres premisas: investigación, conservación y puesta en valor. La experiencia en la gestión turística de la Gruta de las Maravillas, decana del turismo subterráneo español, está redundando en el posicionamiento del destino

Aracena ya que, permite generar sinergias con otros productos, al mismo tiempo que traslada el método de trabajo.

Objetivo del modelo de gestión de la Gruta de las Maravillas

El atractivo turístico de la Gruta de las Maravillas está vinculado a sus aspectos geológicos y no a los valores arqueológicos como sucede en otras cavidades pero la importancia histórica del lugar se transmite al sitio donde se ubica, el conjunto histórico de Aracena y, especialmente, el cerro del castillo. Esa es la premisa con la que se trabaja para generar unas sinergias que potencien el destino Aracena. Esta localidad cuenta con numerosos atractivos en el ámbito geológico, natural, histórico o gastronómico que, sumados entre sí, puede generar una imagen de marca. La gestión realizada en la centenaria trayectoria de la cavidad ha sido un laboratorio de pruebas que ha permitido trasladar la experiencia y la metodología de trabajo a otros productos turísticos de la localidad (Romero *et al.*, 2010). Al mismo tiempo, la cavidad es la locomotora que arrastra el tren del desarrollo turístico de Aracena (Alcaide y Hacha, 2010) (figura 2), pero se plantea un nuevo objetivo, potenciar el destino Aracena de forma global.

La consecución de ese objetivo permitirá, por una parte, satisfacer las expectativas del visitante pero por otra, se traducirá en un nuevo impulso para el desarrollo turístico que se basa en una



Figura 1. Vista general de Aracena y del Cerro del Castillo.



Figura 2. Sala de la Cristalería de Dios de la Gruta de las Maravillas.

mejor imagen, con un aumento cuantitativo tanto en el número como en el incremento del gasto del turista o en periodos de estancia más prolongados. Entre las acciones que se plantean para conseguir ese objetivo se encuentran la venta de entradas combinadas bajo la denominación Aracena Turística, la disponibilidad de audioguías, la realización de senderos que comuniquen la Gruta con el recinto fortificado que incluyen aspectos de zona de interés geológico, itinerario botánico o áreas recreativas, la investigación multidisciplinar o el establecimiento de medidas de conservación sectoriales que engloben al sitio geográfico. El logro de este propósito se visualiza no sólo, en un incremento de la visitas a los tres productos turísticos, sino también en la satisfacción de los visitantes por el incremento cualitativo en los servicios que se prestan. Es un método de trabajo que permite posicionar al destino Aracena.

Metodología y desarrollo del modelo de gestión

Este proceso está basado en la investigación, en la conservación y en la puesta en valor. La investigación no sólo permite el aporte de información o de conocimientos, sino que esta contribución se aplica tanto a los aspectos conservacionistas como de divulgación y didácticos. El seguimiento ambiental que se realiza en la cavidad nos permite, con medidas de prevención, regular el uso turístico para garantizar la sostenibilidad, al mismo tiempo que los datos que se obtienen son trasvasados a los visitantes en las explicaciones de los guías (Martín *et al.*, 1995; 2003; 2007; 2012). El mismo procedimiento se utiliza en el recinto fortificado o en el Museo del Jamón.

Ejemplo de ello, son las investigaciones arqueológicas que no sólo permiten aporte de conocimiento para la consolidación y rehabilitación del monumento, sino que los datos históricos que se obtienen se ofrecen a los visitantes (Romero *et al.*, 2016). En el Museo del Jamón, los avances investigadores o los cambios en la legislación se aplican en los contenidos del centro y también se utilizan en las explicaciones guiadas. Esta metodología permite el trasvase de información para un uso sostenible, mediante la conservación, de una cavidad natural o un Bien de Interés Cultural (BIC), así como ofrecer explicaciones con rigor y “contar nuestras historias”.

Como señalamos, una de las premisas metodológicas es la investigación pero dadas las características de los lugares turísticos, cavidad y castillo, la formulación de los estudios debe ser desarrollada por las disciplinas arqueológica y geológica. Ello, no obvia un carácter multidisciplinar que permita sinergias entre ambas materias. Ejemplo de esto, han sido las prospecciones geofísicas que han permitido la detección tanto de cavidades en el cerro del Castillo (Martín Rosales, 2016) como de estructuras soterradas, los análisis faunísticos y polínicos que han aportado datos sobre las especies animales y la antigua cobertura vegetal o los estudios geomorfológicos asociados al poblamiento que nos muestran una importante pérdida de suelo desde el s. XIII (Romero *et al.*, 2016). Las informaciones que se han obtenido, revierte en un mejor conocimiento del cerro del castillo en todos sus ámbitos.

Es necesario una apuesta por la conservación de elementos del patrimonio natural, geológico o histórico, por lo que hay que establecer unas pautas que persigan el equilibrio entre el respeto por esos valores y el uso turístico que permite generar ingresos económicos y crear empleo lo cual repercute en la población local. Ejemplos de ello es el seguimiento ambiental que se realiza en la Gruta de las Maravillas desde 1993 (Martín *et al.*, 1995; 2003; 2007; 2012) o los trabajos de rehabilitación que se ejecutan desde 2007 en el Recinto Fortificado (Romero *et al.*, 2016). De forma paralela, se realizan medidas de conservación sectoriales que engloban al sitio geográfico. El cerro del castillo de Aracena, como lugar donde confluyen valores naturales, geológicos, paisajísticos, arqueológicos o urbanísticos, hace necesario el establecimiento de medidas de conservación sectoriales y, es algo, que se tiene en cuenta para la puesta en valor de un destino turístico. El cerro del castillo alberga parte del casco urbano de Aracena, por lo que dispone de una Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) que lo regula mediante normativa, pero al estar declarado, conjunto histórico, también cuenta con disposiciones en materia patrimonial recogidas en el Plan Especial de Protección y Reforma Interior. A ello, se le une la declaración como Bien de Interés Cultural (BIC), tanto del castillo como la Iglesia Prioral, así como su entorno que tiene protección sectorial de tipo medio ambiental a través del Plan de Ordenación Recursos Naturales (PORN) y el Plan Rector de Uso y Gestión (PRUG) del Parque Natural “Sierra de Aracena y Picos de Aroche”. El ámbito territorial del municipio, incluido el casco urbano, dispone de una carta arqueológica que permita la preservación de los yacimientos y, la Gruta de las Maravillas, cuenta con un perímetro de protección para garantizar que no se producen afecciones desde el exterior (Martín *et al.*, 2012). Precisamente, la realización de este estudio dio lugar al descubrimiento de una nueva cavidad en el cerro del Castillo (Martín Rosales, 2016).

El tercer eje metodológico es la labor de activación de los recursos para que se conviertan en productos turísticos. En este aspecto hay que destacar tanto la adecuación de infraestructuras como la mejora del servicio, siendo un ejemplo la formación de los guías a través del conocimiento generado en la fase de investigación. La puesta en valor, además de un concepto vincu-

lado al mantenimiento de una seña de identidad, supone adecuar unos recursos infrautilizados, establecer aspectos organizativos y de gestión, la interpretación, su difusión y promoción, es decir, revalorizarlos y ponerlos a disposición de la sociedad para que contribuyan al desarrollo sostenible como elemento endógeno.

Acciones que potencian el desarrollo turístico del destino Aracena

Una vez que se cuenta con un marco metodológico, se puede utilizar la conjunción de influencias para generar un valor añadido. La Gruta de las Maravillas supone el principal atractivo y activo turístico de Aracena debido a sus valores geológicos (Martín *et al.*, 1995), con unas altas cifras de visitantes que le han otorgado un reconocido prestigio y la han posicionado en el mercado. El objetivo es ofrecer al visitante de la cavidad otras posibilidades, otros productos, dentro de la localidad y posicionar el destino Aracena mediante la relación entre la Gruta de las Maravillas, el Museo del Jamón y el recinto fortificado mediante diferentes acciones. Ello, indiscutiblemente repercute de forma beneficiosa en la localidad ya que contribuye a su desarrollo con el fortalecimiento del sector terciario (restauración, pernoctaciones, comercios) pero también permite ofrecer la imagen de un destino que tenga unos conceptos asimilados de satisfacción y calidad. Se han planteado el desarrollo de acciones con un amplio espectro para la consecución del objetivo, algunas de las cuales ya se han puesto en práctica.

El sistema de visitas regladas de la Gruta de las Maravillas se ha trasvasado al resto de productos



Figura 3. Visita grupal y guiada al castillo de Aracena.

turísticos con el objetivo de incrementar la calidad en el servicio al ofrecer explicaciones con rigor e incidir en la conservación ya que se regula el acceso incontrolado que provocaba deterioros y expolio en la fortificación, al igual que sucedía en la cavidad antes de abrirse al turismo. En el Museo del Jamón, las visitas pueden realizarse de forma guiada o por libre. El recorrido guiado permite controlar a los visitantes de forma grupal, organizando el régimen de visitas, evitando actuaciones que incidan en la conservación y dando un valor añadido con las explicaciones. Este sistema ha dado buenos resultados en la cavidad y ha sido empleado en las visitas al castillo y al museo. En este último caso, también se permiten los recorridos libres ya que los contenidos didácticos del centro lo permiten y se amplían las opciones temporales de horarios para el visitante. En el caso del recinto fortificado (figura 3), una vez que se avance en los trabajos de restauración y puesta en valor también está prevista su implantación, aunque manteniendo el régimen de visitas guiadas.

Al sistema de visitas en grupo, se le une un nuevo concepto de visita guiada en estos puntos turísticos que han sido elegidos como espacios para implementar un nuevo servicio de atención al visitante. Dispondrá de un servicio de audioguías y/o radioguías con una implantación de 520 equipos para que el turista disfrute de una forma didáctica de la información de los distintos puntos turísticos que visita (figura 4). Con el dispositivo de radioguía *Groups*, un sólo guía podrá explicar diferentes espacios de los itinerarios en 7 idiomas ya que en un mismo grupo podrán existir diferentes nacionalidades con locuciones simultáneas. Este hecho, supone un paso significativo en la cualificación de las visitas, a lo que se le unen otras consideraciones como la mejora en las condiciones laborales ya que el guía no debe forzar la voz o el reforzamiento de la visita en grupo. La principal misión de la audioguía no es la de explicar y envolver al visitante en las características, en la historia y en la leyenda del lugar turístico que se narra de forma individualizada y libre. Se le ofrece una visita con información pero que no está ceñida a determinados horarios, lo cual amplía las posibilidades que se le ofrece al visitante.

Otra de las acciones es la creación de la tarjeta Aracena Turística. La adquisición de esta tarjeta permite una mayor comodidad al visitante, ya que incluye una entrada combinada a los tres sitios turísticos que gestiona el ayuntamiento, al mismo tiempo que le proporciona un significativo ahorro en el precio. Son ventajas que permiten promocionar la visita conjunta. La riqueza y variedad turística de Aracena otorgará al visitante la posibilidad, mediante esta tarjeta, de caminar por un conjunto natural subterráneo de formaciones kársticas de extraordinaria belleza, descubrir el origen fortificado de la villa y disfrutar del maravilloso paisaje de la sierra de Aracena, así como conocer de forma didáctica el proceso de crianza del cerdo ibérico, su desarrollo y la elaboración de los productos típicos de la zona. Desde su implantación, se han contabilizado la venta de 18.484 tarjetas en el segundo semestre de 2017, que suponen un 18 % del total de visitantes de la Gruta de las Maravillas durante el mismo periodo de tiempo (tabla 1). De forma comparativa observamos como en el museo del Jamón se ha incrementando las cifras, ya que de 5.328 visitantes durante el primer trimestre de 2017 se ha contabilizado 6.911 personas durante el mismo periodo en 2018, cuando ya estaba en marcha la Tarjeta Aracena Turística. Esto supone un incremento de 1.583 visitas, refrendado por el porcentaje del 81% de visitantes que acuden con la entrada combinada. Otro análisis comparativo son las cifras de 19.467 visitas en el Museo durante el segundo semestre de 2016, frente a las 23.021 visitas durante el mismo periodo temporal de 2017 (tabla 1). Ello, contribuye a las expectativas sobre su potencial ya que se refleja en un aumento de visitantes tanto en el Museo del Jamón como en el castillo.



Figura 4. Audioguías / radioguías de Aracena (Huelva).

El cerro del castillo de Aracena posee unos elevados valores naturales e históricos que lo convierten en un lugar con potencialidades turísticas que las englobamos en el concepto de “montaña mágica”. No debemos olvidar que en el cerro se localizan dos productos turísticos de suma importancia para Aracena, al hay que sumar el Museo del Jamón donde se aúnan el paisaje de la dehesa y la cultura ancestral basada en la ganadería del cerdo ibérico. Al paisaje endokárstico que supone la Gruta de las Maravillas se le une el valor exokárstico, el paisajístico tanto urbano como natural y la importancia histórica del conjunto monumental. Con el objetivo de ofrecer un valor añadido se ha diseñado una red de senderos que recorren el cerro. Ello, no sólo permite

visitas	2015	2016	2017
Gruta	148.354	165.841	172.514
Castillo	15.862	27.594	36.162
Museo Jamón	27.172	32.499	34.242

Tabla 1. Número de visitantes entre 2015 y 2017.

una fácil comunicación entre la Gruta de las Maravillas y el recinto fortificado, sino que el visitante dispondrá de otros recursos durante su visita. Estos caminos permiten subir de forma cómoda hasta la cumbre, para disfrutar del patrimonio histórico y de las vistas de Aracena y el paisaje serrano. Los senderos discurren a través de las laderas del cerro del castillo donde podrá observar rasgos geológicos del terreno, pasear por un itinerario botánico o contemplar el paisaje. Su trazado circular le permite subir por uno de los caminos y descender por otro de los senderos para que pueda disfrutar de esta "montaña mágica". La adecuación se ha basado en la limpieza de la vegetación y la eliminación de especies exóticas (alianto), el arreglo de infraestructuras, la colocación de mobiliario urbano, de señales explicativas e hitos direccionales así como la instalación de un área recreativa.

Una especial relevancia adquiere el uso de los senderos como zona de interés geológico. El cerro del castillo constituye un enclave geológico muy interesante (figura 5), ya que alberga en su interior la Gruta de las Maravillas, pero su ubicación en el macizo de Aracena le otorga otros valores, ya que estamos en el límite entre las zonas de Ossa-Morena y Sudportuguesa. Por tanto, se podrá disfrutar del contexto geológico del monte, y en concreto, del paisaje exokárstico (figura 5). A través del recorrido se podrán conocer los distintos tipos de rocas que hay en el cerro: cuarcitas, gneises, granodioritas y mármoles pero también, de un paisaje muy característico donde están presentes esas rocas metamórficas de composición carbonática, que se originaron hace 500 millones de años. La disolución de estas rocas ha permitido el desarrollo de cavidades, como la Gruta de las Maravillas o la nueva cueva descubierta (Martín Rosales, 2016) pero en la superficie, el visitante podrá observar huellas de la disolución, así como apreciarán fracturas, diaclasas, pliegues y mineralizaciones de óxidos y sulfuros, como la pirita (figura 5). El discurrir del sendero por la zona de contacto entre los diferentes tipos de rocas, por los puntos donde se aprecian las características del paisaje exokárstico y en el área donde se realizaron labores mineras que dieron a conocer la Gruta de las Maravillas (Romero *et al.*, 2010) supone un valor añadido que puede convertirse en un recurso turístico al considerarse como una zona de interés geológico.

Conclusiones

Es necesario establecer una imagen de marca como destino turístico de Aracena mediante un modelo integrador, ante la importancia que adquiere en la actividad turística en la localidad y la región. Se pretende que la diferenciación implícita de Aracena a través del turismo subterráneo se traslade al destino Aracena, asociándola con otros productos turísticos de la localidad. Se trata de aportar un valor añadido, a través de sinergias que permitan, bajo el concepto de desarrollo sostenible, posicionarse en el sector turístico a nivel regional, nacional e internacional. Una imagen integradora del destino, como elemento de singularidad, dará lugar a una valoración positiva por parte de los visitantes. Y, este sin duda, es el enfoque que se pretende ofrecer a raíz de la experiencia generada en la gestión centenaria de la Gruta de las Maravillas. Su trayectoria ha permitido posicionar Aracena en el mercado turístico y el desarrollo de un importante sector terciario, pero es necesario, establecer nuevos factores de estímulo en un ámbito, tan cambiante como es el turístico.

La gestión de los atractivos turísticos de Aracena, parte del planteamiento expuesto y en base de una metodología con 3 premisas: investigación, conservación y puesta en valor. Esta labor



Figura 5. Paisaje exokárstico en el sendero del cerro del Castillo.

requiere de unas líneas estratégicas que se están materializando mediante una serie de acciones que permitan la consecución del objetivo de posicionar el destino Aracena.

Referencias

- Alcaide García, M.J. y Hacha Bernal, L. 2010. "La Gruta de las Maravillas: reclamo y base para la diversificación turística de Aracena". *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*. J. J. Durán y F. Carrasco (Eds.). 26-278.
- Martín Rosales, W. 2016. "Nueva gruta en Aracena. Aportaciones al conocimiento y conservación del patrimonio geológico subterráneo de Aracena (Huelva)". *XXXI Jornadas del Patrimonio de la Comarca de la Sierra. Aracena (Huelva)*. Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía. 68-79.
- Martín Rosales, W., López Chicano, M., Rodríguez, C.M. y Pulido Bosch, A. 1995. "Morfología, espeleotemas y climatología de la Gruta de las Maravillas, Aracena (Huelva)". *Espeleotemas*, 5.1-12.
- Martín Rosales, W., Cerón, J.C., López Chicano, M. y Fernández, I. 2003. "Aspectos ambientales e hidrogeológicos de la Gruta de las Maravillas (Huelva, España)". *Boletín Geológico y Minero*, 114. 247-259.
- Martín Rosales, W., López Chicano, M., Rodríguez, C.M. y Cerón, J. C. 2007. "Efectos de las medidas de protección ambiental en la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva)". *Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible*. J.J. Durán, P. A. Robledo y J. Vázquez (Eds.). 169-180.
- Martín Rosales, W., López Chicano, M., Romero Bomba, E., Durán Hidalgo, M. y Vadillo Pérez, I. 2012. "Implantación de un perímetro de protección para la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva, España)". *Cuevas turísticas como activos económicos: conservación e innovación*. J.J. Durán y P. A. Robledo (Eds.). 129-139.
- Martín Rosales, W., Romero Bomba, E., López Chicano, M., Durán-Hidalgo, M. y Guerra González, M.

2012. "Efectos de la gestión ambiental sobre la distribución temporal de los visitantes de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva, España)". *Cuevas turísticas como activos económicos: conservación e innovación*. J. J. Durán y P. A. Robledo (Eds.). 141-154.

Romero Bomba, E., Portero Moreno, J.R., Romero de la Osa Fernández, O., Rodríguez García, M. y Orquín Sánchez, J. 2010. "La Gruta de las Maravillas, una mirada hacia su historia". *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*. J.J. Durán y F. Carrasco (Eds.). 9-20.

Romero Bomba, E., Jiménez Aguilar, I., Rivera Jiménez, T. y Romero de la Osa Fernández, O. 2016. "Castillo de Aracena: pasado, presente y futuro". *XXXI Jornadas del Patrimonio de la Comarca de la Sierra. Aracena (Huelva)*. Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía. 105-113.

H. Rodrigues de Araujo, et al., 2018. Gestão ambiental de grutas turísticas: caracterização de casos no Brasil, Portugal e Espanha. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 315-326.

Gestão ambiental de grutas turísticas: caracterização de casos no Brasil, Portugal e Espanha

H. Rodrigues de Araujo⁽¹⁾ y H.A. Santos Lobo⁽²⁾

(1) Instituto de Geografia e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa. Avenida Prof. Gama Pinto. 1649-003 Lisboa. hugo.araujo@campus.ul.pt

(2) Departamento de Geografia, Turismo e Humanidades. Universidade Federal de São Carlos – Campus Sorocaba. Rodovia João Leme dos Santos (SP-264), Km 110. 18052-780 Sorocaba/SP. heroslobo@ufscar.br

RESUMO

A discussão sobre os aspectos específicos que envolvem a gestão de uma gruta turística – em suas diversas abordagens - é um tema ainda pouco desenvolvido. Diante da lacuna levantada, está em curso uma pesquisa com o objetivo de caracterizar e contrastar os diferentes tipos de gestão de grutas turísticas no universo ibero-americano. No total foram selecionadas 12 grutas turísticas para investigação, estando 5 localizadas no Brasil, 5 em Portugal e 2 na Espanha. A coleta de dados primários ocorreu por meio de entrevistas realizadas com os responsáveis pela gestão de cada gruta turística. O presente trabalho apresenta parte dos resultados obtidos, com enfoque nos aspectos básicos da gestão ambiental das grutas no que tange à infraestrutura e dinâmica de visitação. As principais semelhanças identificadas foram: o período em que as grutas turísticas foram abertas ao público; os procedimentos de visitação; e a preocupação com a contenção dos impactos ambientais negativos. Por outro lado, as principais diferenças encontradas foram em relação as infraestruturas físicas instaladas e o número anual de visitantes. Tais informações poderão contribuir para preencher uma lacuna do conhecimento existente sobre grutas turísticas e, ao mesmo tempo, servem de referência para elaboração de futuros estudos sobre o tema, tanto em regiões ibero-americanas quanto em outros países.

Palavras-chave: cavernas turísticas, espeleologia recreativa, espeleoturismo.

Environmental management in show caves: characterization of cases in Brazil, Portugal and Spain

ABSTRACT

The discussion about the specific aspects that involve the management of a show cave - in its various aspects - is a little developed subject. Facing this gap, a research is underway to characterize and contrast the different types of management of show caves in Ibero-American countries. 12 tourist caves were selected for research, 5 of which were located in Brazil, 5 in Portugal and 2 in Spain. The primary data collection was carried out through interviews with those responsible for the management of each cave. The present work presents some of the results obtained, with focus on the basic aspects of the environmental management of the caves in relation to the infrastructure and dynamics of visitation. The main similarities identified were: the period when the tourist caves were opened to the public; visitation procedures; and the concern with containment of negative environmental impacts. On the other hand, the main differences found were in relation to the visitation infrastructure and the annual number of visitors. These informations may contribute to fill a gap in existing knowledge about show caves, as also they can serve as a reference for the preparation of future studies both in Iberoamerican regions and in other countries.

Keywords: recreational speleology, show caves, speleotourism.

Introdução

Vários tipos de cavidades ocorrem sob a superfície da Terra, tanto naturais quanto artificiais. O homem primitivo utilizava as grutas como abrigo, moradia, local de sepultamento e rituais religiosos (Gillieson, 1996). Em tempos mais recentes as visitas realizadas pelo homem as grutas tiveram maior interesse econômico, científico, desportivo, religioso e, sobretudo, contemplativo (Gillieson, 1996; Lobo, 2015). A beleza dos espeleotemas e as sensações inusitadas proporcionadas quando se percorre as galerias e salas subterrâneas desperta o interesse das pessoas (Cigna e Burri, 2000).

O termo gruta turística é uma referência as cavidades subterrâneas que sofreram adaptações de modo a facilitar o acesso do público para que este possa apreciar as singularidades do mundo subterrâneo (ISCA, 2014). As grutas turísticas são gerenciadas por uma entidade responsável e, normalmente, são cobradas tarifas de visitação (Culver e White, 2005). Segundo Cigna e Forti (2013), atualmente, existem milhares de grutas turísticas no mundo e mais de 500 recebem aproximadamente 50.000 visitantes por ano, ou seja, mais de 250 milhões de visitantes pagam um ingresso para visitá-las.

Apesar da importância que as grutas turísticas adquiriram ao longo dos anos, ainda não há na literatura estudos consolidados que caracterizaram e avaliam diferentes casos de gestão. Segundo Hose (2008) o gerenciamento de grutas turísticas ainda é um processo mal compreendido que precisa ser melhor estudado para alcançar resultados sustentáveis, tanto socioambientais como econômicos. Considerando a fragilidade das grutas, a conservação ambiental deve ser observada com prioridade (Pulido-Bosch *et al.*, 1997; Calaforra *et al.*, 2003; IUCN, 2008; Cigna e Forti, 2013; ISCA, 2014). Diante disso, desenvolveu-se um estudo com o enfoque de analisar a gestão das grutas turísticas, considerando aspectos administrativos, mercadológicos e ambientais. Destes, o presente artigo apresenta as primeiras descrições sobre aspectos da gestão ambiental, com enfoque na infraestrutura e na dinâmica de visitação.

Procedimentos de pesquisa e caracterização do objeto pesquisado

Para a realização do estudo foram selecionadas 12 grutas turísticas em 3 países (5 localizadas em Portugal, 2 na Espanha e 5 no Brasil) (figura 1), permitindo contrastar exemplos de diferentes realidades socioeconômicas e de gestão ambiental e do turismo. Propositadamente, foram selecionadas para investigação 6 grutas turísticas gerenciadas por instituições públicas (Rei do Mato, Lapinha, Maquiné, PARNa Cavernas do Peruauçu [Brasil], Algar do Pena [Portugal] e Maravilhas [Espanha]) e 6 por organizações privadas (Salitre [Brasil], Moeda, Alvados, Santo António, Mira de Aire [Portugal] e Nerja [Espanha]). Este último grupo inclui empresas particulares, organizações não governamentais (ONG) e fundações.

Síntese dos resultados e discussões

A maioria das grutas turísticas investigadas neste estudo foi oficialmente aberta a visitação durante a segunda metade do século XX (figura 2), período que coincide com a expansão em massa

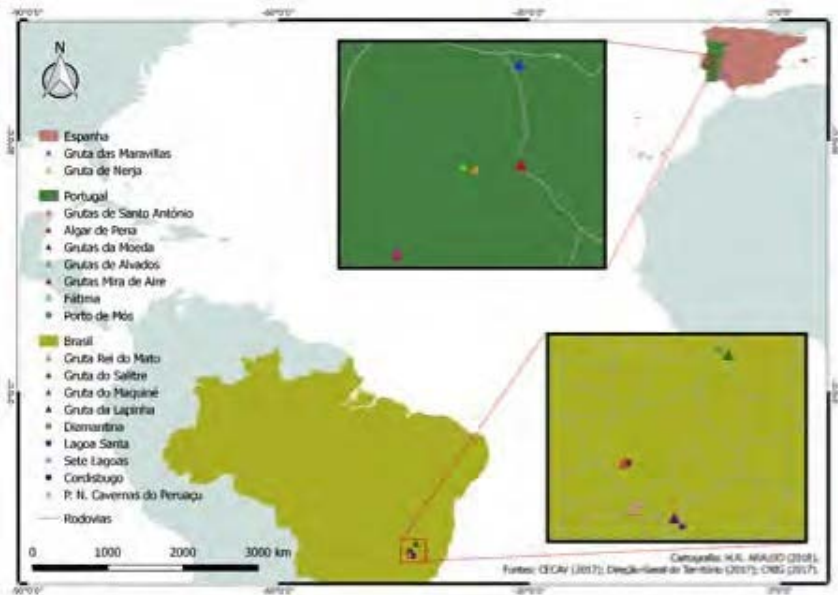


Figura 1. Grutas turísticas selecionadas para investigação em Portugal, Espanha e no Brasil.



Figura 2. Ano de abertura das grutas turísticas.

do turismo pelo mundo devido, sobretudo, o aperfeiçoamento dos meios de transportes, a evolução dos instrumentos de comunicação, a redução do horário de trabalho e o surgimento das férias pagas (Hunter, 2002).

Nos atrativos Salitre, PARNA Cavernas do Peruaçu e Algar do Pena, as visitas precisam ser previamente agendadas com as respectivas entidades gestoras. Nas demais grutas o visitante dirige-se a bilheteria, adquire o bilhete de entrada e aguarda a formação do próximo grupo. Durante o período de espera o visitante pode usufruir dos serviços complementares disponíveis (restaurante, museu etc.) e percorrer trilhas interpretativas.

Antes de entrar na gruta o guia responsável reúne o grupo, se apresenta e repassa informações gerais sobre as características da gruta e as regras de comportamento durante a visita. Na Gruta de Nerja e Grutas de Mira de Aire, o grupo é conduzido a uma sala onde é exibido um vídeo explicativo. Após esta abordagem inicial dá-se início a visita à parte subterrânea da gruta. Dentre as grutas turísticas investigadas, a Gruta da Lapinha e o Algar do Pena são as únicas que fornecem gratuitamente aos visitantes um capacete, para uso obrigatório durante toda a visita. O guia vai à frente do grupo, definindo o ritmo do passeio e os locais de paradas interpretativas. Ao final da visita, o guia agradece e indica a loja de souvenirs (quando existente), onde os visitantes podem adquirir recordações da gruta.

Conforme apontado na literatura (e.g. Sanchez-Moral *et al.*, 2014) e observado durante a pesquisa de campo, as primeiras grutas turísticas foram estruturadas para atrair o maior número possível de visitantes. As grutas sofreram adaptações para que as pessoas interessadas em conhecê-las pudessem entrar e percorrer as galerias e salões subterrâneos com facilidade. Na parte interna das grutas as intervenções mais usuais realizadas foram: abertura de túneis e novas entradas de conexão com a superfície, instalação de iluminação artificial, delimitação de percursos, construção de escadas, passarelas e, até mesmo, elevadores. Na área externa próxima a entrada das grutas, também foram construídas diversas infraestruturas com o intuito de oferecer maior comodidade para os visitantes e complementar a oferta de serviços, como: estacionamento, bilheteria, casa de banho, restaurante, auditório, parque infantil, sala de exposições, museu, loja de souvenirs, dentre outros (quadro 1).

Os materiais tradicionalmente utilizados na construção das infraestruturas internas das grutas turísticas foram rocha, madeira, ferro, betão, alvenaria e argamassa. A rocha é visualmente agradável e quando bem executada causa baixo impacto no ambiente. A madeira também apresenta um aspecto agradável, porém deteriora com facilidade e podem causar desequilíbrio ao ambiente pelo aporte de nutrientes que contribuem para proliferação de flora e fauna exótica. Além disso, quando a madeira é tratada com produtos químicos, pode contaminar o ambiente prejudicando a fauna. O ferro apresenta baixo custo, mas também pequena durabilidade com a possibilidade ainda de contaminação do ambiente pela liberação de óxidos. O betão possui longa durabilidade por conter basicamente carbonato de cálcio, mas pode gerar grande impacto visual. Além disso, o transporte deste material causa impacto no ambiente e sua remoção necessita de ferramentas pesadas que geram excesso de resíduos. A alvenaria e argamassa, assim como o betão, além do impacto visual provocam impactos a partir do transporte e modificam sedimentos do piso, causando também a impermeabilidade do solo da gruta (Silverio, 2014). Este perfil de alterações no ambiente subterrâneo apresentado no quadro 1 é menos usual na atualidade, o que pode

	Infraestruturas	G. Rei do Mato	G. Lapinha	G. Maquiné	P.N.C. Peruaçu	G. do Salitre	G. Santo António	G. Alvados	G. Mira de Aire	G. Moeda	Algar do Pena	G. Maravilhas	Gruta de Nerja
Internas	Escadas	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Passarelas suspensas	X	X		X		X		X		X	X	
	Corrimãos	X	X		X		X		X	X	X	X	X
	Iluminação artificial	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X
	Percurso pavimentados	X	X	X			X	X	X	X		X	X
	Elevador								X		X		
	Represamento de água artificial				X				X	X		X	
	Fontes de água iluminadas									X			
Externas	Centro de atendimento	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
	Casa de banho	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
	Loja de souvenirs	X*		X	X*		X	X	X	X		X	X
	Restaurante / cafeteria	X*	X	X	X*		X	X	X	X			X
	Museu		X	X						X		X	X
	Sala de exposições	X	X	X					X			X	X
	Auditório	X	X	X	X				X			X	X
	Estacionamento	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
	Meio de hospedagem								X				
	Parque aquático								X				

* Existe a estrutura, entretanto não está funcionando.

Quadro 1. *Infraestruturas internas e externas das grutas turísticas.*

ser explicado pelas mudanças nos padrões de planejamento e gestão do turismo pós-1992, com os ideários de sustentabilidade e turismo sustentável (e.g. IUCN, 2008).

Na atualidade, tem sido mais recomendado o uso de aço inoxidável, que apesar de ter um custo mais elevado tem a vantagem de ter uma durabilidade maior do que outros materiais e requer pouca manutenção (Cigna, 2011; Silverio, 2014). As infraestruturas internas das grutas turísticas abertas em tempos mais recentes, nomeadamente o Algar do Pena e o Parque Nacional Cavernas do Peruaçu, já foram construídas utilizando esse tipo de material. Também em algumas grutas turísticas mais antigas, como a Gruta Rei do Mato, Gruta da Lapinha, Grutas de Mira de Aire, Gruta das Maravilhas e Gruta de Nerja, as entidades gestoras aos poucos estão substituindo as infraestruturas construídas com materiais inadequados por outras construídas com aço inoxidável.

Com relação a iluminação artificial fixa das grutas turísticas, as lâmpadas incandescentes am-

plamente utilizadas no passado, vêm sendo substituídas por lâmpadas LED (*Light Emitting Diode*), ou outros tipos mais atuais que alegadamente causam menos danos ao ecossistema subterrâneo (Quadro 2). Contudo, o crescimento de organismos clorofilados, chamado de *lampenflora*, sobre espeleotemas, paredes, pisos e tetos das grutas não é causado pelo calor emitido pelas lâmpadas, mas pela luz e presença de umidade. Portanto, esse problema comum das grutas turísticas pode ser evitado apenas quando se utiliza lâmpadas com emissão de luz com comprimento entre 440 nm e 650 nm, que minimiza a absorção de luz por organismos clorofilados (Cigna, 2011). No caso das grutas turísticas investigadas, somente a entidade gestora do Algar do Pena alegou seguir esses padrões de iluminação. No PNCP, a entidade gestora optou por não instalar nenhum tipo de iluminação artificial nas grutas que estão autorizadas a visita na parte subterrânea. Dessa forma, além de evitar os possíveis danos provocados pela iluminação artificial fixa das grutas proporciona aos visitantes uma experiência mais semelhante à de um espeleólogo. Os guias são responsáveis por fornecer capacete e lanterna aos visitantes.

Para manter a quantidade mínima de iluminação na gruta, o sistema de iluminação deve ser dividido em seções, a fim de reduzir a quantidade de lâmpadas acesas simultaneamente (Cigna e Burri, 2000). Essa medida é adotada por todas as grutas turísticas investigadas, entretanto o fluxo de visitantes às vezes é tão intenso que a iluminação da gruta é mantida acesa praticamente durante todo o período em que encontra-se aberta à visita.

No tocante ao fluxo de visitantes verificou-se uma variação entre unidades e centenas de milhares de visitantes anuais em média. Há uma diferença bastante acentuada entre a gruta turística mais visitada – Nerja, com 470 mil visitantes/ano – e a menos visitada – Salitre, com 2.500 visitantes/ano. Além disso, observou-se que as primeiras grutas turísticas abertas a visita são as que, ainda hoje, recebem maior fluxo anual de visitantes.

Com base nas experiências compartilhadas pelos gestores durante as entrevistas e as observações de campo, vários fatores podem ser apontados para tentar justificar essa desigualdade em rela-

Tipos de lâmpadas	G. Rei do Mato	G. Lapinha	G. Maquiné	P.N.C. Peruauçu	G. do Salitre	G. Santo António	G. Alvados	G. Mira de Aire	G. Moeda	Algar do Pena	G. Maravilhas	Gruta de Nerja
Incandescente						X	X	X				
LED	X	X	X					X	X		X	
Halogéneo									X			X
Fluorescentes												X
Vapor de sódio										X		
Inexistente				X	X							

Quadro 2. Tipos de lâmpadas utilizadas para iluminação das grutas turísticas.

ção ao fluxo de visitantes. As grutas com maior visitação anual, especialmente aquelas gerenciadas por entidades privadas (Nerja, Moeda e Mira de Aire), foram transformadas em verdadeiros complexos de lazer, capaz de atender grandes fluxos turísticos o ano inteiro. De acordo com os gestores, os fatores mais importantes para a manutenção dos fluxos de visitação são: a beleza natural das grutas, as infraestruturas instaladas, a qualidade e diversificação dos serviç os oferecidos, as campanhas promocionais, as parcerias firmadas com outras entidades e, principalmente, a facilidade de acesso.

A capacidade de carga das grutas turísticas é um fator que também influencia diretamente o seu fluxo de visitação. Afinal, as grutas reúnem características que as diferenciam de outros ambientes naturais (Gillieson, 1996). Por isso, embora possa existir uma alta demanda interessada em conhecer determinada gruta, o acesso pode ser permitido a um número restrito de visitantes durante um intervalo de tempo previamente definido.

Contudo, este pressuposto não parece influenciar significativamente o fluxo de visitantes das grutas turísticas investigadas, pois com exceção do Algar do Pena e do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu, o tamanho máximo dos grupos de visitantes permitido varia de 20 até 55 pessoas e o tempo de intervalo entre um grupo e outro é, em média, de 15 minutos. Além disso, a maioria das grutas turísticas está aberta   visitação todos os dias da semana, sobretudo, nos períodos que ocorre a maior demanda de visitantes. O tempo de duração da visita varia de 30 a 50 minutos, podendo chegar até 1 hora dependendo da gruta. No caso do PNCP o tempo de duração   maior, pois envolve uma longa caminhada para chegar até o início da gruta e depois percorrer todo o percurso de visitação (quadro 3).

Dependendo da gruta turística o formato do percurso de visitação é: linear, ou seja, o caminho de volta   igual ao de ida; em circuito aberto, quando tem o início e fim em diferentes aberturas da gruta; ou em circuito fechado, quando o caminho de volta   diferente ao de ida, mas a entrada e saída da gruta são as mesmas (quadro 3). Para Andrade (2003), o percurso linear apresenta desvantagens em relação aos demais, pois causa congestionamentos quando dois grupos de visitantes se cruzam.

Independentemente do número de visitantes, em todas as grutas turísticas os grupos são acompanhados por apenas um guia. Por consequência disso, durante a pesquisa de campo verificou-se por diversas vezes a dificuldade dos guias em controlar ao mesmo tempo o comportamento e o barulho provocado pelos visitantes dentro das grutas, bem como, repassar as informações de forma igual para todos.

De acordo com Lobo (2015), situações como esta comprometem a qualidade do serviç o prestado e deixam a gruta ainda mais sujeita a sofrer danos. Os gestores dos atrativos Salitre, Rei do Mato, Lapinha, Maravilhas, Santo Ant nio, Alvados e Algar do Pena concordam com a opinião deste autor e consideram que o ideal seria que, pelo menos, dois guias acompanhassem cada grupo. Entretanto, a entidade gestora não dispõe de contingente operacional suficiente, devido principalmente as restrições orçamentárias. Por outro lado, os demais gestores acreditam que apenas um guia é o suficiente para garantir a qualidade da visita e os impactos provocados pelos visitantes ocorreriam na mesma proporção, mesmo se dois ou mais guias acompanhassem o mesmo grupo.

Gruta turística	Abertura ao público	Tamanho máximo dos grupos	Intervalo entre grupos	Duração do roteiro	Formato do percurso
Gruta Rei do Mato	2ª-Dom.	20	15 a 30 min.	45min a 1h	Linear
Gruta da Lapinha	3ª-Dom.	20	20 min.	50min	Circuito aberto
Gruta do Maquiné	2ª-Dom.	25	60 min.	50min	Linear
P. N. Cavernas do Peruaçu ¹	2ª-Dom., mediante agendamento	8	10 min.	5h30 min	Linear
Gruta do Salitre	2ª-Dom., mediante agendamento	30	5min	45min	Linear
Grutas de Santo Antônio	2ª-Dom. Inverno: 3ª-Dom.	40	15 a 20 min.	30min	Linear
Grutas de Alvados	2ª-Dom. Inverno: 3ª-Dom.	40	15 a 20 min.	30min	Circuito aberto
Grutas de Mira de Aire	2ª-Dom.	55	15 min.	1h	Circuito aberto
Grutas da Moeda	2ª-Dom.	20	10 min.	30min	Circuito aberto
Algar do Pena	2ª-Dom., mediante agendamento	12	15 min.	20min	Linear
Gruta das Maravilhas	2ª-Dom.	40	15 min.	50min	Circuito aberto
Cueva de Nerva	2ª-Dom. Inverno: 3ª-Dom.	50	15 min.	50min	Circuito fechado

Quadro 3. Dias de abertura das grutas turísticas, tamanho máximo dos grupos de visitantes e o tempo de intervalo obrigatório entre os grupos.

Em quase todas as grutas turísticas investigadas as entidades gestoras oferecem algum tipo de visita especial como forma de diversificação da oferta de serviços. Essas visitas especiais, geralmente, são destinadas a grupos menores de visitantes. Em alguns casos, a visita especial tem por objetivo visitar uma parte restrita das grutas, que não é acessada durante as visitas tradicionais. Em outros casos, a visita especial é realizada sem as grutas estarem iluminadas artificialmente, com o intuito de proporcionar aos visitantes a experiência de adentrar uma gruta utilizando somente lanternas. E há as visitas especiais de caráter pedagógico, destinadas a grupos de escola. Nesse caso, a visita é adequada de acordo com o nível escolar que os alunos se encontram e os interesses dos professores. Em algumas grutas turísticas, também, são oferecidos roteiros de caminhada na parte externa da gruta como forma de complementar as opções de entretenimento (quadro 4).

Dentre as grutas investigadas, Algar do Pena, a Rei do Mato, Maquiné, Lapinha, Salitre, PNCP, Nerja e Maravilhas são as únicas onde foram realizados estudos com o intuito de avaliar os im-

¹ O Parque oferece 6 roteiros de visitação, sendo eles: Lapa do Boquete; Lapa do Índio e Lapa Bonita; Gruta do Janelão; Lapa dos Desenhos; Lapa do Caboclo e Lapa do Carlúcio; Lapa do Rezar. Neste estudo considerou-se somente os dados referentes ao roteiro mais visitado, a Gruta do Janelão.

Visitas especiais	G. Rei do Mato	G. Lapinha	G. Maquiné	P.N.C. Peruaçu	G. Salitre	G. S. António	G. Alvaídos	G. Mira de Aire	G. Moeda	Algar do Pena	G. Maravilhas	Gruta de Nerja
Visita a partes restritas da(s) gruta(s)		X		X						X	X	X
Visita sem uso da iluminação artificial fixa								X	X			X
Visitas lúdico/pedagógicas					X	X	X		X			X
Percursos de caminhada fora da gruta(s)		X		X	X			X	X			X
Inexistente.	X		X									

Quadro 4. Formas de diversificação da oferta de entretenimento nas grutas turísticas.

pactos ambientais provocados pela visitação e, com base nos resultados, adotar medidas buscando adequar a exploração turística da gruta de forma mais sustentável.

Atualmente, 5 das 12 grutas turísticas investigadas (Rei do Mato, Lapinha, Moeda, Algar do Pena, Maravilhas e Nerja) realizam de forma contínua alguma espécie de monitoramento ambiental dos impactos provocados pela visitação, principalmente, através da instalação de equipamentos que fazem a medição da alteração do microclima das grutas (umidade, temperatura e concentração de gás carbônico). Já nas demais grutas turísticas os gestores afirmaram que os impactos são monitorados apenas visualmente.

Considerações finais

A partir dos dados apresentados observou-se que as principais semelhanças com relação as 12 grutas turísticas investigadas referem-se as infraestruturas internas e externas instaladas, os materiais utilizados para construção, tempo de duração das visitas e, sobretudo, o formato das visitas.

Por outro lado, observou-se que as diferenças são mais acentuadas entre as grutas que são geridas por organizações privadas e as que são geridas por instituições públicas. Nas instituições públicas prevalece o caráter socioambiental e, por isso, são impostas restrições comerciais que as impedem de atuarem no mercado com o mesmo foco das organizações privadas. Do ponto de vista dos benefícios que isso possa ser gerado para as grutas e para a sociedade em geral ainda permanecem dúvidas, se é melhor ou pior uma forma de gestão em relação a outra. Portanto, uma análise mais aprofundada precisa ser feita para tentar responder este questionamento.

A preocupação com a contenção dos impactos ambientais parece que aos poucos está fazendo parte da agenda de trabalho das entidades gestoras, mas no geral ainda não se tornou uma prioridade. As grutas turísticas oficialmente abertas em tempos recentes (Algar do Pena e PNCP)

demonstram estarem mais bem preparadas para receber a visitação em bases mais sustentáveis. Nas demais grutas turísticas certas medidas vêm sendo tomadas pelas entidades gestoras no sentido de minimizar os impactos, porém muitos dos danos causados ao longo dos anos são acumulativos e irreparáveis.

Por fim, considera-se que os resultados obtidos através deste estudo são importantes subsídios para começar a compreender as diferentes realidades e desafios que envolvem a gestão de uma gruta turística. Por outro lado, tem-se a clareza que este estudo por si só não preenche esta lacuna do conhecimento existente, mas serve de referência para elaboração de futuros estudos relacionados a gestão de grutas turísticas com a esperança de contribuir para o desenvolvimento sustentável deste setor.

Referências

- Andrade, W.J. 2003. Implantação e manejo de trilhas. In: Mitraud, S. (org.). *Manual de ecoturismo de base comunitária: ferramentas para um planejamento responsável*. WWF.
- Barbosa, Y.M. 2002. *História das viagens e do turismo*. Aleph.
- Calaforra, J.M., Fernández-Cortés, A., Sánchez-Martos, F., Gisbert, J., Pulido-Bosch, A. 2003. Environmental control for determining human impact and permanent visitor capacity in a potential show cave before tourist use. *Environmental Conservation*, 30(2), 160-167.
- CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. 2017. Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html> . Acesso em 20 de abril de 2018.
- CNIG - Centro Nacional de Información Geográfica. 2017. Información Geográfica de Referencia. Disponível em: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/equipamiento.do?method=mostrarEquipamiento> (Acesso em 20 de abril de 2018).
- Cigna, A.A. 2011. Show cave development with special references to active caves. *Tourism and Karst Areas*, 4(1), 7-16.
- Cigna, A.A. e Burri, E. 2000. Development, management and economy of show caves. *International Journal of Speleology*, 29(1), 1.
- Cigna, A.A. e Forti, P. 2013. Caves: the most important geotouristic feature in the world. *Tourism and Karst areas*, 6(1), 9-26.
- Direção-Geral do Território 2017. Carta Administrativa Oficial de Portugal - CAOP. Disponível em: http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/carta_administrativa_oficial_de_portugal__caop_/caop__download_/ (Acesso em 20 de abril de 2018).
- Culver, D.C., y White, W.B. (Eds.). (2005). *Encyclopedia of caves* (pp. 427-430). Amsterdam (The Netherlands): Elsevier.
- Gillieson, D. 1996. Caves: Processes. *Development, Management*. Blackwell Basil. 324.
- Hose, T.A. 2008. Towards a history of geotourism: definitions, antecedents and the future. *Geological Society, London, Special Publications*, 300(1), 37-60.
- Hunter, C. 2002. Sustainable tourism and the touristic ecological footprint. *Environment, development and sustainability*, 4(1), 7-20.
- ISCA - International Show Caves Association. 2014. *Recommended international guidelines for the development and management of show caves*.
- IUCN - International Union for Conservation of Nature. 2008. WWF, 1980. *World conservation strategy: Living resource conservation for sustainable development*.
- 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.
- Pulido-Bosch, A., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rodríguez-Navarro, C. M. e Vallejos, A. 1997. Human impact in a tourist karstic cave (Aracena, Spain). *Environmental Geology*, 31(3-4), 142-149.

- Sanchez-Moral, S., Cuezva, S., Garcia-Anton, E., Fernandez-Cortes, A., Elez, J., Benavente, D. e Saiz-Jimenez, C. 2014. Microclimatic monitoring in Altamira Cave: Two decades of scientific projects for its conservation. *The Conservation of Subterranean Cultural Heritage*; Saiz-Jimenez, C., Ed, 139-144.
- Silverio, M.O. 2014. *Atuação da arquitetura no uso público de cavernas. Conceitos, métodos e estratégias para ocupação. Caverna do Diabo, SP* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

H.A. Santos Lobo, et al., 2018. Contribuições da percepção de lotação para a capacidade de carga social em cavernas turísticas brasileiras: primeiros resultados. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 327-334.

Contribuições da percepção de lotação para a capacidade de carga social em cavernas turísticas brasileiras: primeiros resultados

H.A. Santos Lobo⁽¹⁾, G.E. de Oliveira Santos^(1, 2), L.E. Panisset Travassos^(1, 3), J.V. Ibanes Alves⁽¹⁾,
R. Fontes Masutti⁽¹⁾ y M. Menezes Giusti⁽¹⁾

(1) Grupo de pesquisas DemandaTur – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Brasil.

(2) Universidade de São Paulo (USP), Brasil.

(3) Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG), Brasil. heroslobo@ufscar.br

RESUMO

Cavernas são recursos naturais diferenciados em função de suas características espaciais e ambientais. Por suas diferenças e pelo imaginário que geram na sociedade, são importantes atrativos turísticos, principalmente para segmentos como espeleoturismo, ecoturismo e geoturismo. Além do impacto no ambiente que o uso turístico pode causar em cavernas, o confinamento espacial também pode alterar a percepção do visitante, sobretudo em sua noção de lotação do espaço. Neste contexto, foi realizada uma pesquisa entre 2015 e 2018 em 7 cavernas turísticas brasileiras: Santana, Morro Preto, Couto, Água Suja, Cafezal (Estado de São Paulo), Lago Azul (Mato Grosso do Sul) e Lapinha (Minas Gerais). O objetivo foi verificar se as condições de visitação destas cavernas interferem na percepção de lotação dos visitantes e, por consequência, em sua capacidade de carga social. Um questionário foi utilizado para obtenção de informações com os visitantes após o término dos roteiros de visitação. Ao todo, 645 visitantes foram entrevistados. Os resultados obtidos apontam que os visitantes estão satisfeitos com as condições de visitação (grupos pequenos, entre 8 e 30 pessoas/grupo), com o tempo de visitação (entre 1 e 2 horas) e com a qualidade do serviço dos guias. Conclui-se que quando os roteiros em cavernas são desenvolvidos nos padrões de ecoturismo e turismo sustentável de pequena escala, a percepção de lotação não se evidencia. Com isso, entende-se que a capacidade de carga social é adequada nos padrões de visitação atualmente propostos para os roteiros analisados.

Palavras chave: Capacidade de Suporte Social, cavernas turísticas, percepção ambiental.

Contributions of crowd perception to social carrying capacity in brazilian show caves: first results

ABSTRACT

Caves are singular natural resources, according to their spatial and environmental characteristics. Because of their differences and the imaginary they generate in tourists, they are important tourist attractions, especially for segments such as speleotourism, ecotourism and geotourism. Besides the impact on the environment that the tourist use can cause in caves, the spatial confinement can also alter the perception of the visitor, mainly in its notion of crowd perception. In this context, a research was carried out between 2015 and 2018 in 7 Brazilian show caves: Santana, Morro Preto, Couto, Água Suja, Cafezal (State of São Paulo), Lago Azul (Mato Grosso do Sul) and Lapinha (Minas Gerais). The objective was to verify if the conditions of visitation of these caves interfere in the crowd perception of the visitors and, consequently, in their social carrying capacity. A questionnaire was used to obtain information from visitors after the end of visitation tour. 645 visitors were interviewed. The results show that visitors are satisfied with the conditions of visitation (small groups, between 8 and 30 people/group), visitation time (between 1 and 2 hours) and the quality of service of the

guides. It is concluded that when cave tours are developed in ecotourism and sustainable tourism in small-scale standards, the crowd perception is not evident. With this, it is understood that the social carrying capacity is adequate in the visiting patterns currently proposed for the show caves analyzed.

Keywords: *environmental perception, social carrying capacity, show caves.*

Introdução

As cavernas são recursos naturais diferenciados para o uso turístico, em função de suas características físicas e ambientais (Cigna e Burri, 2000). São também consideradas os principais recursos naturais para o desenvolvimento de determinados segmentos do turismo, como o geoturismo em regiões de carste (Cigna e Forti, 2013), o espeleoturismo (Lobo *et al.*, 2010) e mesmo o ecoturismo. No entanto, tratam-se de ambientes relativamente mais frágeis. O confinamento espacial e a limitação relativa de fluxo de energia e matéria fazem com que os impactos da visitação humana sejam mantidos em escalas maiores de tempo (Calaforra *et al.*, 2003), podendo gerar até mesmo danos ambientais em situações extremas (Fernández-Cortés *et al.*, 2006). Desta forma, seu uso para fins turísticos requer planejamento de detalhe, com a necessidade de estratégias de controle com enfoques: a) espacial – pela delimitação do caminhamento de visitação (Boggiani *et al.*, 2007), o zoneamento ambiental (Lobo, 2009) e a percepção de lotação dos visitantes (Doorne, 2000); b) temporal – por meio do intervalo entre grupos de visitantes (Boggiani *et al.*, 2007) e do tempo máximo de permanência em determinados pontos para interpretação ambiental ou descanso (Lobo, 2015, e y c) comportamental – considerando as formas adequadas de visitação, tanto para melhor aproveitamento das oportunidades interpretativas do meio (Borges e Travassos, 2013) quanto para não comprometer a segurança dos visitantes e dos lugares visitados.

Estes aspectos mínimos de planejamento e gestão de roteiros e atrativos espeleoturísticos convergem para os métodos modernos de capacidade de carga turística, cujo foco tem deixado de ser apenas em controles numéricos (McCool e Lime, 2001) e passado a ser baseado na dinâmica do ambiente e dos visitantes, incluindo padrões sazonais (Lobo, 2015).

Dentre os indicadores passíveis de utilização na capacidade de carga, destacam-se os sociais. O estudo da capacidade de carga social consiste em compreender a relação entre número de pessoas x satisfação ou número de encontros com outros grupos/indivíduos x satisfação geral (Stankey e McCool 1984; Graefe *et al.*, 1984; Cole, 2001). Um conceito relacionado a capacidade de carga social é o de percepção de lotação. Para Cole (2001), percepção de lotação é uma avaliação pessoal negativa sobre a interação com outras pessoas. Mais encontros com outras pessoas podem resultar no declínio da qualidade e satisfação do turista com a experiência de visitação (Manning e Halo, 2010). Isto porque, em roteiros com perfil mais ecoturístico, existe a expectativa geral de diminuição no adensamento da visitação (Cole, 2001; McCool e Lime, 2001; Oliveira, 2003 Cigna, 2011). Para determinar a capacidade de carga social e psicológica são necessárias algumas considerações como: o nível cultural do visitante, suas características sociais, suas motivações conscientes ou inconscientes, o número de pessoas que participam na visita etc. São fatores que vão além das condições físicas do local que avalia as apreciações dos visitantes (Oliveira, 2003).

Neste contexto, foi realizada uma pesquisa com o objetivo de verificar se as condições de visitação em cavernas turísticas brasileiras interferem na percepção de lota o dos visitantes e, por consequência, em sua capacidade de carga social.

Caracteriza o das áreas de pesquisa

A pesquisa foi realizada entre os anos de 2015 e 2018, sendo dividida em 3 fases e aplicada em 7 cavernas turísticas brasileiras. Na primeira fase, entre 2015 e 2016, foram pesquisadas as cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), no Estado de São Paulo. Trata-se de uma área natural protegida que compõe um Patrim nio Natural da Humanidade, as Reservas da Mata Atlântica do Sudeste (UNESCO, 1999) em função de sua riqueza em biodiversidade e pelos sistemas de cavernas que protege. Nesta região, 12 cavernas são abertas   visita o, das quais 5 foram incluídas na pesquisa: Santana (figura 1 a), Morro Preto (figura 1 b), Couto (figura 1 c),  gua Suja (figura 1 d) e Cafezal.

A visita o turística das cavernas do PETAR tem um aspecto mais próximo à aventura. São cavernas com poucas intervenções em seu interior e sem ilumina o fixa. A visita o é feita com o uso de capacetes com *head lamps* e conduzida por um guia, em grupos de aproximadamente 8 visitantes em cada caverna. Os intervalos para os grupos entrarem nas cavernas variam entre 15 e 30 min. Nenhuma das cavernas pesquisadas oferece circuito circular completo. Em alguns trechos, os grupos de visitantes se encontram durante a visita o. Os volumes de visita o nestas cavernas variam entre 15 e 50 mil turistas/ano.

A segunda fase da pesquisa foi desenvolvida entre 2016 e 2017, na gruta do Lago Azul (figura 1 f). Esta, por sua vez, localiza-se em uma área natural protegida de categoria Monumento Natural, no município de Bonito, Estado de Mato Grosso do Sul. A visita o é feita com guia, em grupos de até 20 turistas. Não há ilumina o fixa no interior da caverna, considerando que se trata de um grande abrigo no qual a luz natural adentra e permite a ilumina o de todo o trajeto de visita o. O uso de capacete   obrigatório. Os intervalos entre grupos variam entre 20-30 minutos. O circuito não é circular, levando a encontro entre os grupos no trajeto.   uma das cavernas turísticas mais visitadas no Brasil, com um total de aproximadamente 65 mil turistas/ano. A terceira fase da pesquisa foi realizada entre 2017 e 2018 na gruta da Lapinha (figura 1 d), no Parque Estadual do Sumidouro, Estado de Minas Gerais. A caverna possui ilumina o fixa de LEDs em seu interior, sendo obrigatório o uso de capacete na visita o. O circuito é circular e o intervalo entre grupos é de aproximadamente de 20 minutos. Os grupos de visitantes são formados por 20-30 turistas, acompanhados por um guia.

Procedimentos de pesquisa

A pesquisa foi realizada durante 36 meses. Foram feitos levantamentos prévios de dados secundários que embasaram a formula o dos questionários da pesquisa social e a defini o do padrão de monitoramento climático experimental – cujos dados não são expostos no presente artigo –, executado nas cavernas Morro Preto, Couto e Lago Azul. Para a pesquisa de percepção de lota o, foram aplicados questionários em tablets, facilitando as respostas e melhorando a interface



Figura 1. Algumas cavernas pesquisadas: a) Santana; b) Morro Preto; c) Couto; d) Água Suja; e) Lapinha; e f) Lago Azul. Fotos a, b, c, d – Ricardo Martinelli; e, f – Heros Lobo.

entre as equipes de campo e as pessoas entrevistadas. As perguntas focavam na caracterização do perfil dos entrevistados, seus hábitos de consumo e viagem, sua frequência em viagem para cavernas e aspectos relativos à qualidade do passeio, incluindo aqueles que incidem sobre a percepção de lotação dentro das cavernas. Ao todo, foram coletados 645 questionários válidos. Os dados das duas primeiras fases da pesquisa já foram tabulados e até o presente momento foram feitas apenas as análises estatísticas descritivas, com generalizações sobre os resultados obtidos.

Os dados da terceira fase, bem como análises explicativas mais profundas, serão objeto da continuidade das pesquisas.

Síntese dos resultados preliminares

Do perfil dos visitantes, destaca-se a experiência prévia em visitar cavernas. Este dado é importante, pois o hábito de visitar um ambiente confinado pode tornar o visitante mais acostumado com suas características, interferindo em sua percepção de lotação (figura 2).

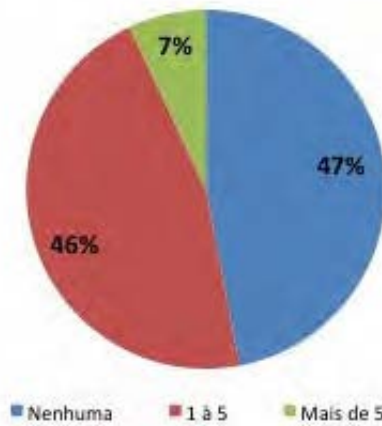


Figura 2. Experiência anterior de visita a cavernas das pessoas entrevistadas.

Quase metade da amostra (47%) estava visitando uma caverna pela primeira vez na vida, o que evidencia se tratar de um segmento turístico ainda em expansão no Brasil. Os 53% restantes já tinha visitado cavernas com alguma frequência, sendo pequena (7%) a parcela de visitantes que vai à roteiros de cavernas com maior frequência.

Para entender se estes visitantes estão satisfeitos com a sensação de isolamento gerada pelos roteiros turísticos, foi perguntado sobre sua satisfação em relação ao tamanho dos grupos. Mesmo em situações distintas de visitação, observa-se que as práticas de dimensionamento dos grupos não interferem negativamente na visitação (figura 3).

Como demonstrado na figura 3, a grande maioria julgou o tamanho dos grupos de visitação com sendo adequado. Mesmo nos casos mais extremos, como a gruta do Lago Azul, onde o tamanho dos grupos é maior (até 30 visitantes), a classificação pela adequação chegou à 89% dos entrevistados. Atribui-se este percentual acima da média ao volume interno maior desta caverna. Outro dado que poderia interferir nesta percepção é a quantidade anterior de visitas em cavernas. Mas no caso da Lago Azul, o percentual de visitantes de primeira viagem em cavernas



Figura 3. Percepção dos visitantes em relação ao tamanho dos grupos.

não destoou significativamente do restante da pesquisa (40%, contra os 47% da média apresentada na figura 2).

O tempo de permanência dentro da gruta também pode ser um fator que interfere na percepção do visitante, em função de exacerbar as condições psicológicas ligadas ao confinamento espacial e ausência de luz solar. No entanto, os entrevistados demonstraram estar satisfeitos com o tempo de duração dos roteiros espeleoturísticos (figura 4).

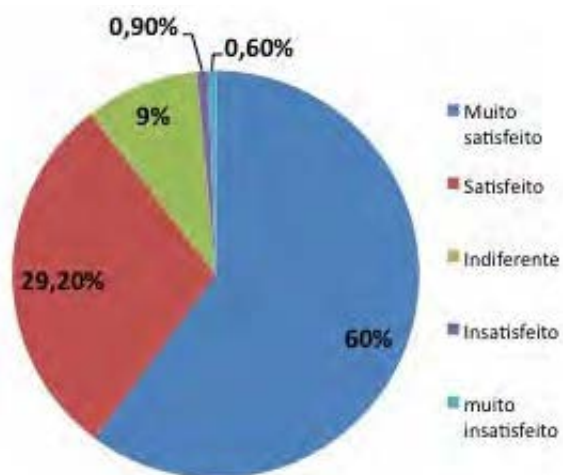


Figura 4. Percepção dos visitantes em relação ao tempo de duração dos roteiros.

Em média, os roteiros visitados duram entre 60 e 120 minutos, variando conforme a caverna e as condições de visitação (perfil do grupo, dias mais ou menos lotados, perguntas feitas pelos visitantes etc.). Conforme ilustrado na figura 4, a maioria dos visitantes (89,2%) saiu “satisfeita” ou “muito satisfeita” dos roteiros visitados.

Por fim, também foram avaliados pelos turistas os serviços de hospedagem, alimentação (no receptivo quando existente ou fora deste), receptivo de visitantes e os guias de turismo. Destes, os guias obtiveram os graus mais elevados de satisfação, com 82% de avaliações entre muito bom e bom, sendo atribuída a nota máxima por 60% dos entrevistados.

Considerações finais

Os dados levantados pela presente pesquisa evidenciaram que a percepção de lotação não é um fator que interfere negativamente no turismo, nos moldes como este é executado nas 7 cavernas turísticas pesquisadas. A caracterização dos roteiros como ecoturísticos, com grupos pequenos de visitantes, intervalo maior entre grupos e guias focados na interpretação ambiental, pode estar entre os principais fatores que levam a esta conclusão preliminar. Os demais indicadores socioeconômicos pesquisados para caracterização da amostra demonstram se tratar de um grupo seletivo da sociedade, com predominância de níveis maiores de escolaridade. Este fator, associado ao fato de serem turistas que em sua maioria já visitaram cavernas em outras oportunidades, torna a avaliação mais seletiva, pela experiência de consumo. Ainda assim, as avaliações em todos os aspectos pesquisados foram positivas. Disto, pode-se concluir que a estratégia de caracterização dos roteiros de turismo em cavernas nos moldes do ecoturismo ou do turismo sustentável pode se tornar rentável e, ao mesmo tempo, menos danoso ao ambiente. O detalhamento dos dados coletados e futuras análises poderão demonstrar com mais detalhes estas descrições preliminares, contribuindo ainda mais para a gestão dos atrativos turísticos em cavernas.

Agradecimentos

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento da pesquisa que gerou os dados desta publicação (MCTI/CNPQ/Universal 14/2014, Processo CNPq 455100/2014-4).

Referências

- Boggiani P.C., Silva O.J., Gesicki A.L.D., Galati E., Salles L.O. e Lima M.M.E.R. 2007. Definição de capacidade de carga turística das cavernas do Monumento Natural Gruta do Lago Azul (Bonito, MS). *Geociências* 26(4), 333-348.
- Borges F.A.C., Travassos L.E.P. e Guimarães F.A. 2013. Proposta de criação de trilhas geoturísticas no Monumento Natural Estadual Gruta Rei do Mato, Sete Lagoas, Minas Gerais. *CLIMEP. Climatologia e Estudos da Paisagem* 8, 24-48.
- Calaforra J.M., Fernández-Cortés A., Sánchez-Martos F., Gisbert J. e Pulido-Bosch A. 2003. Environmental control for determining human impact and permanent visitor capacity in a potential show cave before tourist use. *Environmental Conservation* 30(2), 160-167.

- Cigna A.A. 2011. Show cave development with special references to active caves. *Tourism and Karst Areas* 4(1), 7-16.
- Cigna A.A. e Burri E. 2000. Development, management and economy of show caves. *International Journal of Speleology* 29(1), 1-27.
- Cigna A.A. e Forti P. 2013. Caves: the most important geoturistic feature in the world. *Tourism and Karst Areas* 6(1), 9-26.
- Cole D.N. 2001. Visitor use density and wilderness experiences: a historical review of research, Fort Collins, USDA Forest Service, 11-20.
- Doorne S. Caves, culture and crowds: carrying capacity meets consumer sovereignty. 2000. *Journal of Sustainable Tourism* 8(2), 116-130.
- Fernández-Cortés A., Calaforra J.M. e Sánchez-Martos F. 2006. Spatiotemporal analysis of air condition as a tool for the environmental management of a show cave (Cueva del Agua, Spain). *Atmospheric Environment* 40, 7378-7394.
- Graefe A. R., Vaske J., et al. 1984. Social carrying capacity: An Integration and Synthesis of twenty years of research. *Leisure Sciences* 6(4), 395-431.
- Lobo H.A.S. 2009. Zoneamento ambiental espeleológico (ZAE): aproximação teórica e delimitação metodológica. *Turismo e Paisagens Cársticas* 2(2), 113-129.
- 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.
- Lobo H.A.S., Sallun Filho W., Veríssimo C.U.V., Travassos L.E.P., Figueiredo L.A.V. e Rasteiro M.A. 2010. Espeleoturismo: oferta e demanda em recente expansão e consolidação no Brasil. In: Castro S.F.L., Souto W., Rangel B.B. (Coords.) Segmentação do turismo: experiências, tendências e inovações – artigos acadêmicos. Ministério do Turismo, Brasília, 35-58.
- Manning R.E. e Hallo J.C. 2010. The Denaly Park road experience: indicators and standards of quality. *Park Science* 27(2), 33-41.
- McCool S.F. e Lime D.W. 2001. Tourism carrying capacity: tempting fantasy or useful reality? *Journal of Sustainable Tourism* 9(5), 372-388.
- Oliveira F.V. 2003. Capacidade de Carga nas Cidades Históricas. *Papirus, Campinas*. 172.
- Stankey G. H. e McCool S.F. 1984. Carrying capacity in recreational settings: evolution, appraisal, and application. *Leisure Sciences* 6(4), 453-473.
- UNESCO. 1999. Atlantic forest South-East reserves. <http://whc.unesco.org/en/list/893>. Accessed 15 february 2018.

N.A. Jorge, 2018. Renovación de los destinos turísticos. Las cuevas como centro de complejos turísticos. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 335-344.

Renovación de los destinos turísticos. Las cuevas como centro de complejos turísticos

N.A. Jorge

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

RESUMEN

El ciclo de vida de los destinos turísticos constituye uno de los temas de mayor relevancia en los análisis de competitividad turística. Muestra la evolución de un destino en el tiempo y puede ayudar a identificar la estrategia más coherente a llevar a cabo. Como referencia para realizar este análisis, la Teoría del Ciclo de Vida de los destinos Turísticos enunciada por Richard Butler (1980), en la que se analizan el uso de los instrumentos de promoción en distintas fases del ciclo de vida del destino. Con esto se intenta tener una mejor comprensión del ciclo de vida de los destinos turísticos. El espeleoturismo no es diferente, la evolución del espeleoturismo y del turista que busca las cuevas hace que las cuevas que no sepan acompañar esta evolución descienden en el número de visitantes. El futuro puede pasar por una diversificación de servicios teniendo por base la visita a la cueva, como en Las Grutas de Mira de Aire que después de un periodo de declive están en los últimos años en periodo de rejuvenecimiento.

Palabras clave: cuevas turísticas, espeleoturismo, Grutas de Mira de Aire, turismo.

Renewal of the tourist destinations. The caves as a center for tourist complexes

ABSTRACT

A tourist destination's life cycle is one of the most relevant themes in the analysis of tourism competitiveness. It shows the evolution of a destination over time and can identify the most coherent strategy to follow. Applying the tourist destination life cycle model developed by Richard Butler (1980) to evaluate the competitive situation of the destinations at different stages, and thus optimize the positioning of the business strategies. It is therefore hoped to offer a better understanding of tourist destinations' life cycles, taking into account that the Butler model is a diagnostic and not a decision-making tool. Speleotourism is no different from other touristic destinations, it's evolution and of those who chose to visit caves has changed so much over the years that all those who are unable to follow this evolution will see the number of visitors fall. Caves who chose to diversify their offer sometimes counter this tendency and go through a rejuvenation period like the one the Caves of Mira de Aire are experiencing.

Keywords: show caves, Grutas de Mira de Aire, tourism, speleotourism.

Introducción

Los trabajos sobre marketing estratégico en destinos turísticos tienen sobre todo un carácter descriptivo para formular e implantar estrategias en los mismos. En estos trabajos, el ciclo de

vida del destino turístico (CVDT) es uno de los temas de mayor importancia en los análisis de competitividad turística. El CVDT muestra la evolución de un destino en el tiempo y, aunque con ciertas limitaciones, puede ayudar a identificar la estrategia más coherente a desarrollar.

Empezando con una descripción de las diferentes fases del ciclo de vida para poder identificar las acciones estratégicas, optimizar su posicionamiento y el futuro de estos. Teniendo en cuenta que el modelo aplicado es una herramienta de diagnóstico, junto con el análisis SWOT y no una herramienta de decisión.

Se pretenden identificar y describir los distintos factores que influyen en el ciclo de vida de los destinos turísticos y en especial los del espeloturismo, intentando hacer un acercamiento entre la teoría y la realidad.

Ciclo de vida de los productos turísticos

Algunos autores consideran que la utilización del concepto de "Ciclo de Vida del Producto" en el sector turístico es algo reciente, pero es uno de los temas de mayor relevancia en los análisis de competitividad turística.

El modelo propuesto por Butler en 1980 es uno de los más utilizados en los estudios de desarrollo de destinos turísticos (figura 1).

La idea fundamental es que los destinos, igual que los productos, atraviesan una serie de fases o ciclos a lo largo de su vida.

El modelo creado en 1980 por Butler de CVDT es fundamentado por la Teoría del Ciclo de Vida

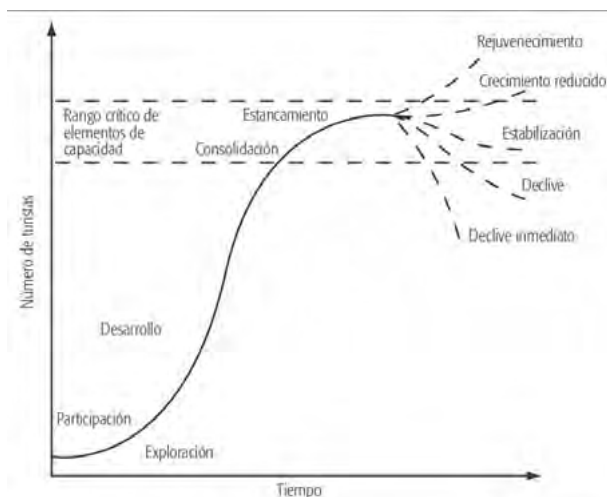


Figura 1. El ciclo de vida del producto (Butler, 1980).

del producto propuesta por Dean en el ámbito de gestión del Marketing (1950), pero adaptándola a los destinos turísticos como si de un producto se tratase.

Esta adaptación hubo de tener en cuenta las infraestructuras, actitudes de los turistas y residentes, implicación de agentes locales y externos en la comercialización del producto, accesibilidad a los destinos y competencia de los mismos.

Hay que realzar que el objetivo de crear productos o servicios de turismo es promocionar el desarrollo continuo de negocios y potencializar los márgenes de beneficio, para eso es necesario crear nuevos productos que mantengan el interés de los turistas en las empresas.

El CVDT igual que el ciclo de vida de los productos tiene de forma general seis fases, exploración, implicación, desarrollo, consolidación, estancamiento y declive.

Todo ciclo empieza en la fase de exploración, en la que se descubre el destino y es visitado por un número reducido de personas. En esta etapa los destinos son poco accesibles o carecen de instalaciones turísticas por lo que es necesario crear toda la infraestructura de apoyo.

En la fase de implicación el número de turistas empieza a crecer como resultado de la creación de estructuras de apoyo, muchas veces desarrolladas por las poblaciones locales o por la administración pública. El destino se hace más popular, se va desarrollando un mercado y una temporada turística.

En la fase de desarrollo la llegada de turistas es mucho mayor, los productos ya son conocidos y hay un crecimiento acelerado de ventas y beneficios. Se incorporan tour operadores lo que puede hacer que la singularidad del destino se empiece a perder debido a la masificación. En la fase de consolidación el número de turistas crece pero no de forma tan acelerada como en la fase de desarrollo. El turismo es uno de los indicadores más importantes de la economía local, algunas infraestructuras pueden perder alguna cualidad y hay más competencia con otros productos idénticos.

En la fase de estancamiento el número de turistas no crece y el destino empieza a perder su atractivo. Existen muchas compras de repetición y en algunos casos la capacidad de acogida puede haberse sobrepasado, lo que implica una pérdida acentuada de calidad. Empieza entonces la fase de declive donde se produce una pérdida de visitantes que se trasladan a otros destinos. A veces los destinos comienzan a reducir precios para captar clientes y así mantener la cuota de mercado. En esta fase es importante hacer análisis al destino y a los productos para intentar rejuvenecerlos, se buscan nuevos usos, nuevos clientes, nuevos canales de distribución y diseñan nuevos productos con el fin de reposicionar el destino. La teoría del ciclo de vida del producto requiere adaptaciones para su aplicación en el contexto turístico. Los destinos o las empresas que no son capaces de contestar la demanda de los turistas acaban por morir. Hay que tener en cuenta el CVDT como criterio para la valoración de las diferentes opciones estratégicas, la fase del ciclo de vida del destino turístico condicionará las estrategias comerciales a utilizar en cada caso.

El conocimiento de la evolución del destino y los factores que la han generado, puede ser una

información muy valiosa a tener en cuenta en el proceso de dirección estratégica de los destinos (Martín Azami, 2004). No obstante, diversos autores como Foster y Murphy (1991), plantean que, a pesar de la aplicabilidad del modelo, es necesario tener en cuenta la demografía y condiciones del mercado de cada región.

El sector turístico a nivel global se encuentra en una fase de crecimiento, pero la demanda por países y productos es muy dispar. El propio concepto de turismo es "el desplazamiento temporal de personas para lugares distintos a su entorno habitual por un período de tiempo consecutivo inferior a un año, con fines de ocio, negocios u otros" (OMT), tras la organización del primer viaje planeada por Thomas Cook en 1841, el turismo ha evolucionado de forma muy rápida, lo que ha provocado la necesidad de una adaptación constante de los destinos a nuevas situaciones del mercado, nuevos gustos y nuevas necesidades de los consumidores turísticos.

Partiendo del principio que los destinos turísticos son dinámicos y evolucionan en el tiempo, esa evolución o cambio puede ser debida a cambios en los consumidores turísticos (Cohen, 1972; Plog, 1974) o en el propio destino (Christaller, 1964). Ante esa evolución los instrumentos de comercialización son utilizados de modo e intensidad distinta, por lo que las acciones de marketing han de adaptarse a la fase del ciclo de vida en que se encuentran los productos o destinos.

Análisis SWOT

"Conoce a tu enemigo y te conocerás a ti mismo, si tienes cien combates a entablar, cien veces serás victorioso. Si ignoras a tu enemigo y te conoces a ti mismo, tus probabilidades de perder y de ganar serán iguales. Si ignoras al mismo tiempo a tu enemigo y a ti mismo, solo contarás tus combates por derrotas." Sun Tzu (El arte de la guerra).

En el planeamiento estratégico, el análisis de escenarios es muy importante en la vida de las organizaciones. El análisis SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities y Threats*) que se puede traducir como fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas (DAFO), es una técnica utilizada para la gestión y planeamiento de empresas. Ese modelo ha surgido en la década de los 60 en discusiones sobre compatibilidad entre las fuerzas y debilidades de las organizaciones, y las oportunidades y amenazas que enfrentan.

Hoy igual que entonces, este análisis es de extrema importancia, saber las características internas y externas del sistema en el que las empresas y los destinos se encuentran es primordial para la tomada de decisiones. Oliveira (2007) define este análisis como:

- Punto fuerte es la diferenciación que la empresa consigue alcanzar (variable controlable) que le proporciona una ventaja operacional en el ambiente empresarial (donde están los asuntos no controlables de la empresa).
- Punto débil es la situación inadecuada de la empresa (variable controlable) que le proporciona una desventaja operacional en el ambiente empresarial.
- Oportunidad es la fuerza ambiental incontrolable por la empresa, que puede favorecer su acción estratégica, desde que es conocida y aprovechada de forma satisfactoria mientras perdura.

- Amenaza es la fuerza ambiental incontrolable por la empresa, que crea obstáculos a su acción estratégica, pero que podrá o no ser evitada, desde que es reconocida.

A través del análisis de puntos fuertes e debilidades, los gestores y sus equipos pueden determinar con más claridad las prioridades en términos de amenazas y oportunidades en ambiente externo. Antes de tomar decisiones los gestores de las empresas o de los destinos turísticos debe identificar y evaluar los puntos fuertes y debilidades que tienen así como su capacidad real de sacar ventajas de las oportunidades creadas así como de enfrentarse a las amenazas.

Considerar los factores externos y internos es esencial porque ellos esclarecen el mundo donde operan las empresas o unidades y, así, permitiendo planear mejor el futuro deseado. Así, hay que identificar los puntos fuertes y debilidades en las empresas o destinos de forma a incentivar los fuertes y minimizar el impacto de las debilidades. En el ambiente externo que las empresas o destinos no pueden controlar, hay que saber leer las oportunidades y amenazas que pueden aparecer para tomar las mejores decisiones y así aprovechar dichas oportunidades y evitar las amenazas.

Sabemos que ni siempre es posible evitar que aparezcan amenazas pero se pueden crear planes de contingencia para enfrentarlas y disminuir sus efectos. Siempre existirán en cierto punto amenazas externas, lo que no puede pasar es dejar de considerarlas importantes.

Las cuevas como centro de complejos turísticos

Considerando estas herramientas de identificación resolución de problemas, la toma de decisiones puede hacer que después de la fase de estancamiento, una cueva entre en declive o se revitalice. O como en el caso de las Grutas de Mira de Aire, después de unos años de declive, consiga revitalizarse.

Hasta 1974 Mira de Aire vivía del comercio y de los textiles, tras la apertura de la cueva al público. Con la apertura de las vecinas cuevas de Santo Antonio (8 km) en 1958, las gentes de ese pueblo en el centro de Portugal quisieron mostrar al público sus cuevas. De inicio con escalones de madera y una iluminación arcaica, que pronto fue descartada por no ser funcional. Fue en 1971 tras una reunión en el viejo cine del pueblo cuando se constituyó la sociedad que hizo las obras para apertura de la cueva al público.

El 11 de agosto de 1974 la cueva abre al público, pero como en el 25 de Abril de ese año tuvo lugar la revolución para abolir la dictadura, toda la inversión terminó. El edificio a la entrada de la cueva sólo tenía, en primera planta un pequeño bar con tienda de recuerdos y taquilla, la planta superior que sería para restaurante solo tenía la estructura exterior. Del edificio de apoyo a la entrada con tiendas y baños, sólo los baños estaban terminados y todo lo demás con el acabado exterior. A la salida había una pequeña tienda en madera con bar y recuerdos cerca de los ascensores.

Al principio de la década de los 80 del siglo XX y después de los 3 primeros años de una fase de desarrollo acentuado, se produce una fase de maduración con cifras entre 150.000 y 200.000 visitantes al año, que se mantiene hasta los años 90 del siglo XX (figura 2).



Figura 2. Evolución del número de visitantes de las grutas de Mira de Aire.

En esos 10 años se concluirán los tres edificios de la cueva, la entrada, de apoyo y salida, se abre el restaurante concesionado a la entrada de la cueva, se mejoran las estructuras de salida con el bar, tienda y baños y el edificio de apoyo a la entrada con tienda de recuerdos, bar, hamburguería, pastelería y una discoteca.

En 1991 fue abierto el tramo de autopista de Lisboa a Fátima, y el gran número de visitantes que llegaba por la vecina Minde en dirección a Fátima ya pudo desplazarse directamente hasta allí. Para combatir esta amenaza se creó un parque acuático junto a la salida de la cueva que fue abierto al público en 1993 pero en ese mismo año empezó la fase de descenso en el número de visitantes.

La crisis económica y social que en esos años se agravó, hizo que disminuyera el número de visitantes a la cueva. Además, la administración de la cueva entre 1994 y 2003 con una política de contención de inversiones y gastos no contribuyó a ayudar a recuperar la cueva, todo lo contrario, el número de visitantes siguió descendiendo.

En 2004, con la entrada de una nueva administración, empieza a cambiar la imagen de la cueva y las surgen nuevas inversiones. Una administración más capaz de contestar a la demanda de los turistas empieza a cambiar las estructuras de la cueva por otras más respetuosas con el medio ambiente y se crean espacios de jardín, una pequeña granja con animales, un reloj de sol y un molino de viento.

En 2006, la empresa llega a acuerdo con el concesionario del restaurante que no supo acompañar a la evolución de la empresa y tras un cierre de dos años abre de nuevo con gerencia directa de la cueva. Otras innovaciones fueron la creación de un auditorio donde se pone un video sobre las regiones kársticas y la historia de la cueva, una exposición permanente de rocas, minerales, gemas y fósiles en la salida de la cueva y la edición de un cuaderno para las escuelas con el proceso de formación de las cuevas. Mientras se sigue con la promoción de las cuevas en ferias de turismo y workshops en Portugal y España.

En 2010 en el concurso de las "7 Maravillas de la Naturaleza en Portugal" la cueva ganó en su categoría. Hubo en el inicio un aumento del número de visitantes, pero la crisis empezó a sentirse en ese mismo verano. En mayo de 2011 Portugal firmaba con la comisión europea, el Banco

Central Europeo (BCE) y el Fondo Monetario Internacional (FMI) el memorando de recuperación económica que iba a margullar el país en la crisis.

Como en la región no había alojamiento, la administración decidió crear una zona de bungalós junto a la salida de la cueva con 11 unidades en el año de 2011, la inauguración se realiza al principio de 2012, el peor año de visitas a la cueva. Pero el trabajo hecho hasta ese momento tuvo respuesta ya que desde ese año la cueva experimenta a una etapa de rejuvenecimiento.

Las reformas hechas y los nuevos productos aliados a los factores externos como el principio de la crisis económica que hace con que muchos portugueses escogen disfrutar sus vacaciones en Portugal, en vez de salir a otro destino (tabla 1). Además, los eventos que siguieron a la Primavera Árabe produjeron un aumento de inseguridad en Europa, lo que supuso que muchos turistas escogieran Portugal como destino de vacaciones (tabla 2).

De acuerdo con un estudio del Ministerio de la Economía de Portugal, el turismo fue el segundo motor más potente en la recuperación económica de 2017, solo superado por las exportaciones. "La industria de capital intensivo (metalmecánica, máquinas, automóvil y química) son responsables por cerca de 33% del crecimiento de exportaciones de bienes y servicios en 2017, seguido del turismo, que contribuyó con 28% del crecimiento." (Periódico Expresso, 19/01/2018).

Utilizando el análisis SWOT (DAFO) para los últimos años de la cueva podemos considerar:

Fortalezas

- Innovaciones
- La formación continua de los guías
- Más y mejores servicios
- Espacio único en el país

Debilidades

- No tener aún una profesionalización de los guías

Año	Número de clientes en el restaurante	Ingresos del restaurante	Número de pernoctaciones	Ingresos del hotel	Número de visitantes	Ingresos por las visitas
2009	5989	81.130€	-	-	77693	349.130€
2010	10910	144.311€	-	-	91304	428.768€
2011	11655	142.169€	-	-	89632	429.358€
2012	11011	136.018€	376	18.504€	72002	355.094€
2013	13385	164.432€	531	25.235€	77451	404.431€
2014	16013	200.622€	712	31.642€	85164	455.688€
2015	18062	254.596€	911	41.405€	95376	515.643€
2016	21107	270.703€	1144	56.201€	110891	521.918€
2017	22403	288.851€	1317	69.641€	126367	763.002€

Tabla 1. Evolución del número de visitantes en los últimos 9 años.

- No tener apoyos de gobierno
- Competir con otros locales de interés cultural, histórico o religioso muy cerca
- Malos accesos y señalización en las carreteras

Oportunidades

- El aumento de turistas extranjeros en el país
- Proximidad a Fátima
- Crecimiento del turismo de naturaleza
- Seguridad en el país

Amenazas

- Proximidad a Fátima
- Red de monumentos del gobierno sin tasas y con entradas gratuitas todos los primeros domingos del mes
- Tasa de IVA a 23%
- Concurrencia con otras cuevas en la región
- Red deficiente de transportes públicos

Tras la evolución de la cueva a través de los años, es visible que lo que empezó como una cueva siguiendo los pasos de sus vecinas cuevas de Santo António fue evolucionando hasta convertirse en el centro de un complejo turístico de importancia regional.

El pueblo de Mira de Aire, que hasta 1974 vivía del comercio y de los textiles, vive del turismo. Con la apertura del alojamiento en la cueva, los turistas ya se quedan durante períodos superiores a una semana, aunque no visiten la cueva, utilizan el parque acuático en el verano, hacen compras en las superficies comerciales del pueblo, van a los restaurantes, visitan la región, y en muchos casos ya vuelven a quedarse.

En figura 3 se puede ver la importancia de los diferentes segmentos de la cueva y deja claro que después de la visita a la cueva, el sector más importante es el restaurante seguido de la taquilla del parque acuático, a pesar de estar abierto solamente tres meses al año. Los bungalós con

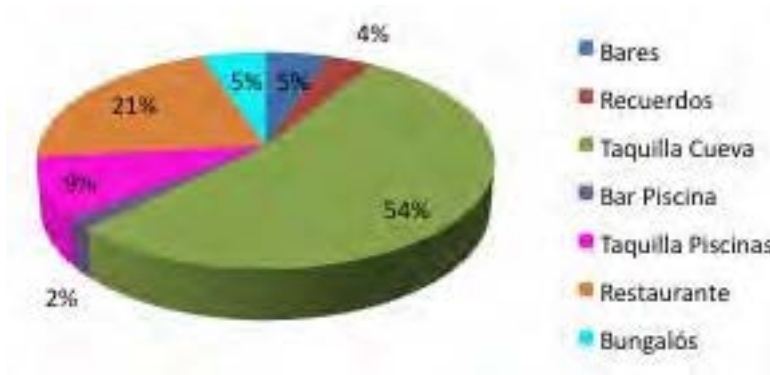


Figura 3. Importancia de los distintos segmentos de la cueva en 2017.

sólo seis años de existencia tienen ya una importancia similar a la de los dos bares de apoyo a la cueva.

Este año se prepara la apertura de un centro de interpretación del macizo calizo extremeño y del Museo del Fósil, con 32 fósiles de la vecina playa de San Bento. En marketing se sabe que la evolución condiciona el desarrollo de nuevos productos y la estrategia comercial a seguir. Así que hay diferentes estrategias de comunicación tras la fase del ciclo. En las fases de consolidación o estancamiento la comunicación estará basada en la imagen de diversificación del producto para incrementar el interés del público.

Al contrario, nuestra vecinas cuevas de San António y cuevas de Alvados que fueron las pioneras en el turismo espeleológico en Portugal, por falta de inversión y diversificación bajan cada año su número de visitantes. Hoy reciben las Cuevas de San António 20.000 visitantes anuales y las cuevas de Alvados 12.000 visitantes anuales.

Conclusión

El marketing es de extrema importancia, sea para un producto comercial o destino turístico. La evolución del marketing acompaña a la evolución de los mercados, sean turísticos o no, en los análisis de marketing saber en qué punto del ciclo de vida del producto estamos ayuda a establecer las estrategias a seguir para que nuestros productos se mantengan así como el interés del público en nuestros servicios. Sin embargo, es necesario dar continuidad y hacer varios análisis SWOT. Saber nuestras fortalezas y debilidades, así como las oportunidades y amenazas del mercado es fundamental para tomar decisiones para el futuro de los productos, empresas y destinos.

Como hemos visto en el caso de las cuevas de Mira de Aire, a través de una toma de decisiones dinámica ha sido posible invertir la tendencia y vencer el estancamiento. Conseguir mantener y aumentar el interés del público, es el objetivo de toda la actividad empresarial, pero para eso es necesario evolucionar de acuerdo con la respuesta del mercado, las empresas que se quedan paradas en el tiempo pensando que la promoción se hace por sí misma ya no se encuadran en el mundo actual.

Las cuevas son lugares únicos de comunión con la naturaleza pero compiten de forma directa con todos los otros lugares de interés turístico y que muchas veces tienen un peso mayor en la promoción por entidades oficiales. Así, hay que continuar trabajando más y mejor para los turistas.

Referencias

- Butler, R. 1980. *The Concept of a Tourist Area Cycle of Evolution: Implications for Management of Resources*, 5-12.
- Butler, R. 1996. *The Concept of Carrying Capacity for Tourism Destinations: Dead or Merely buried. Progress in Tourism and Hospitality Research*, 283-293.

- Butler, R. 2001. The Resort Cycle Two Decades On. En *Tourism in the 21st Century. Lessons from Experience*, 284-289.
- Christaller, W. 1964. Some Considerations of Tourism Location in Europe: The Peripheral Regions – Underdeveloped Countries – Recreation Areas. *Papers in Regional Science*, 95-105.
- Cohen, E. 1972. Toward a Sociology of International Tourism. *Social Research*, 164-182.
- Dean, J. 1950. Pricing Policies for New Products". *Harvard Business Review*, 45-54.
- Foster, D.M. y Murphy, P. 1991. Resort Cycle Revisited. The Retirement Connection. *Annals of Tourism Research* 553-567.
- Martín Azami, D. 2004. *Determinantes estratégicos de la fidelidad del turista en destinos maduros*. Tesis doctoral, Servicio de publicaciones de la Universidad de La Laguna, La Laguna 19-97.
- Plog, S.C. 1974. Why Destination Areas Rise and Fall in Popularity. *The Cornell Hotel and Restaurant Administration Quarterly*, 55-58.
- Oliveira. 2007. *Djalma de Pinho Rebouças de Planejamento Estratégico: Conceitos, metodologia e práticas*, 37
- Tzu, S. *El Arte de la Guerra*. 41.

Y. Palomo Arrabal, 2018. Turismo Villanúa: evolución e innovación de la cueva de las Güixas. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 345-352.

Turismo Villanúa: evolución e innovación de la cueva de las Güixas

Y. Palomo Arrabal

Directora de la Cueva de las Güixas, Turismo Villanúa S.L.U, Camino de la Fuente 1, 22870 Villanúa (Huesca). cuevas@villanua.net

RESUMEN

La cueva de las Güixas se encuentra en Villanúa, una población del pirineo Aragonés a los pies del macizo de Collarada, dentro del Valle de Aragón, siendo uno de los recursos turísticos más importantes de la zona. El inicio de la actividad turística comienza en 1927 con el trabajo Sindicato de Iniciativa y Propaganda de Aragón (SIPA) hasta la guerra civil. En el 1945 se vuelve abrir al público de manera intermitente por la precariedad de la misma, hasta que en el año 1994 se inicia una nueva etapa turística por parte de la empresa Sargantana. En noviembre del 2011 asume la gestión el Ayuntamiento de la localidad a través de la empresa municipal Turismo Villanúa. Desde los inicios de la gestión se apuesta por la labor didáctica y cultural, centrándose en complementar el currículum escolar con la prehistoria, historia, geología y biología de la cueva y cubriendo las inquietudes que despiertan las historias y leyendas de las brujas que se cuentan en la visita. Gracias a la visión comercial se crea una serie de nuevas actividades asociadas a la cueva, con el fin de aumentar el número de visitantes en épocas en las que no hay afluencia de turistas. La buena gestión e innovación de estas visitas, acompañados de la profesionalidad del personal en formación continua desde la propia empresa, ha generado un aumento notable en las visitas cerrando en 2017 con más de 28.000 visitantes y posicionando la cueva en Villanúa como un referente turístico en el valle.

Palabras clave: cuevas turísticas, Güixas, turismo, Villanúa.

Tourism Villanúa: evolution and innovation of the Güixas cave

ABSTRACT

The Güixas cave is located in Villanúa, a town of the Aragonese Pyrenees at the base of Collarada mountain, in the Aragon Valley, being one of the most important tourist resources in the area. The tourist activity of the cave started in 1927 with the SIPA (Syndicate of Initiative and Propaganda of Aragón) until the civil war. In 1945 it was opened to the public intermittently due to the precariousness of it, until in 1994 a new tourist stage was started by Sargantana Company. In November 2011, the City Council of the town took over the management through the municipal company Turismo Villanúa. From the beginning of the management is committed to the didactic and cultural work, complementing the school curriculum with the prehistory, history, geology and biology of the cave and heeding the curiosity aroused by the stories and legends of witches that are told in the visit. Due to the commercial vision, new activities associated to the cave are created, in order to increase the number of visitors at times when there is no influx of tourists. The good management and the innovation of these visits, joined to the professionalism of the personnel in continuous training from the company itself, has generated a remarkable increase in the visits closing in 2017 with more than 28,000 visitors and positioning the cave and Villanúa as a touristic reference in the Valley.

Keywords: Güixas, show caves, tourism, Villanúa.

Introducción e historia turística de la Cueva de las Güixas

La cueva de las Güixas se encuentra en Villanúa, una población del pirineo Aragonés a los pies del macizo de Collarada, dentro del Valle del Aragón. Para llegar a ella, se debe recorrer un tramo del Camino de Santiago y antiguo *Summos Portos* (Somport) romano. Esta cueva, ha estado ocupada durante distintos periodos, desde el eneolítico hasta nuestros días. Los restos hallados en su interior datan del 3000 a.C. hasta S.IV d.C. La existencia de manuscritos con los procesos, estatutos y testamentos junto con leyendas, cuentan que las brujas utilizaban la cueva como lugar de reunión y celebración de rituales en los siglos XV al XVIII (Bru, 2006; Dueso, 2015). También, fue refugio para los habitantes de la villa en la etapa Medieval y tardo romana como demuestra el hallazgo de una moneda de oro acuñada en siglo IV d.C. Finalmente, la cueva sirvió de refugio en la guerra civil y más tarde fue prisión de los conocidos batallones de castigo, acogiendo a los presos de guerra. Además de su interés histórico y geológico, la cueva de las Güixas también tiene mucha importancia ecológica por los quirópteros que viven en el interior, llegando a contabilizar hasta 9 especies distintas en el 2007, lo cual ha motivado la inclusión de este emplazamiento en la Red Natura 2000 como Lugar de Interés Comunitario (LIC).

Su historia como cueva turística se remonta a 1927, cuando por iniciativa del SIPA (Sindicato de Iniciativa y Propaganda de Aragón), celebrando su inauguración el 21 abril de 1929 hasta su cierre en 1936 por la guerra civil. Entre 1945 y 1986 se volvió a abrir pero de manera intermitente por la precariedad de sus instalaciones. En 1996 tras la instalación de un sistema eléctrico se abre una nueva fase de explotación y desarrollo turístico de la cueva a cargo de la empresa Sargantana hasta el 2011. En 2009 se inaugura el centro de interpretación subterráneo, dentro del proyecto europeo "impulsados" cuyo objetivo principal es crear una red transfronteriza que unirá; museos, centros de interpretación y oficinas de turismo del Valle del Aspe y la Jacetania, al mismo tiempo que ofrece una visita interactiva para los visitantes que no pueden acceder a la cueva. Un año después, se adecúa un espacio en el edificio del mismo centro de interpretación como Oficina de Turismo. En noviembre del 2011, el ayuntamiento de Villanúa asume la gestión de la cueva a través de la empresa municipal turismo Villanúa (figura 1 y 2).

Gestión de la cueva a través de la empresa Turismo Villanúa

En noviembre del 2011 asume la gestión de la cueva el ayuntamiento de Villanúa, a través de una empresa municipal "Turismo Villanúa, S.L.U. que se encarga también de la gestión del Eco-parque el Juncaral, Caminos de Collarada y otras actividades para impulsar la zona. El personal de la cueva lo componen un gerente de Turismo Villanúa, una coordinadora de la cueva de las Güixas, quien realiza también las visitas a la cueva y dos guías eventuales en temporada alta de turismo (puentes, festivos, julio y agosto). El trabajo administrativo se realiza por parte de personal del Ayuntamiento de Villanúa (figura 1 y 2).

Antonio Usieto, gerente de Turismo Villanúa, conformaba el "alma" de la empresa junto a Luís Terrén, alcalde de Villanúa. Al fallecer Antonio en 2014, Luis Terrén continuó con los eventos programados de Turismo Villanúa desde el ayuntamiento, con el apoyo de personal para la Oficina de Turismo en verano y Yolanda Palomo, coordinadora de la cueva desde el 2009, asume la dirección de la cueva de las Güixas (figura 2).



Figura 1. Organigrama de Turismo Villanúa en 2012.

En 2015 la empresa incorpora a una persona más como guía de la cueva. En 2017 se amplía la contratación con dos personas en Turismo Villanúa, una en comunicación y otra en administración y un guía más para la cueva a media jornada.

Desde los inicios y gracias a la visión e innovación en la gestión comercial y didáctica, acompañados de la profesionalidad del personal en formación continua desde la propia empresa, hay un aumento notable en las visitas cerrando 2017 con 28.500 visitas y posicionando la cueva de las Güixas como referente turístico de Aragón.

Análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de la empresa.

La situación de Villanúa y la cueva de las Güixas en un entorno natural privilegiado a los pies del macizo de Collarada y la buena comunicación y cortas distancias con Francia y Jaca y su cercanía

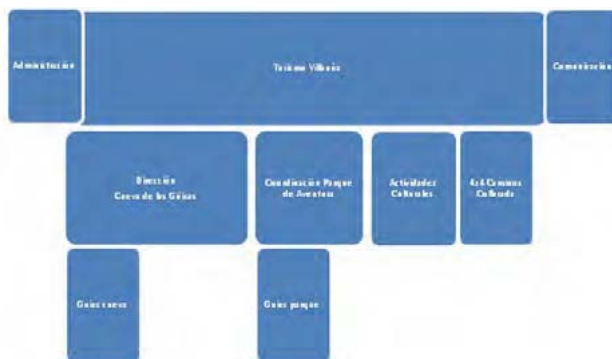


Figura 2. Organigrama de Turismo Villanúa en 2017.

a las estaciones invernales de esquí de Astún y Candanchú, aseguran la afluencia de turistas a Villanúa, siendo una de sus principales fortalezas. Además el paso del famoso Camino de Santiago por la localidad hace que sea paso obligado para senderistas y peregrinos. Estas condiciones atraen a un amplio perfil de visitantes, entre los que destacan familias, jóvenes, grupos escolares, montañeros y senderistas. La visita propuesta a la cueva de las Güixas tiene un enfoque didáctico. Se trata de una visita interpretativa, muy interactiva con el visitante y adaptada a la pluralidad del público visitante. Con estas premisas, está formado el personal que trabaja en la cueva, formación a cargo de la misma empresa y que se hace de forma continua.

En cuanto a las oportunidades podemos nombrar varias. Por un lado, la demanda del turismo familiar que supone el 68% del turismo de la zona. Por otro lado la visita a la cueva de las Güixas supone un plan alternativo ideal en momentos en los que las condiciones meteorológicas adversas no permiten disfrutar del entorno al aire libre. Otras oportunidades son el hecho de poder aprovechar la geología de la zona, sus senderos interpretativos, el conjunto dolménico de Villanúa y la historia de un lugar de paso histórico. Para aprovechar estos recursos en la cueva se realizan visitas de educación ambiental para el conocimiento de los quirópteros, visitas y actividades enfocadas a la prehistoria y visitas teatralizadas a la cueva para transmitir su historia y las leyendas sobre las brujas que se reunían en su interior, ya que en Villanúa 15 mujeres fueron acusadas de practicar la brujería entre los S. XV y XVIII.

Una de las principales debilidades de la cueva y de la zona turística en general es la temporalidad estacional del turismo. El turismo invernal que atrae las estaciones de esquí y el turismo de verano en la montaña, ambos crecientes en los últimos años, suponen en Villanúa una temporada de mucha afluencia en la que se llega a multiplicar por cinco la población residente en el municipio. Fuera de estas estaciones la afluencia turística cambia drásticamente manteniendo unos números bajos de visitantes. Esta situación lleva a la temporalidad laboral de los trabajadores en el sector turístico y en la cueva de las Güixas y, la precariedad de los contratos temporales del personal cualificado. Una debilidad de la propia cueva es la inaccesibilidad para personas con movilidad reducida o discapacidad motora que no pueden realizar el acceso a la cueva al ser necesario recorrer un tramo del camino de Santiago de 200 m, ni realizar el recorrido por el interior de la cavidad que dispone de escaleras. Para dar acogida a estas personas, el centro de interpretación de la cueva (CIN Subterránea) está perfectamente adaptado para personas con movilidad reducida que en su interior pueden hacer un recorrido virtual por la zona y la cueva a través de innovadores métodos audiovisuales.

Las amenazas que encontramos para la explotación turística de la cueva surgen de las propias características de la cavidad y de la competencia con otras ofertas turísticas de la zona. La figura de protección ambiental de la cueva de las Güixas, declarada LIC, para proteger a las especies de murciélagos que habitan en su interior, limitó el uso turístico de las galerías superiores e incorporó restricciones en la visita, como la limitación de fotos y del número de personas que entran en cada grupo. Otra restricción para la visita surge de la propia dinámica de la cueva, ya que es una cueva activa y el recorrido turístico se inunda en época de deshielo o fuertes tormentas, impidiendo el acceso a la cavidad. Otro tipo de amenazas son las que surgen por la propia competencia turística de la zona y de otras actividades culturales y de entretenimiento organizadas por los municipios y la comarca. Entre estas están las actividades gratuitas organizadas para niños, las visitas a la cercana estación de Canfranc y la Ciudadela de Jaca que atraen a un buen número de visitantes.

Acciones desarrolladas por Turismo Villanúa en la Cueva de las Güixas

Desde el año 2012 se han ido desarrollando en la cueva de las Güixas una serie de actividades y acciones que han hecho evolucionar a la empresa turística, posicionar la cueva de las Güixas como referente turístico en el valle del Aragón y aumentar el número de visitantes a la cueva de forma importante en los últimos cinco años, pasando de 15.000 visitantes en 2012 a 28.500 en 2017 (figura 3). Este mismo año la cueva de las Güixas entra a formar parte de la Asociación de Cuevas Turísticas de España (ACTE), asistiendo a todos los congresos desde entonces y participando con comunicaciones.

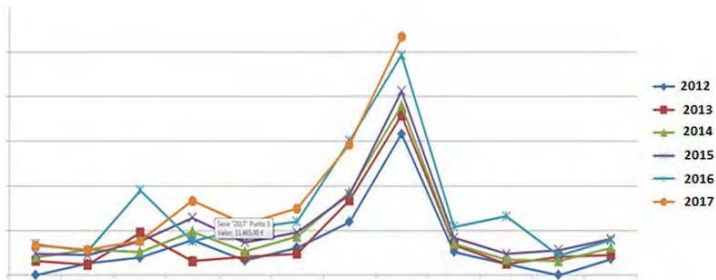


Figura 3. Evolución del número de visitantes a la cueva de la Güixas entre 2012 y 2017.

Las inundaciones excepcionales producidas en todo el valle del Aragón y en la cueva ese otoño de 2012 produjeron pérdidas materiales dañando la instalación eléctrica y el sistema de protección y seguridad de la cueva. Para su reparación y renovación se tuvo que cerrar al público la cueva un tiempo en el que el personal de la empresa llevó a cabo una campaña de difusión de la visita a la cueva para grupos escolares que pronto dio sus frutos de manera exitosa

Un año después de desarrollan y pusieron en marcha diferentes visitas organizadas desde la empresa contando con el propio personal de guías y la compañía de teatro Burbuleta que trabajaba en la zona: visita al casco histórico de Villanúa, visita al dolmen de las Güixas, visita teatralizada a la cueva de las Güixas con diferentes personajes y temáticas. También, se desarrollaron actividades complementarias en las instalaciones del centro de Interpretación, como el túnel del terror desarrollado con motivo de la festividad de *Halloween* por Artea Teatro en la réplica de la cueva. En 2014, a pesar de los contratiempos se lleva a cabo la Primera Semana de las Güixas, una Semana Temática sobre las brujas de la localidad que se celebra del 11 al 16 de agosto. Durante esta semana, se realizan visitas teatralizadas a la cueva, talleres infantiles, cuentacuentos, animación y pasacalles musicales y un concierto del Orfeón Jacetano dentro de la cueva. Las visitas teatralizadas las realiza Burbuleta Teatro y cuentan con la participación de las guías que intervienen y colaboran en el resto de actividades junto a otras asociaciones de Villanúa, la Asociación el Achar y la Asociación Simultánea.

Al año siguiente se lleva a cabo la segunda semana de las Güixas tras la gran demanda y expectación generada con la primera edición. Dado el éxito de las visitas teatralizadas, se vuelven a

incorporar en el puente del 1 de noviembre, con actividades paralelas como el túnel del terror realizado en el centro de interpretación. Estas actividades y visitas se mantienen continuamente durante los años posteriores gracias a la buena acogida del público.

En 2015 se realiza un curso de formación de guías para cuevas turísticas en las instalaciones del centro de Interpretación, contando con parte del personal de la cueva en el equipo docente.

En 2016 se inicia también en verano la primera semana de la Prehistoria, con actividades recorridos y visitas dedicadas a este aspecto de la cueva. Otras actividades desarrolladas en los años posteriores han sido conferencias y talleres hechos con motivo del Día Mundial del Agua, Día Mundial de las Cuevas y del Mundo Subterráneo. Estos años el Centro de Interpretación de la cueva de las Güixas, ha acogido también las XXVII Jornada Científica SEDECK, y otras jornadas y cursos de espeleología.

En 2017 se inicia desde cueva de Güixas un proyecto de investigación a cargo de Reyes Giménez, geóloga y parte fundamental de nuestro equipo, en colaboración con el Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC) y otro proyecto por el Gobierno de Aragón a través de la empresa pública SARGA para el seguimiento de los quirópteros de la cueva de las Güixas.

La cueva de Güixas recibe los premios de Excelencia Turística Tripadvisor y Red Aragón entre 2015 y 2017.

Conclusiones

La cueva de las Güixas se encuentra en Villanúa y es un referente del turismo subterráneo desde principios del siglo XX, con épocas más oscuras debido a la Guerra Civil y otras, como en la actualidad, con gran aguje. El hecho de que el ayuntamiento de la localidad asuma la gestión a través de la empresa municipal Turismo Villanúa, ha permitido un gran desarrollo de la cueva como activo turístico local, dinamizando la economía de la zona y generando un activo turístico muy atractivo para el visitante. La gestión efectiva y eficaz de la cavidad, así como la apuesta por la innovación y la mejora de la calidad de las visitas, ha generado un aumento muy notable del número turistas, con una cifra nada despreciable en 2017 de entorno a 28.000 visitantes. No obstante, el equipo de trabajo que da cobertura a la cueva y el ayuntamiento de la localidad, siguen intentando mejorar tanto, las visitas turísticas en armonía con la conservación de la cavidad, por lo que, entre otras cosas, se ha apostado por la realización de diversos estudios científicos por parte de diferentes organismos como IPE del CSIC o el Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Agradecimientos

Este trabajo es fruto de la colaboración directa del personal que trabaja en la cueva del las Güixas y el ayuntamiento. Además, quiero hacer extensible mi gratitud a toda la familia de la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE) por el apoyo constante a cualquier iniciativa desde y para la cueva y su entorno.

Referencias

Bru, L. 2006. *Brujas en el Pirineo Fantástico*, 126.

Dueso, J. 2015. *Leyendas de Brujas en el Pirineo Fantástico*, 182.

M. Dr. El Kadiri, *et al.*, 2018. La Grotte du Chameau, Valle de Zegzel, Marruecos. Proyecto de apertura turística. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 353-362.

La Grotte du Chameau, Valle de Zegzel, Marruecos. Proyecto de apertura turística

M. Dr. El Kadiri⁽¹⁾, M. El Ahamadi⁽¹⁾, A. Ros⁽²⁾, J.L. Llamusi⁽³⁾, J.M. Calaforra⁽⁴⁾, A. Sánchez⁽⁵⁾
y J. Amoros⁽⁶⁾

(1) Fundación Valle du Zegzel – Marruecos phelkadiri@gmail.com, lafermeelahmadi@gmail.com

(2) CENM-naturaleza cenm@cenm.es

(3) jl.llamusi@gmail.com

(4) Universidad de Almería jcalafor@ual.es

(5) albasanchezesteban@gmail.com

(6) Huma Architecture j.amoros@huma.es

RESUMEN

El proyecto de apertura turística y de investigación de la Grotte du Chameau, Marruecos, Región Oriental, Berkane, valle de Zegzel. Cavity conocida en la región, fue la primera gruta abierta al público en Marruecos en 1948, declarada patrimonio nacional en 1951 actualmente se encuentra cerrada al público. La cavidad es de grandes dimensiones, con grandes salas y cúpulas en los techos por la que discurre un río de agua intermitente en el fondo y cuyo origen es hidrotermal. Su recorrido se realiza a través de tres pisos, en su interior pasarelas y escaleras comunican estos pisos que fueron instaladas en 2015 dentro de un programa de la PNUD (*Programme des Nations Unies*) donde se acondicionó su interior parcialmente dotándola de iluminación, pasarelas y escaleras para su recorrido turístico. Actualmente un proyecto de colaboración con equipo formado por especialistas españoles, franceses y marroquíes, bajo la dirección de Mohamed Dr. El Kadiri y los gobiernos locales y regionales continúan con la puesta en marcha de la apertura y el diseño de una zona turística en el entorno de la Grotte du Chameau, en este proyecto se incluyen visitas turísticas, centro de investigación, laboratorio subterráneo, y centro de actividades al aire libre prevista su apertura para el año 2019. Un proyecto que pretende ser la punta de lanza turística de la Región Oriental de Marruecos, en el valle de Zegzel provincia de Berkane y donde se esperan más de 80.000 visitantes anuales.

Palabras clave: Grotte Chameau, Marruecos, Zegzel.

The Grotte du Chameau, Zegzel Valley, Morocco. Tourist opening project

ABSTRACT

Touristic and research opening project of the Grotte du Chameau, Morocco, Eastern Region, Berkane, Zegzel Valley. Cavity known in the region, was the first grotto open to the public in Morocco in 1948, declared a national heritage in 1951 and currently closed to the public. Cavity of large dimensions, with large rooms and domes on the roofs, a river of intermittent water in the bottom, cavity of hydrothermal origin. Its route is made through three floors, inside walkways and stairs communicate these floors. Installed in 2015 within a program of the UNDP (Program des Nations Unies) where its interior was partially equipped with lighting, walkways and stairs for its tourist route. Currently a collaborative project with a team consisting of Spanish, French and Moroccan specialists, under the direction of Mohamed Dr. El Kadiri and local and regional governments continue with the implementation of the opening and design of a tourist area in the surroundings of the Grotte du Chameau, this project includes tourist visits, research center, underground laboratory, and outdoor activities center scheduled for opening in 2019. A project that aims to be the tourist launch point of the

Eastern Region of Morocco, in the valley of Zegzel province of Berkane and where more than 80,000 annual visitors are expected.

Keywords: *Grotte Chameau, Morocco, Zegzel.*

Historia

La Grotte du Chameau, antiguamente conocida como la Grotte du Bourbah (1908), es una de las primeras cavidades exploradas en Marruecos y es conocida por ser la primera cueva turística de Marruecos. En 1948 se realiza un primer estudio de la gruta por la Société S` espeleologique du Maroc a petición del sindicato de iniciativas de Oujda, y se abre al público iluminándola e instalando escaleras para comunicar los diferentes pisos de la cavidad, (Groupe Spéléo Bagnols Marcoule, 1984). En 1951 fue declarada como Patrimonio Nacional, cerrándose al público ese mismo año.

En 1971, es explorada por J-P Cantet que realiza una topografía y bucea el sifón sur de 50 m (Groupe Spéléo Bagnols Marcoule, 1984). En 1980. B & J. Lips realizan una nueva topografía con un desarrollo de 600 m, (Groupe Spéléo Bagnols Marcoule, 1984). En 1982 el Groupe Spele de l'Aragnado realiza una exploración en el sifón alcanzando 415 m de longitud y -13m de profundidad, por lo que la cavidad alcanza un desarrollo total de 1150 m (Groupe Spéléo Bagnols Marcoule, 1984).

En 2008 la cueva de Chameau fue incluida en un proyecto cultural y de desarrollo integrado para la Región Oriental, proyecto DÉLIO II, cofinanciado por la Agencia Oriental y el Programa de las Naciones Unidas (PNDU). En este programa se renueva la instalación eléctrica y se dota a la cavidad de nuevas pasarelas y escaleras que hacen posible la visita de los tres pisos que tiene la cavidad, finalizado en 2015 sin que llegara a abrirse al público.

En 2016 con las iniciativas público-privadas continúa las actuaciones en la gruta y su entorno, con un equipo de especialistas españoles, franceses y marroquíes para poner en valor la cavidad y realizar las acciones necesarias para su apertura al público. Se crea la Fundación Valle du Zegzel, y actualmente se están realizando diversas evaluaciones y estudios técnicos y científicos en la cavidad. Se prevé la apertura parcial en 2018 y definitiva para el año 2019.

La Grotte du Chameau

La Grotte du Chameau está ubicada en la región Oriental de Marruecos, en las montañas de Béni-Snasse macizo de l'Arhil Acham, valle de Oued Farrouj, afluente de Oued Zegzel. Su acceso se realiza a través de la carretera P-6012 que une las localidades de Berkane y Tafoughalt. Situada en la base del acantilado de calizas dolomíticas del Lías, sobre el barranco del lecho del río Farrouj (Bourbah) a 1 km del Valle Zegzel (figura 1 A y B).

La cueva está formada por tres pisos de grandes galerías, con acumulación de numerosas cúpulas en los techos de grandes dimensiones, sobre todo, en las zonas superiores (figura 3 B), en la parte inferior discurre un río intermitente que se activa durante las épocas de lluvias y vuelve a



Figura 1. A: situación Grotte du Chameau. B: Valle de Zegzel.

secarse pasados unos días. Las aguas de esta surgencia tienen una temperatura de unos 26 °C y la cavidad tiene una temperatura media anual de 18 °C.

Su desarrollo supera los 1500 m y tiene dos entradas separadas por unos 20 m de altura. La entrada inferior es una gran boca por donde sale el agua en épocas de crecidas (figura 2, A). Se encuentra cerrada actualmente al público.

Su acceso actual se realiza por la entrada superior a través de un sendero acondicionado (figura 2 B). Esta entrada es de menores dimensiones que la inferior y en su interior se encuentra acondicionado para el acceso de las visitas con escaleras y un camino cementado (figura 4 A y figura 3 C). En el margen derecho de la entrada se puede ver una formación con silueta de camello que da nombre a la cavidad (figura 4, B). Antiguamente, se conocía con el nombre de Grotte de la Bourbah (1908) y otros nombres menos conocidos son (Tasarrakout, Magharat al Jamal) (fuente local M. El Ahamadi). Hoy es conocida como Grotte du Chameau o Jamal.



Figura 2. A: Entrada inferior. B: Camino de acceso a la entrada superior (fotos: A. Ros y J. L. Llamusi).

Por la entrada superior, se accede al tercer piso de la cueva, una galería de grandes dimensiones, (figura 4 A), en la que se observan techos con numerosas cúpulas de convección de gran tamaño (figura 3 B), al final de la misma se llega a un gran pozo de unos 30 m de diámetro y 40 m de profundidad, desde el que se ve el río intermitente al fondo. Un balcón formado por una estructura metálica y escaleras (realizadas dentro del proyecto PNDU, 2015), permite ver el lecho del río subterráneo al fondo. Enfrente se encuentra la galería Nadia recientemente explorada y por la que hay que pasar utilizando cuerdas y sistemas de seguridad, teniendo que pasar por la cornisa de las paredes aéreas para acceder. Actualmente no es visitable (figura 4 C).

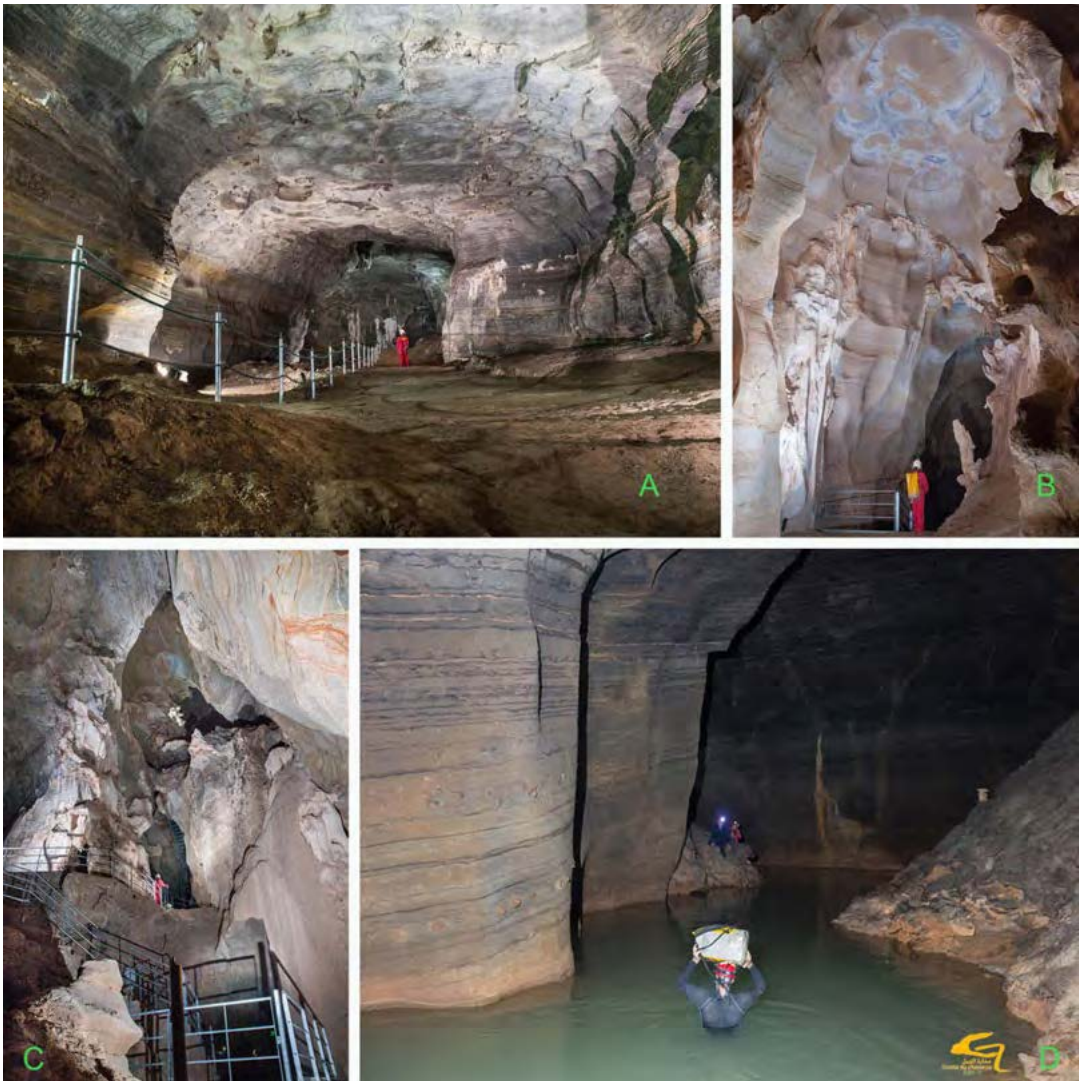


Figura 3. A: galería del Balcón, piso inferior. B: piso superior, con cúpulas en el techo. C: escaleras de comunicación de los tres pisos de la cavidad. D: galerías inferiores en épocas de crecidas, zona deportiva. (fotos: A. Ros y J. L. Llamusi).

El acceso al segundo piso de la cavidad se realiza a través de las escaleras metálicas instaladas para la visita turística, (figura 4 C y figura 3 C). Esta galería llamada Amélineau, se sitúa debajo de la entrada. Al fondo tiene un importante relleno de rocas procedentes del exterior que cierra lo que puede ser una antigua boca de la cueva (figura 4 D) y en la que se ha previsto limpiar este relleno para abrir de nuevo y facilitar el acceso directo a la cavidad, pasando a ser esta la entrada de las visitas (apertura prevista en la segunda fase de actuación). Con esta actuación, se evitará la subida del sendero y la bajada de las escaleras metálicas interiores. En la galería Amélineau al Sur, existe una pequeña galería anexa con una sala y en el lado contrario, norte, unas estrechas galerías comunican con el piso inferior.

Al finalizar la bajada de las escaleras en la galería Amélineau y en dirección este, una pequeña bajada nos conduce a una amplia galería en dirección sur. Aquí se abre la galería del Balcón, de grandes proporciones (figura 3 A), que llega hasta un balcón que termina en una pared de unos 5 m hasta la base del río, que es la parte final de la zona para la vista turística. Bajando esta pared y continuando en dirección sur la cavidad continúa a favor del río, hasta que termina en una zona sifonada. En esta zona, se han explorado recientemente 300 m bajo por debajo del agua hasta llegar a nuevas galerías aéreas (figura 4 E). Es una zona de la cavidad que se sigue explorando en la actualidad. En épocas de crecida del río esta galería resulta intransitable por el elevado nivel que llegan a alcanzar las aguas (figura 3 D).

Volviendo a la base de la terminación de las escaleras de bajada, en su parte más baja se llega a una sala circular con un lago, que durante las crecidas se desborda y circula por la galería que conduce al exterior en dirección norte y con un recorrido de 150 m hasta la salida exterior inferior, siendo intransitable en periodos de crecidas. Actualmente, se encuentra cerrada al público (figura 4 F).

Proyecto de apertura

Desde 2016 un equipo de especialistas de España, Francia y Marruecos inician conjuntamente los estudios y trabajos para la puesta en valor y apertura de la cavidad bajo la dirección de Mohamed Dr. El Kadiri, las autoridades locales, regionales y estatales. Este proyecto es una de las principales acciones para el desarrollo de las poblaciones del valle de Zegzel.

El valle de Zegzel se caracteriza por ser un valle angosto y de paredes verticales con una flora singular donde predomina el "Araar" *Tetraclinis articulata* y numerosos endemismos (MedWet-Coast Maroc, 2003). Hay presentes además cultivos tradicionales en el fondo y en los laterales del valle, destacando el cultivo del nispero muy apreciado y de gran calidad. Es un lugar propicio para el senderismo, la bicicleta de montaña y otras actividades de naturaleza. Se sitúa a pocos kilómetros de las localidades de Berkane y Saidia. Es un valle poco conocido fuera de la región y con muchas posibilidades para el turismo activo de naturaleza con la presencia de la Grotte du Chameau como atractivo turístico principal.

La Grotte du Chameau tiene con un recorrido de unos 1500 m y un desnivel de 51 m. De este recorrido, entorno a 600 m serán habilitados para el turismo. La cavidad se divide en tres plantas. Las galerías superan los 20 m de altura y por ella transcurre un río intermitente de agua caliente

que presenta formas típicas en las paredes de una cavidad hidrotermal y, sobre todo, espectaculares cúpulas de convección en los techos.

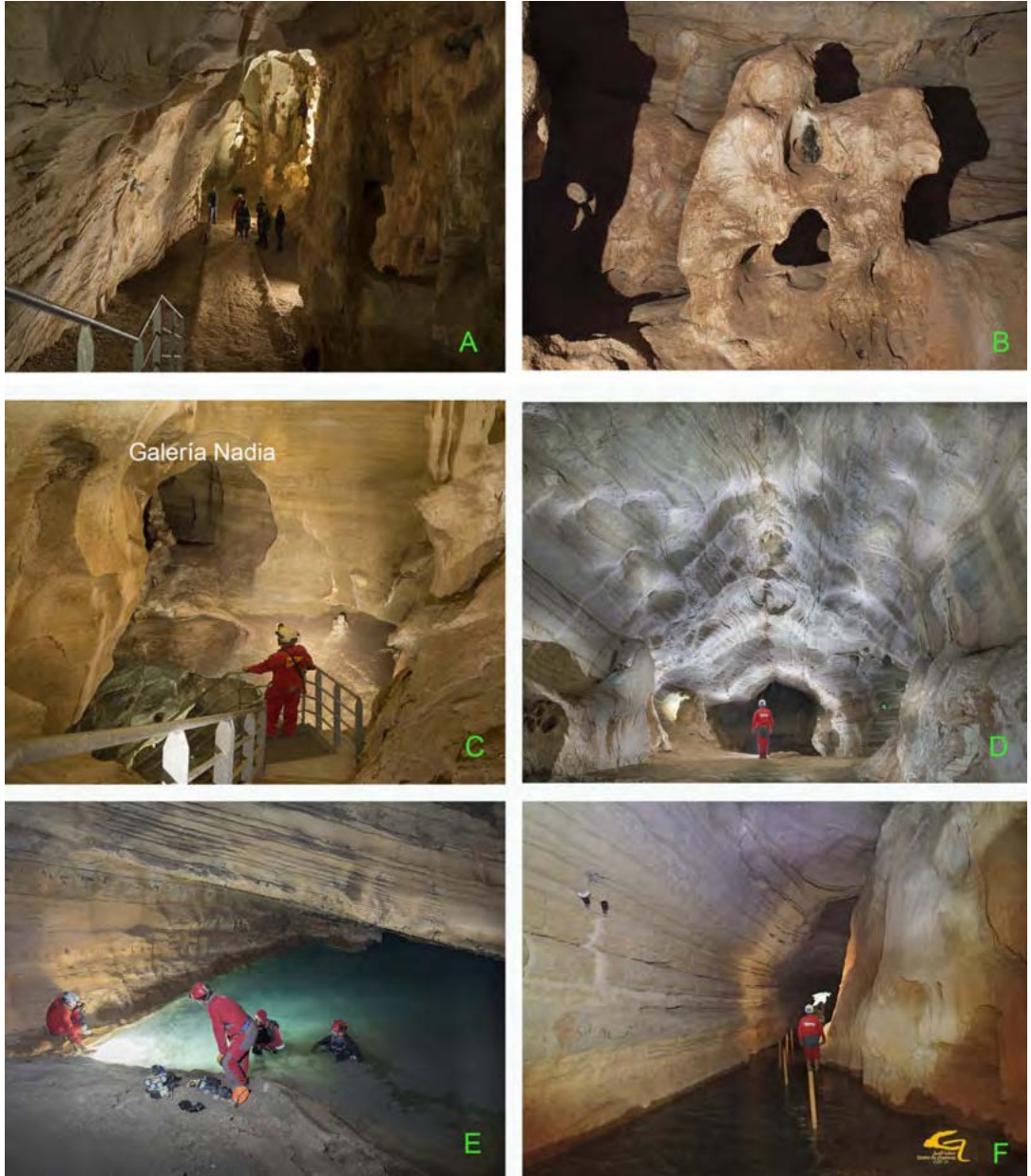


Figura 4. Grotte du Chameau (Marruecos). A: acceso al piso superior. B: espeleotema conocido como “el Camello”. C: balcón del piso superior y escaleras de bajada a pisos inferiores, al fondo galería Nadia. D: galería Amélineau, al fondo relleno exterior ocultando antigua boca de la cavidad. E: buceadores en el sifón final. F: galería de salida al exterior en el piso inferior, en periodo de inundaciones (fotos: A. Ros y J.L. Llamusi).

Las obras realizadas durante el año 2105 permiten un recorrido accesible para visitar los tres pisos de la cavidad, si bien hay previsto un nuevo acceso, que facilitará los recorridos para personas discapacitadas, junto a un reacondicionamiento interior de iluminación y servicios para su nueva apertura, como es la instalación de audio-guías y las exposiciones interactivas. La reforma de la iluminación será realizada con luminarias LEDs, más eficientes y adecuadas para el entorno subterráneo. La instalación de equipamientos multimedia y los sistemas de audio-guías en varios idiomas permitirán tener una cavidad moderna y actualizada, facilitando las visitas a cualquier persona.

Las instalaciones de equipamiento interior se complementarán con servicios y equipos para la investigación convirtiendo a la Grotte du Chameau en la primera cavidad de Marruecos que se ha transformado en un laboratorio subterráneo, que permitirá la continuidad de los trabajos de investigadores internacionales de varias universidades sobre el origen hidrotermal de la cavidad y otros aspectos arqueológicos, biológicos, etc. Esto supondrá además de las visitas de uso público, la facilidad para la realización de trabajos de investigadores en diferentes líneas científicas relacionadas con la cueva y su entorno. La instalación de sistemas de audio-guías en varios idiomas y una red de fibra óptica interior permitirán, entre otros servicios, poder realizar visitas en cualquier idioma e incorporar los equipos de investigación a una red *online* para estudios a distancia. Estas instalaciones y equipamientos convertirán a esta cavidad en la más moderna y accesible de todo Marruecos y será referente mundial del norte de África.

Zona turística

La cueva se encuentra en un entorno de gran afluencias de turismo y próxima a localidades como Berkane, Saidia, Nador, Melilla y Oujda, siendo la Grotte du Chameau una referencia de visita turística de primer orden para estas localidades lo cual, además, permitirá que numerosos visitantes accedan al valle. Cerca de la cavidad destaca un lugar importante para el turismo, en la zona es la costa, municipio de Saidia. Es la mayor zona de turismo estival en esta parte de Marruecos y multiplica la población en los meses de verano. Está ubicada a tan solo a 45 km de la Grotte du Chameau y será un importante atractivo para los turistas, por lo que se estima alcanzar un número de visitantes entorno a los 80.000 anuales en los tres primeros años. La incorporación de actividades adicionales (escalada, senderismo, vías ferratas, servicios) harán aumentar el turismo y será, sin lugar a dudas, un importante punto de referencia turística de Marruecos.

Conjunto exterior

Concepto

La intervención respeta en todo momento el lugar, al tiempo que garantiza los servicios necesarios para que el entorno Grotte du Chameau pueda ser musealizado. Teniendo siempre presente que el valor del lugar reside en el interior de la cavidad, los elementos arquitectónicos incorporados han de ser discretos, miméticos con el entorno, tratando de potenciar siempre la valía existente en el interior de la cueva.

El lugar se entiende como un espacio rodeado de montañas y naturaleza. La arquitectura se convierte en un elemento exterior que debe convertirse en una modelos para que el visitante perciba la existencia de ese mundo fantástico escondido bajo tierra, convirtiéndose en un hito que sirva como punto de reclamo que marque la existencia del museo (figura 5).

Urbanización del entorno

El proyecto organiza toda el área mediante diferentes usos y tratamientos que garantizan la visita al monumento. Para ello, se generan dentro del complejo recreativo los siguientes usos: Edificio de usos múltiples, quioscos y tiendas, baños, restaurante, parking, caminos peatonales y caminos de acceso rodado.

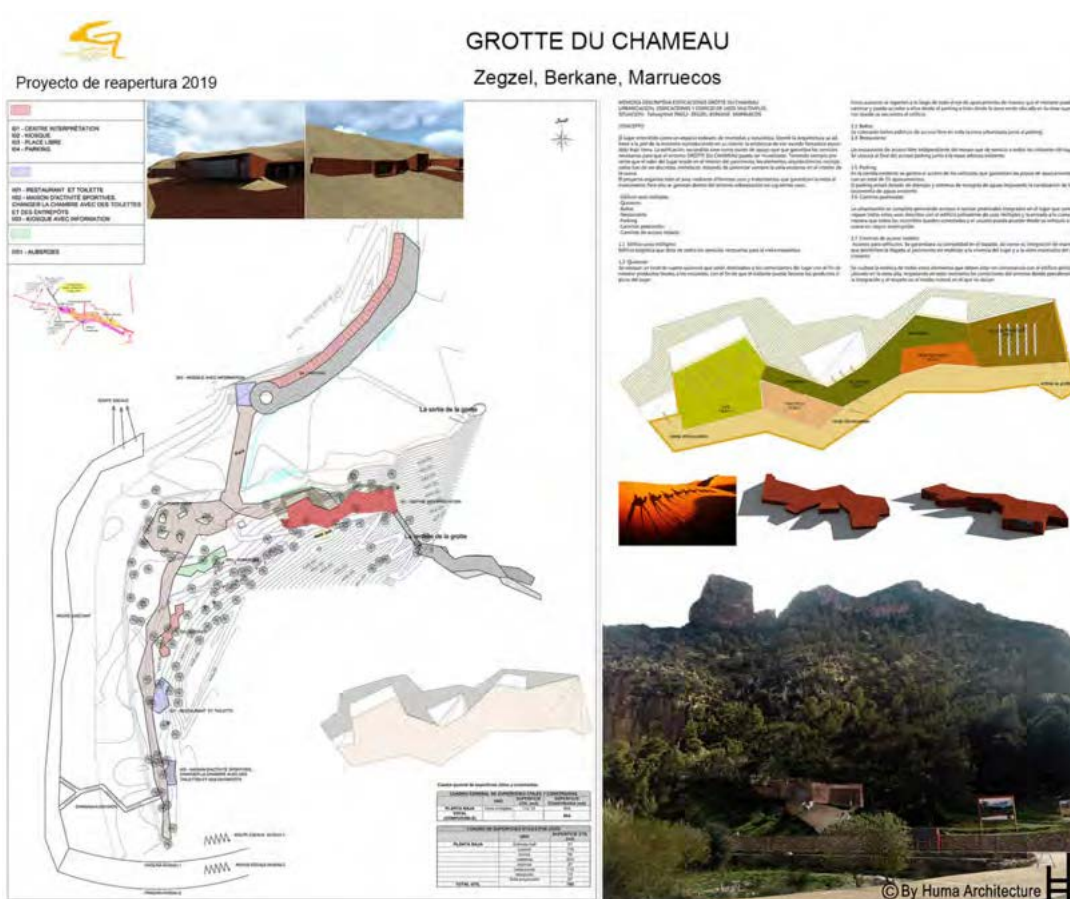


Figura 5. Proyecto de actuaciones entorno al exterior de la Grotte du Chameau (diseño Human Architecture).

Edificio de usos múltiples

El edificio de usos múltiples dota de función logística al yacimiento albergando los espacios comunes entendidos como antesala al espacio museístico existente en el interior de la cueva. Interiormente, el edificio comienza con un gran vestíbulo de entrada que será un espacio diáfano. Una zona abierta donde se puede mostrar paneles explicativos o colocar una tienda de souvenirs. Anexo a este espacio, se ubica la zona de baños y aseos.

Se crea una gran área de restauración con una cafetería y un restaurante. Ambos espacios, tienen una parte cubierta interior para mesas, y existe la posibilidad de salir también al exterior que está acondicionado con terrazas. La zona de cocinas y almacenamiento conecta ambos espacios. Tras estos espacios comunes se ubica el control de entrada que supone el inicio oficial de la visita museística. Un espacio polivalente donde se puede proyectar algún audiovisual tematizado sobre los hallazgos o información sobre la cueva.

La idea principal es que los visitantes inicien el recorrido desde el edificio y salgan ya al exterior para entrar en la cueva sin que existan discontinuidades, garantizando la continuidad museística (figura 5).

Exteriormente, el edificio trata de mimetizarse con el entorno de manera que quede estar perfectamente integrado. Para ello, se utilizan materiales del lugar, al tiempo que se le dota de un lenguaje acorde al momento actual. El resultado final es una envolvente que rememora el perfil de un "camello" presente en la colina del lugar. Es como si ese perfil vertical de la montaña lo tumbásemos y así se generase el edificio. En el interior se coloca gran cantidad de cristales, permitiendo generar un espacio luminoso al tiempo que el visitante sienta el entorno desde el interior del edificio.

Conclusiones

La cavidad es muy conocida en la región, de fácil recorrido, enormes proporciones, una singular belleza y un río termal intermitente. Las actuaciones previstas dentro y fuera de la cavidad, crearan un entorno interpretativo, turístico e integrado en el medio natural, por lo que pasará a convertirse en un referente turístico de carácter internacional. La Grotte du Chameau supone para la región y el valle de Zegzel un notable incentivo turístico donde se esperan superar las 80.000 visitas anuales, siendo uno de los atractivos turísticos más importantes de la región y dando lugar a un desarrollo de primer orden para la zona oriental de Marruecos. Las previsiones de apertura se estiman para 2019.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a todo el equipo de trabajo de la Grotte du Chameau; Diego Jódar, Michel Renda, Marie Renda, Philippe Audra, Alejandro Gómez, Alexander Charpko, Daniel Chailloux, Boukou Abdel, Ramón Azorín, Lionel Barriquand, Jean Marie Chauvet. Y las colaboraciones de: Angel Fernández, Fernando Gázquez, José L. Carcelén, Vicente Guardiola, Roberto Trives.

M. Dr. El Kadiri, *et al.*, 2018. La Grotte du Chameau, Valle de Zegzel, Marruecos. Proyecto de apertura turística.

Referencias

Groupe Spéléo Bagnols Marcoule, 1984. *Boletín GSBM núm. 11*, Francia.

MedWetCoast Maroc 2003. *Phase Diagnostic Rapport de Synthèse site "Massif des Béni Snassen"*. Maroc.

M.P. García Fidalgo, *et al.*, 2018. Evolución de la visita turística en la cueva de Valporquero (1966-2017). En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 363-376.

Evolución de la visita turística en la cueva de Valporquero (1966-2017)

M.P. García Fidalgo y O.M. Altable Argüelles

Diputación de León, Servicio de Turismo, Plaza de Regla s/n, 24071 León.
director.valporquero@dipuleon.es; ovidio.altable@dipuleon.es

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar la evolución de la visita a la cueva de Valporquero, desde su apertura al público en julio de 1966, hasta el último ejercicio cerrado correspondiente al año 2017. Una breve descripción de los antecedentes desde su apertura al público en general, la actividad que se desarrolla como servicio turístico y su progresiva adaptación a los gustos y demanda del cliente, el funcionamiento ordinario, las instalaciones actuales de que se dispone, los medios personales con los que se cuenta y una aproximación a la proyección futura de la actividad en cueva. La incorporación de las nuevas tecnologías en las relaciones con los clientes potenciales es básica en este aspecto. Se hará una breve referencia a las adaptaciones relativas a la prevención de riesgos laborales y a conjugar la explotación turística con la conservación de la cavidad.

Palabras clave: cueva turística, evolución, gestión, visitas.

Evolution of the tourist visits in the Valporquero cave (1966-2017)

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the evolution of the Valporquero Cave since its public opening in July of 1966 until the last closed exercise which matches with 2017. A brief description of the history since it was opened to the general public, the activity that is developed as a tourist service and its progressive adjustment to public's likes, the usual operation, installations that are current available, personal ways we have and an approximation of the future forecast of the new activities at the Cave. The integration of new technologies in the relationship with potential clients is fundamental in this aspect. There will be a short reference to the adaptations relative to the workplace hazard prevention and to the combination of the tourist exploitation with the cave 'preservation.

Keywords: *evolution, management, show cave, visits.*

Introducción

La cueva de Valporquero se encuentra ubicada al norte de la provincia de León, a 44,5 km de la capital, en la cara sur de la Cordillera Cantábrica. La boca de la cueva se sitúa a una altitud de 1.309 m s.n.m. La localidad que le da nombre, Valporquero de Torío, es una pequeña pedanía del municipio de Vegacervera. Las coordenadas geográficas de la entrada de la cueva son: coordenadas UTM x: 2910804 y: 4753566, Huso 30.

El clima de la región leonesa donde se ubica la cavidad es de tipo templado húmedo. En la zona de la cueva existe una alta pluviosidad (1.300 mm de media anual). La carga nival depositada entre noviembre y abril en la cuenca del arroyo de Valporquero comienza a fundirse en primavera, aumentando notablemente el caudal en el interior de la cavidad en esta época. La temperatura en el interior se mantiene entre 7,1 y 7,7 °C en el aire y 7,5 y 8,5 °C en el agua. La humedad relativa está en torno al 95-99% y el pH del agua está comprendido entre 8 y 8,3.

El complejo kárstico se desarrolla sobre la caliza de las formaciones geológicas de Barcaliente y Valdeteja, que se encuentran profundamente drenadas por el río Torío. Existe una gran diferencia de desnivel (500 m) entre la Sierra del Gato, donde se desarrollan las formas externas de absorción y el drenaje de conexión con el valle fluvial. Las formas de absorción están representadas por dolinas y pequeños poljes.

Titularidad y gestión administrativa: sistema de gestión

La cueva de Valporquero está gestionada por la Diputación Provincial de León desde su apertura al público el 31 de julio de 1966, siendo esta institución la encargada de la ejecución de los trabajos de acondicionamiento previos y del posterior mantenimiento y regulación de las visitas (figura 1). Se integra en el Servicio de Turismo de la Diputación como una unidad administrativa más estando, por lo tanto, sujeta en su funcionamiento a la legislación vigente para las administraciones públicas, como entidades locales menores.



Figura 1. Ilustración de una excursión a la cueva de Valporquero a mediados del siglo XX.

Legislación aplicable

Dado, pues, el carácter de Administración Pública sobre la gestión de la cueva, se le aplica la legislación vigente, en especial la relativa a recursos humanos (R.D. Legislativo 5/2015 de 30 de octubre Texto Refundido de la Ley del Estatuto Básico del Empleado Público), contratación (Ley 9/2017 de 8 de noviembre de Contratos del Sector Público), prevención de riesgos laborales (Ley 31/1995 de 8 de noviembre de Prevención de Riesgos Laborales) y ordenanzas fiscales (Ordenanza Fiscal de la Diputación de León nº 13 reguladora de la tasa por prestación de servicios a los visitantes de la cueva de Valporquero y a los participantes en el Curso de Aguas de la misma que accedan por la zona turística de 2 de junio de 2016).

Esta sujeción normativa y las características de una gestión pública directa presentan beneficios e inconvenientes que se pueden resumir en un control exhaustivo tanto, de los gastos como de los ingresos, el acceso del personal que presta sus servicios según capacidad, mérito e igualdad, la poca agilidad en la toma de decisiones, la lentitud en la adaptación a nuevas tecnologías y en los cambios de modelo de gestión diaria.

Medio ambiente

La cueva se encuentra ubicada dentro del espacio natural Hoces de Vegacervera del Plan de Espacios Naturales de la Castilla y León según Decreto 94/2004 (pendiente de desarrollar), así como la Reserva de la Biosfera "Los Argüellos" según Declaración de junio de 2005 por parte de la UNESCO y sujeta a la Ley 4/2011 de directrices de Ordenación de ámbito subregional de la Montaña Cantábrica Central en Castilla y León. Estas figuras y reglamentaciones por un lado suponen, una garantía en la obligatoriedad de velar por la conservación del espacio natural y, por otro lado, imponen una serie de restricciones a la hora de realizar determinadas actuaciones en beneficio de los visitantes.

La cueva de Valporquero y su visita

Características generales de la cueva

En el interior de la cavidad nos encontramos con una temperatura durante todo el año alrededor de 7 °C con variaciones de ± 1 °C y una humedad que siempre supera el 90%, por lo que el diseño de los recorridos pretende acomodarse a las características ambientales descritas.

La cueva tiene dos niveles, un nivel superior perfectamente habilitado a la visita turística (caminos, puentes, escaleras, señalización e iluminación), con siete salas denominadas Pequeñas Maravillas, Gran Rotonda, Hadas, Cementerio Estalactítico, Gran Vía, Columna Solitaria y Maravillas.

El acceso a la cavidad se realiza por una sola boca de cueva, realizándose posteriormente un recorrido longitudinal relativamente recto, que finalmente es necesario desandar hasta la salida. El recorrido tiene una longitud de 1,5 km desde el control de acceso hasta el final de la cueva, al que hay que añadir el regreso, sumando en total unos 3 km con 480 escalones entre diferentes subidas y bajadas.

Por este recorrido turístico del nivel superior las visitas se realizan en grupos más o menos numerosos y siempre acompañados por un guía, no contemplándose el acceso libre de los visitantes. La orografía y amplitud del interior de la cavidad permiten el cruce de los distintos grupos de visita en zonas bien dimensionadas, por lo que el inconveniente de disponer de una misma entrada y salida puede paliarse razonablemente.

El nivel inferior de la cueva se denomina también Curso de Aguas, ya que está actualmente transitado por el arroyo de Valporquero y es uno de los cursos subterráneos transitables más famosos en España. En este nivel se desarrolla la actividad de turismo subterráneo o espeleoaventura, que se realiza con empresas de turismo activo debidamente acreditadas, autorizadas por la Diputación de León y con experiencia suficiente.

Visita única durante el siglo XX

Centrándonos en los recorridos turísticos (los más numerosos) desde el inicio de la apertura al público en 1966, la gestión ha variado a lo largo de los años. En un primer momento, las visitas recorrían todas las salas habilitadas al público, siendo estas inicialmente en la zona de Pequeñas Maravillas, Gran Rotonda, Cementerio Estalactítico y Gran Vía. Desde los años 70 las visitas se amplían a Columna Solitaria y Maravillas.

La visita única en los años 70 del siglo pasado contaba ya con una longitud de unos 3 km, una duración de unas 2 horas y 480 escalones, a recorrer en unas condiciones de temperatura entorno a los de 7 °C y humedad superior al 90%.

La visita única contaba con las siguientes ventajas:

- Menor número de grupos de visita diarios, positivo para el número de guías necesario cada día.
- Todos los usuarios visitaban todas las zonas habilitadas al público, sin distinción.

Por el contrario, tenía los siguientes inconvenientes:

- Número excesivo de visitantes por grupo, en especial en temporada alta (Semana Santa, festivos, julio, agosto), lo que originaba un difícil manejo de grupos y una baja operativa y movilidad.
- Incapacidad para que las explicaciones del guía llegaran a todos los visitantes.
- Duración excesiva de la visita, en un largo recorrido con frío y elevada humedad.
- Falta de control de los visitantes en el interior, con el consiguiente riesgo ambiental y personal.

Todo esto originaba un inicio de visita de fuertes y espectaculares sensaciones que, poco a poco, tras la reiteración de salas y formaciones y un recorrido excesivamente largo y abrupto, a baja temperatura y elevada humedad, se iban transformando en cansancio y terminaban conformando una visita en la que el recuerdo principal era negativo, de cansancio y dificultad, no de belleza y espectacularidad.

Visita en sistema de "situación"

Además de esta visita única anteriormente comentada, cuando la previsión de visitantes era lo bastante numerosa como para no poder organizar suficientes grupos incluir a todos los visitantes, se ponía en marcha el denominado sistema de "situación". Este sistema consistía en ubicar a los guías en diferentes salas, a lo largo de la cueva y de manera permanente durante varias horas, para ir dando paso a los visitantes en intervalos de 10 minutos, en grupos de 30 o 40 personas, siendo recibidos por estos guías con las explicaciones correspondientes y a medida que se desplazaban a través de la cueva. Esto era muy negativo, tanto para la seguridad de los visitantes como para la protección de la propia cueva, así como para la calidad de la visita en sus explicaciones y organización.

Visitas diversificadas en el siglo XXI

A finales del siglo pasado se estudiaron nuevos y diferentes sistemas de visita, para, tras un periodo de pruebas, en el año 2002 poner en marcha un sistema de gestión de visitas con dos tipos de recorrido diferenciados en función de su longitud y tiempo en el interior.

Recorrido interior corto-visita normal

Visita de las cinco primeras salas con una duración aproximada de una hora que se realiza todos los días de apertura al público con una frecuencia de entre 20 y/o 50 minutos, en función de la afluencia de visitantes. Este recorrido está orientado básicamente a los grupos organizados de escolares y excursiones de agencias de viaje, grupos de la tercera edad, campamentos y visitantes que no desean mucho tiempo y recorrido de visita. El número de visitantes máximo por grupo es de 60 personas.

La operativa de esta visita es la siguiente: para grupos organizados se requiere reserva previa vía fax o correo electrónico asignando en la confirmación de la reserva enviada por el servicio turístico una hora prevista de inicio; en estos casos el pago de las entradas se puede efectuar por adelantado o el mismo día de la visita en la taquilla de la cueva, pero siendo una única persona la encargada de realizarlo para todo el grupo. Para particulares desde la taquilla de la cueva, se van asignado horas de inicio en función la necesidad. El pago de las entradas se realiza en la taquilla de la cueva el mismo día de la visita, figurando en los tickets, además de la tarifa correspondiente, la hora de inicio de la visita. Para estos turnos de visita, se da un tiempo mínimo de 20 minutos entre el comienzo de una visita y la siguiente, al objeto de facilitar un tránsito sin agobios de los visitantes, ofrecer unas explicaciones sin interferencias y no solaparse e interrumpirse los grupos.

Recorrido interior largo-visita especial

Visita de las siete salas existentes con una duración aproximada 1 hora y 30 minutos o 1 hora y 45 minutos, que se realiza entre dos y cuatro veces al día. El resto de horario diario se ocupa

con las entradas de recorrido normal. Este recorrido está básicamente orientado a particulares con interés en el turismo subterráneo que disponen de tiempo suficiente.

La visita de recorrido largo se oferta al público explicando las características de la misma, su larga duración, su longitud y número de escalones, y las condiciones de baja temperatura y elevada humedad. El número de visitantes máximo por grupo es en este caso de 60 personas.

La operativa de esta visita es la siguiente: para grupos organizados se requiere reserva previa vía fax o correo electrónico, asignando en la confirmación de la reserva enviada por el servicio turístico una hora prevista de inicio; en estos casos el pago de las entradas se puede efectuar por adelantado o el mismo día de la visita en la taquilla de la cueva, pero siendo una única persona la encargada de realizarlo para todo el grupo. Para particulares, como ya se indica en el epígrafe anterior, existen unos turnos prefijados de visita de los que se van vendiendo las entradas hasta completar los cupos de visita.

Las entradas para este recorrido se pueden adquirir previamente en el módulo de venta online de nuestra página web o el mismo día en la taquilla de la cueva. El número de visitas de recorrido largo varía en función de la demanda, si bien, se realizan una media de dos visitas en días de diario y tres durante los fines de semana.

Visita Valporquero Insólito

Con motivo de la preparación de actividades para la conmemoración del 50 Aniversario de la apertura al público de la cueva de Valporquero por parte de la Diputación en el año 2016, se valoró realizar una nueva visita, más especializada, de cupo más restringido y recorrido muy especial, para satisfacer la demanda de un espectro de visitantes que buscan algo más que un simple paseo, unas explicaciones más o menos científicas o lúdicas y la contemplación de las formaciones de la cavidad.

Las posibilidades que ofrecía la cueva de Valporquero para poder satisfacer esta nueva demanda eran muchas, dadas las todavía existentes posibilidades de ampliación del recorrido turístico existente. Posibilidades que empezaban por el acceso turístico a zonas normalmente no visitables, mediante muy escasa habilitación, pasando por la incorporación de explicaciones más rigurosas y nuevas sensaciones.

La puesta en marcha en el mes de junio de 2016 de la visita denominada “Valporquero Insólito” requirió, además, la instalación parcial de un sistema de alumbrado LED que permite el apagado y encendido instantáneo, la sectorialización de diferentes tramos, el estudio de los tiempos de tránsito y la ejecución de algunas pequeñas obras de adecuación de caminos, escaleras e iluminación.

Las características del tipo de visita Valporquero Insólito son las siguientes:

- Grupos de como máximo 15 personas.
- Recorrido, ida y vuelta, superior a 3 Km, con más 600 escalones.
- Tiempo de visita medio de 2 horas y 45 minutos.

- Visitas en turno único a las 09:20 horas, los jueves, sábados y domingos, ya que exigen la oscuridad en la cueva y no pueden coincidir con el resto de visitas del día.
- Recorrido habilitado para la visita, pero con cierta exigencia física (recomendado para mayores de 12 años).
- Recorrido de ida con frontales y sin iluminación (se facilitan cascos con frontales individuales).
- Recorrido de vuelta, por el mismo trayecto y con toda la iluminación encendida.

Un juicio crítico de este tipo de visitas, resulta:

- En el recorrido de ida, a oscuras, proporcionando pequeños frontales a los visitantes y con un grupo reducido, el Guía ofrece explicaciones muy directas, inclusivas y a la carta, interaccionando con todos los miembros del grupo e implicándolos y vinculándolos con la cueva, con su formación, sus características y su conservación. Con la escasa luz las explicaciones cobran importancia y se vuelven sustanciales, destacan los detalles más cercanos y se aprecia el silencio y el ambiente subterráneo. Domina la curiosidad y la expectativa de lo desconocido, de lo oculto tras la luz de los frontales. Esto que hace que el visitante se identifique con la propia cueva y el grupo se apiñe, atienda las explicaciones sin desviar su atención y valore detalles que con la iluminación encendida pasan desapercibidos.
- Al final del recorrido de ida, tras un minuto de silencio con oscuridad total, todas las luces se encienden manifestándose la grandiosidad de la cueva. El recorrido de vuelta se vuelve completamente diferente, revelando las verdaderas magnitudes de cada sala y cada galería, mostrando la infinidad de colores y formaciones, y suscitando el asombro del grupo hasta el final de la visita.

Por otro lado, Valporquero Insólito permite ver y sentir la cueva de dos formas completamente diferentes, además de provocar la plenitud de sensaciones en la parte final del recorrido. A pesar de tener una duración cercana a las 3 horas y de recorrer más de 3 km a 7 °C y el 99% de humedad, las encuestas de satisfacción de los usuarios de esta visita son hasta la fecha excelentes (figura 2 derecha).

Dadas las especiales características de esta visita, las entradas se adquieren exclusivamente en el módulo de venta online de la página web de Valporquero, con al menos un día de antelación, quedando normalmente completadas.

Visita espeleoturística: el curso de aguas de Valporquero

Con el auge de lo natural y la vuelta a los deportes de aventura, se han desarrollado en este siglo XXI numerosas actividades de naturaleza, cercanas y complementarias a la visita a una cueva turística. Son visitas o recorridos de espeleobarranquismo o espeleoturismo, senderismo, escalada, y otras muchas que, cada vez cobran más adeptos y se asientan y especializan en todo el mundo.

Valporquero también ofrece una visita deportiva, de aventura, que combina la diversión del barranquismo con el misterio del mundo subterráneo. Sin necesidad de experiencia ni conocimientos técnicos especiales, solamente con una forma física aceptable, es posible



Figura 2. Vaciado del sumidero (izquierda). Grupo de Valporquero Insólito 2018 (derecha).

descender por el río de Valporquero a través de grandes galerías, toboganes naturales, saltos de agua, lagos subterráneos, rápidos y cascadas (figura 3).

Durante tres o cuatro horas esta emocionante visita transmite una cascada de sensaciones de difícil descripción, resultando un completo éxito y con una demanda en aumento. Desde principio de siglo ya han pasado más de 50.000 personas por el curso de aguas de Valporquero, a pesar de la estacionalidad obligada por el invierno y de los cupos máximos de espeleoturistas establecidos por grupo y por día (figura 4).

Actualmente, las visitas espeleoturísticas se realizan a través de empresas privadas ajenas a la Cueva de Valporquero y el Servicio de Turismo, pero mediante una autorización expresa y condicionada de la Diputación de León, que asegura la capacitación de las empresas y personas que las prestan, así como el respeto al medio hipogeo, garantizando la seguridad de los usuarios.

A pesar de la crisis de los últimos años y en contra del descenso de otro tipo de visitas, la evolución de la visita espeleoturística del curso de aguas en Valporquero ha sido positiva según se puede apreciar en el cuadro de la figura 4.

Visita exterior, la “Ruta del Exokarst”

También al inicio del presente siglo, se diseñó y señaló en Valporquero una ruta exterior denominada “Ruta del Exokarst” para ofrecer al visitante la visión externa de la cueva y el paisaje kárstico (figura 5).

En el entorno inmediato a la cueva se habilitó un sendero circular, de aproximadamente una



Figura 3. Curso de aguas; actividad de espeleoturismo.

hora de recorrido, con ocho paradas o puntos de interés dotados de señalización y paneles informativos, que inician al visitante en el conocimiento del karst, en el origen y formación de las cuevas.



Figura 4. Evolución del número de visitantes entre 2000 y 2017 en el curso de aguas de la cueva de Valporquero.

Puntos como: 1 - Gran dolina. Merenderos. 2 - Entrada a la cueva. 3 - Panorámica desde la Atalaya. 4 - Alineaciones de dolinas de disolución y lapiaz. 5 - Uvala. 6 - Relieves residuales. 7 - Dolina de disolución. 8 - Lapiaz

Se trata de una visita o recorrido gratuito, controlado pero no acompañado por los guías, que resulta un complemento indispensable a la cueva, ya sea mientras el público espera su turno de entrada o tras realizar la visita interior y como reconocimiento o paseo por el entorno.

Ámbitos de actuación de la Cueva de Valporquero

Con todas las actividades y visitas hasta ahora descritas, que se desarrollan en Valporquero, se pretenden cubrir ámbitos de actuación encaminados a ofrecer a los visitantes un abanico básico capaz de colmar las demandas y expectativas de los clientes, cubriendo sobre todo el ocio, la cultura y el deporte.

- Ocio: Visita interior lúdica, por recorridos diferenciados y bien habilitados, de fácil acceso, iluminación de seguridad y artística, y explicaciones amenas. Servicios exteriores de todo tipo, cuidado entorno natural y actividades alternativas (rutas, exposiciones, etc.)
- Cultura: visita educativa con las paradas adecuadas y explicaciones técnicas, simples y asimilables, que contribuyan a la información y educación de los visitantes, con unos recursos humanos cualificados, así como con el apoyo, en el exterior, de exposiciones temáticas y proyecciones de documentales en la sala de audiovisuales.
- Deporte - Aventura: El nivel inferior de la cueva de Valporquero permite desarrollar una actividad deportiva que numerosos grupos de espeleología de toda España vienen a realizar,



Figura 5. Ruta del Exokarst.

el descenso por el río subterráneo de Valporquero y la sima de Perlas. Permite también la visita espeleoturística, o descenso activo por el curso de aguas de Valporquero, espectacular y muy singular a nivel nacional e incluso internacional. Algunas rutas de senderismo en la zona completan el ámbito deportivo, cuya estrella es indudablemente el “descenso del Curso de Aguas de Valporquero”

A la par, de intentar incluir siempre estos ámbitos de actuación en nuestros recursos turísticos subterráneos, es necesario, cada vez más, atender la demanda de los diferentes tipos de usuarios/clientes potenciales y ofrecer visitas a la carta, exclusivas, actualizando las visitas a cada nuevo tipo de demanda-cliente que se pueda identificar.

El visitante de las cuevas turísticas, como el de turismo rural, ha ido evolucionando y creciendo con el paso del tiempo y ya no busca solamente un simple paseo de naturaleza y ocio por el interior de una cavidad, busca un añadido de emociones y conocimientos, sobre todo cuando debe realizar un desplazamiento “ex profeso” hasta las cuevas, normalmente ubicadas en zonas rurales y de montaña, un tanto aisladas. La demanda de “sensaciones”, sobre todo si son “compartidas” cada vez está más presente en la demanda y exige actualizar y diversificar nuestra oferta con nuevas formas de visita.

La aplicación de las nuevas tecnologías es ya fundamental para los clientes, no sólo en la gestión diaria y la promoción del recurso, sino también en el desarrollo y contenido de la visita y las explicaciones. Hologramas, audioguías, reproducciones, visitas virtuales y un sinnúmero de nuevas posibilidades que, innovando, compondrán una oferta más competitiva.

Recursos humanos y económicos de la cueva de Valporquero

En los poco más de 50 años de apertura al público de la cueva de Valporquero, los recursos humanos adscritos a la misma también han ido evolucionando, en función de los servicios al público que se iban prestando, y más especialmente en función de la evolución de las visitas y los visitantes.

La diversificación de las visitas y de los servicios en el exterior del complejo turístico, obligan a contar paulatinamente con un mayor número de personas e incluso a modificar horarios y hacer más compleja la gestión de los recursos humanos.

La evolución del personal en Valporquero ha tenido sus puntos de inflexión en los momentos de cambios en los tipos y sistemas de visitas. Así, desde su apertura hasta el presente siglo se mantuvo el número de trabajadores, con carácter temporal, fijo discontinuo.

Con el nuevo siglo y la diversificación de visitas y servicios, se reforzó mediante la transformación de parte de los trabajadores, pasando de fijos discontinuos (temporada) a fijos a tiempo completo, además de aumentar la plantilla. El pasado año, tras la celebración del 50 aniversario y con la prestación de nuevos servicios al público, como la nueva visita Valporquero Insólito, se ha reforzado la prestación mediante la transformación de toda la plantilla de fijos discontinuos en fijos a tiempo completo, lo que permite ahora compensar horarios excesivos en temporada alta, mediante descansos y vacaciones en temporada baja y periodos de cierre.

	GESTIÓN	TAQUILLA	GUIAS	MANTENIMIENTO
1966	1 tiempo parcial	1 temporada	7 temporada	1 tiempo parcial
1988	1 tiempo parcial	1 temporada 1 refuerzo	7 temporada	1 temporada
2002	1 tiempo completo	1 tiempo completo 1 temporada	4 tiempo completo 4 temporada 2 refuerzo	1 tiempo completo
2017	1 tiempo completo	2 tiempo completo	10 tiempo completo	1 tiempo completo

Tabla 1. Estructura del personal de Valporquero desde 1966 hasta 2017.

Para analizar todo esto, es necesario tener en cuenta que la cueva de Valporquero es gestionada directamente desde una administración pública que, si bien persigue el equilibrio económico en sus prestaciones de recursos turísticos, también debe garantizar y dar prioridad a la calidad de la prestación, la conservación de la cavidad y el desarrollo socioeconómico de la zona.

Actualmente la estructura de personal adscrita a la cueva de Valporquero es la siguiente, con los siguientes cometidos (tabla 1):

- 1 técnico de gestión: organización de los trabajos, implantación y seguimiento de las instrucciones de la empresa, control del personal, ejecución del presupuesto.
- 2 taquilleras – auxiliar administrativo: cobro de las entradas, gestión de las reservas, atención al público, estadísticas de visitantes y arqueos de caja.
- 10 guías: acompañamiento a los grupos de visita a la cueva, atención al público, mantenimiento y conservación de las instalaciones.
- 1 oficial Electricista: mantenimiento de las instalaciones eléctricas, apoyo al resto de las categorías.

Los ingresos y gastos del servicio turístico de la cueva de Valporquero han evolucionado en función del número de visitantes y del presupuesto de gastos de personal y gastos corrientes. Los gastos de personal han evolucionado en función de lo comentado anteriormente y los corrientes en función de la evolución de las prestaciones al público e infraestructuras, que en una zona aislada de montaña, donde hay que mantener y garantizar todo tipo de infraestructuras básicas para los usuarios, son actualmente muy elevados. *Grosso modo*, la tabla 2 muestra los ingresos y gastos desde 1967.

	Año 1967	Año 2000	Año 2010	Año 2017
Gatos generales	5.409,11 €	48.446,38 €	103.688,90 €	93.383,99 €
Gastos de personal	1.630,43 €	155.280,38 €	402.977,28 €	417.287,17 €
Total gastos	7.039,54 €	203.726,76 €	506.666,18 €	510.671,16 €
Ingresos	7.462,59 €	245.715,67 €	336.384,36 €	501.768,15 €

Tabla 2. Presupuestos de la cueva de Valporquero entre los años 1967 y 2017.

Evolución de visitantes en la cueva de Valporquero

En cuanto a los visitantes a la cueva de Valporquero, en general trasluce fundamentalmente una evolución mantenida, señalando especialmente el grave periodo de crisis atravesado durante de los últimos años, donde el descenso de visitantes llegó hasta un 30% (figura 7).

Ya desde el pasado 2015, se invierte la tendencia y se van recuperando las mejores cifras de visitantes, superando ampliamente en el año 2016 los 70.000 visitantes y alcanzando en 2017 un record absoluto en la historia de la cueva con 76.175 visitantes, posiblemente distorsionado por las numerosas actividades y promociones realizadas durante 2016, con la celebración del 50 aniversario de la apertura al público de la cavidad (tablas 3 y 4).

Año 1967	Año 2000	Año 2010	Año 2017
40.000 visitantes	68.530 visitantes	59.176 visitantes	76.175 visitantes

Tabla 3. Evolución del número de visitantes entre 1967 y 2017 en la cueva de Valporquero.

TIPOS DE RECORRIDOS	LARGO	NORMAL	REDUCIDA	TOTALES
ADULTOS	23.039	22.150		45.189
GRUPOS	496	198		694
NIÑOS Y CARNÉ JOVEN	5.898	4.996		10.894
AGENCIAS DE VIAJE	2.261	1.853		4.114
ASOCIACIONES 3ª EDAD			4.015	4.015
ESCOLARES Y CAMPAMENTOS			6.316	6.316
CURSO DE AGUAS			3.789	3.789
VALPORQUERO INSOLITO	1.164			1.164
TOTAL	32.858	29.197	14.120	76.175

Tabla 4. Distribución del tipo de visitantes según el tipo de recorrido en el año 2017.



Figura 7. Evolución del número de visitantes entre 2000 y 2017 en la cueva de Valporquero.

El número de visitantes, además de ser sensible a los periodos de expansión y contracción económica general, a resaltar la tendencia observada en los intervalos comprendidos entre los años 2.000 a 2.006 tendencia levemente positiva, 2.007 a 2.014 peores años de la crisis económica y 2.015 a 2.017 inicio de recuperación (figura 7), también puede presentar variaciones por motivos climatológicos (una Semana Santa con mal tiempo puede suponer 2.500 visitantes menos).

Referencias

- Durán, J. J. y Heredia, N. 1997. *Estudio de la Cueva y el karst de Valporquero*. Instituto Geológico y Minero de España y Diputación de León.
- Heredia, N. y Quintana, L. 2006. *Evolución geológica de la Cueva de Valporquero y su entorno, León*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Ficha del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG) CA009. 2009. *Complejo kárstico de Valporquero*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Rodríguez, L.R. y Heredia, N. 1994. *Mapa Geológico de la Provincia de León”, escala 1/200.000*. Instituto Geológico y Minero de España y Diputación de León.
- García Fidalgo, M. P. y Altable Argüelles O. 2010. *Gestión directa de una Cueva turística por parte de una administración local. La Cueva de Valporquero (León)*. En: J. J. Durán y F. Carrasco (Eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*. 47-62. Madrid. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.
- Tomé, J., Fernández Lozano, J. y Muñiz, P. 2016. *Valporquero 1966-2016 Paisaje, Cultura y Símbolo, 50 años de ilusión sostenida*. Diputación de León LE. 300-2016

La gestión em las cuevas turísticas iberoamericanas

H.A. Santos Lobo

Grupo de pesquisas DemandaTur – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Brasil. heroslobo@ufscar.br

RESUMO

As cavernas turísticas são produtos diferenciados em meio à oferta do turismo de natureza, em função de suas características intrínsecas e do imaginário coletivo da sociedade sobre o ambiente subterrâneo. Na atualidade, dois extremos podem ser claramente observados na gestão das cavernas turísticas: as cavernas de visitação massificada, remetendo a modelos ultrapassados de turismo; as cavernas com controle extremo da visitação, com a gestão sendo conduzida por uma visão preservacionista do ambiente. Ambos extremos não atendem às necessidades e desejos dos consumidores atuais e emergentes, os quais buscam novos padrões de serviços, valorizam a sustentabilidade em todas as suas dimensões e que vivem numa sociedade cada vez mais inserida no mundo virtual. Pensando nestes aspectos do novo perfil de consumo, são feitas algumas sugestões e levantadas possibilidades sobre quais seriam as melhores estratégias de gestão para atender as expectativas dos consumidores, buscando manter ou aumentar o fluxo de visitação nas cavernas turísticas iberoamericanas.

Palavras-chave: estratégias de gestão, perfil da demanda, turismo subterrâneo.

Management of iberoamerican show caves

ABSTRACT

Show caves are differentiated products amidst the nature tourism offer, due to their intrinsic characteristics and the collective imaginary of society about the underground environment. At the present time, two extremes can be clearly observed in the management of tourist caves: show caves of mass visitation, referring to outmoded tourism models; and show caves with excessive control of visitors, with the management being driven by a preservationist vision of the environment. Both extremes, do not meet the needs and desires of current and emerging consumers, who seek new service standards, value sustainability in all its dimensions and who live in a society increasingly inserted in the virtual world. Thinking about these aspects of the new consumption profile, some suggestions are made and possibilities are raised on what would be the best management strategies to meet the expectations of consumers, seeking to maintain or increase the flow of visitation in Iberoamerican show caves.

Keywords: cave tourism, demand profile, management strategies.

Introdução

As cavernas são recursos naturais que geram curiosidade nos seres humanos, em função de suas especificidades espaciais, ambientais, ecológicas e sistêmicas (Gillieson 1996; Lobo et al., 2010; Cigna e Forti, 2013). Em função disso, ao longo dos últimos séculos foram sendo desenvolvidos roteiros turísticos em cavernas, os quais se iniciaram por curiosidades científicas e paisagísticas e se adensaram em função do crescimento exponencial do turismo no mundo todo. Ao longo

dos tempos, o aumento nos fluxos de visitação levou ao consequente aumento dos impactos negativos no ambiente subterrâneo, sobretudo em função do desconhecimento prévio de sua capacidade de suporte e resiliência (Pulido-Bosch *et al.*, 1997; Cigna e Burri, 2000). Com isto, durante décadas, com ênfase no final do século passado e na primeira década do século presente, o estudo das cavernas turísticas tem sido focado nos impactos negativos da visitação (e.g. Cigna, 1993; Pulido-Bosch *et al.*, 1997; Calaforra *et al.*, 2003). Por consequência, muitas vezes tais estudos são utilizados sob a justificativa de “estabelecer limites” adequados para o uso (Calaforra *et al.*, 2003; Fernández-Cortés *et al.*, 2006 a). Neste contexto, órgãos ambientais de diversos países têm promovido ou utilizado tais estudos sob a perspectiva de que o turismo é danoso ao ambiente subterrâneo, devendo ser limitado e, por vezes, até inibido.

Este enfoque é obviamente necessário, mas precisa ser balanceado sob a perspectiva dos impactos positivos do turismo e da ampliação do conhecimento científico sobre a dinâmica do ambiente subterrâneo, a qual se desenvolve em uma magnitude mais restrita em relação à maioria das demais paisagens na superfície terrestre. Por outro lado, esta magnitude raramente é menor que a dinâmica possível de ser estabelecida pela visitação turística, em função tanto das características dos seres humanos (peso, temperatura, tipo e quantidade de problemas que pode gerar) quanto de uma nova perspectiva mais sustentável (Swarbrooke, 2000) de uso turístico.

Partindo deste cenário, a presente reflexão foi produzida com o objetivo de compartilhar a visão do autor sobre as principais características e tendências atuais de gestão do turismo aplicadas às cavernas. Para tanto, será feita uma exposição do estado atual da compreensão sobre a gestão do turismo em cavernas e apontamentos sobre possibilidades futuras, algumas ainda de pouca aceitação e passíveis de crítica, sobretudo pela adoção de posturas conservadoras de gestão ambiental e de uma visão romântica sobre o turismo em cavernas. A reflexão foi feita com base na experiência e vivência do autor, tanto de estudos e pesquisas que vêm sendo desenvolvidos desde 2003 quanto de visitas em cavernas turísticas no âmbito Iberoamericano (Brasil, Chile, México e Espanha) e em outras regiões do mundo (Itália, Eslovênia, Rep. Tcheca, Eslováquia, Áustria e Turquia).

Cenário atual da gestão de cavernas turísticas: a era dos extremos

Em muitos lugares do mundo, a visitação de cavernas se inicia por meio de exploradores independentes, os espeleólogos. Estes pesquisadores formais ou aventureiros de final de semana são pessoas que se apaixonam pelo ambiente subterrâneo e transformam o processo de descoberta e visitação de cavernas em seu hobby ou até mesmo profissão. Com o tempo, não é raro que os espeleólogos sejam, em suas respectivas realidades, os incentivadores iniciais para o início da visitação de uma caverna, levando amigos e parentes. Por vezes, acabam se tornando “guias”, muitas vezes informais, destes locais que vão se transformando em atrativos turísticos. Com o passar do tempo, mais e mais pessoas tomam conhecimento destes atrativos e começam a buscá-los, gerando os primeiros fluxos formais de turismo para uma caverna. O aumento do número de pessoas leva ao necessário aumento na oferta de serviços, os quais começam a serem pensados a partir das necessidades básicas dos visitantes, como hospedagem, alimentação, transporte, condução e segurança. Nem sempre se estabelece um procedimento de gestão em paralelo, levando tempo para que esta se estabeleça e, por vezes, de modo corretivo.

Em tempos atuais, muitas das cavernas turísticas que passaram por esta história em seu processo de formalização da visitação recebem maior atenção da sociedade. A ampliação da consciência ambientalista na população p s-Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente, em 1992, ampliou a preocupação com as consequências das atividades humanas (Giacomini Filho, 2004). Com isso, também a gestão das cavernas turísticas ganhou outros contornos, sobretudo com forte tendência conservacionista. Este aspecto não é colocado com um problema, pois entende-se a necessidade de conservar o ambiente subterr neo *per si*, independente de seu interesse para o uso humano. Todavia, a gestão conservacionista passa a ser problem tica quando se reveste de pressupostos que nem sempre possuem comprovação científica e que encontram eco entre técnicos, especialistas e cientistas de diversas áreas do conhecimento. Tais pressupostos basicamente classificam o turismo como uma atividade danosa, tendo por base muitas vezes as propostas de turismo dos anos de 1970-1990, as quais nem sempre continuam em uso. O próprio processo de conscientização da sociedade tem alterado o comportamento dos turistas em áreas naturais, tanto pelo seu próprio desinteresse na visitação desordenada (turismo de massa (Gabrieli, 2017)) quanto pela sua compreensão de que o adensamento na visitação por vezes será inevitável, dada a magnitude de interesse de um determinado sítio natural. Assim, observa-se que nem todo "turismo de larga escala"   um "turismo de massa", embora sob os olhos de órgãos gestores conservacionistas, esta diferença não seja considerada.

Com isso, o foco da gestão muitas vezes tem sido na limitação da visitação. Esta limitação é tanto numérica (com a definição de quantidades de visitantes por unidade de tempo, a capacidade de carga (Cifuentes, 1992; Lobo, 2015) quanto comportamental. Em algumas cavernas turísticas, existem tantas regras sobre o que "não se pode fazer" que é de se imaginar se o visitante chega a perceber o que pode vir a fazer, ou mesmo se poderá aproveitar a atividade, mesmo com tantas limitações que lhe são impostas. Assim, estes roteiros de cavernas turísticas tem se tornado despersonalizados e massificados, pois as regras tendem a ser as mesmas em diferentes locais do mundo. A expectativa de diferença possível ao se visitar uma caverna em um país na América ou na Europa pode ser perdida, em função da adoção de "padrões de gestão" que fazem os roteiros de turismo em cavernas parecer produtos em série feitos por um processo fabril do século XX.

H  também o outro lado desta mesma hist ria. Em certos países, a ausência de regulações sobre o uso das cavernas confere total liberdade   gestão, o que nem sempre é positivo. Alterações demasiadas no ambiente, excesso de visitantes e desorganização estão entre os frutos deste processo (Cigna e Burri, 2000; Gillieson, 2011). Com isso, também se perde em qualidade, tanto da visitação quanto do ambiente subterr neo, podendo levar ao comprometimento de ambos no médio e longo prazo.   este o turismo em cavernas que queremos?

A questão se faz necessária, pois estamos em uma nova era de consciência e consumo, que mudar  ainda mais e cada vez de forma mais rápida. Se nos concentrarmos em pensar a gestão das cavernas turísticas apenas em bases tradicionais e retrógradas, poderemos perder cada vez mais o interesse dos visitantes. Isto é ruim também para a conservação, pois cada vez mais a sociedade cobra justificativas para o emprego de recursos (humanos, materiais, financeiros) para fins conservacionistas. Se menos pessoas se interessarem pelas cavernas, como serão convencidas de sua importância?

Não temos a solução para toda esta problematização, mas temos uma linha de raciocínio que pode ajudar mentes mais iluminadas e focadas na solução de problemas a pensar em propostas que possam contribuir para a melhoria da gestão das cavernas turísticas. Para isso, vamos expor os pontos principais desta linha de raciocínio nas próximas seções.

Cavernas como diferenciais no turismo de natureza

A gestão adequada de cavernas turísticas se inicia com o conhecimento das características do ambiente subterrâneo e sua interface com a superfície (Lobo *et al.*, 2013). Tanto em cavernas que serão abertas para a visita quanto naquelas em que o turismo já está consolidado, é necessário que se conheçam as características do ambiente, em aspectos tais como: geológico, geomorfológico, hidrológico, espeleológico, climático, paleontológico, arqueológico, biológico, ecológico e cultural. Este conhecimento serve tanto para se identificar eventuais fatores demasiadamente frágeis ou singulares, de forma a estabelecer limites de uso para estes casos, quanto para se levantar as possibilidades de uso público (Lobo *et al.*, 2013). Para o caso de ambientes mais frágeis, nos quais a presença humana possa causar danos severos (e.g. Fernández-Cortés *et al.*, 2006b; Bastian e Alabouvette, 2009), entende-se a necessidade de limitação extrema ou mesmo proibição da visita. Para os demais casos, um dos aspectos mais importantes destes levantamentos é a identificação de oportunidades de visita nas quais o visitante possa conhecer aspectos únicos do ambiente subterrâneo. Para tanto, é preciso compreender as cavernas como lugares diferenciados, em dois “níveis de encantamento”, assim denominados para efeito de diálogo.

O primeiro nível de encantamento é a diferença entre os ambientes subterrâneos gerados pelas cavernas e os ambientes “ao ar livre” da superfície terrestre. A existência de paredes e teto, que são os condicionantes elementares de uma caverna, leva a criação de um ambiente diferenciado na superfície terrestre, privado da incidência direta da luz solar na maioria dos casos. Este aspecto diferencia as cavernas dos demais sítios naturais e da própria concepção ocidental de natureza, a qual é baseada no ideário cristão do jardim do Éden (Diegues, 2000) e nas influências do Romantismo (Moretti, 2001). De um modo geral, as imagens associadas à natureza são de luz, temperatura amena, amplitude espacial, aspectos mais evidenciáveis em paisagens como praias, campos e montanhas. Nas cavernas, observa-se o oposto: escuridão, temperaturas acentuadas em relação à média da região onde se encontra, espaços confinados. Estes aspectos, embora gerem repulsa em determinada parte da população, são exatamente os fundadores da imagem fundamental das cavernas enquanto atrativo turístico: um ambiente que representa um grau maior de diferenciação ou mesmo de aventura a quem o visita, independente de sua dificuldade de acesso ser efetiva. No entanto, na maioria dos casos este primeiro nível não é suficiente para diferenciar uma caverna das outras. Calcar-se apenas nele pode ser arriscado sob a ótica da manutenção de uma caverna turística no longo prazo, pois à medida que esta foi visitada, já foi possível conhecer tais características e, exceto por uma paixão maior despertada, a curiosidade já foi desfeita.

A gestão precisa, então, estar atenta ao segundo nível de encantamento, que é aquele que difere uma caverna da outra. Basicamente, há duas formas de se atingir este nível: pelas características intrínsecas do ambiente ou pela proposta de visita realizada.

As características intrínsecas são aquelas que tornam uma caverna única, mas que nem sempre são encontradas em todas as cavernas. Normalmente estão ligadas às suas singularidades biológico-evolutivas ou à manifestação de outros fenômenos ambientais, ou ainda aos seus superlativos. Grandes pórticos de entrada, grandes volumes internos, espeleotemas extensos, volumosos ou diferenciados, cachoeiras subterrâneas, troglóbios visíveis e curiosos estão entre os elementos que podem representar estas singularidades. Muitas vezes, a mera existência de uma destas características é suficiente para tornar a caverna mais atrativa que as demais, de sua região ou mesmo do mundo todo. Exemplos clássicos são as larvas *glow worms* em cavernas da Nova Zelândia, o conjunto de pinturas rupestres de Lascaux na França e de Altamira na Espanha ou mesmo o pórtico de acesso da gruta Casa de Pedra, no Brasil, com seus 215 m de altura.

As propostas de visitação também podem se configurar como o fator de diferenciação de uma caverna em relação às demais. Aqui se encontram situações distintas, algumas de difícil ou improvável reprodução em tempos atuais, como o trem de acesso à caverna Postojna, na Eslovênia. Mas outras formas de acesso inusitadas também se destacam, como os roteiros em embarcações flutuantes (por exemplo, na coves de Sant Josep, Espanha), os roteiros com o uso de técnicas verticais, como no abismo Anhumas, Brasil, ou ainda os roteiros de flutuação ou mergulho, para o que os cenotes mexicanos são exemplos abundantes e com diversos níveis de qualidade e intensidade.

Para além das formas de acesso, pode-se pensar também no bom uso de procedimentos interpretativos, nos quais as características do ambiente subterrâneo são apresentadas de forma diferenciada, sem a perspectiva tradicional de uma "aula de campo". Esta concepção nos parece ser a mais acertada para a diferenciação da maioria das cavernas entre si, considerando que nem todas possuem características físicas que permitam a implantação de roteiros inusitados baseados nas formas de acesso, como trens, embarcações ou cordas. Assim, resta à gestão a responsabilidade de desenvolver um roteiro que seja atrativo e interessante, mas que consiga fugir à perspectiva mais presente hoje no processo de condução de visitantes, que é a reprodução de uma aula convencional em um ambiente diferenciado. Este procedimento pode até funcionar bem quando se tratam de roteiros escolares, nos diferentes níveis, nos quais o objetivo da visitação é realmente o estudo do ambiente. No entanto, muitas vezes o processo de condução de escolas é também reproduzido com os turistas que estão em passeio de lazer, o que é aqui compreendido como um equívoco. Muitas vezes, na ânsia de compartilhar o conhecimento e de transmitir o seu próprio encantamento com o ambiente subterrâneo, planejadores e gestores pensam o roteiro como se estivessem montando um curso de pós-graduação. Por sua vez, os guias e condutores, imbuídos desta mesma vontade, se sentem como responsáveis por lecionar para os visitantes sobre todos os conhecimentos que arduamente adquiriram em seu processo de formação. O resultado disso é uma interpretação ambiental pesada, muitas vezes calcada no excesso de elementos e terminologias técnicas, que fogem ao interesse da população em geral. A oportunidade de se encantar acaba sendo perdida ou subaproveitada. Para este aspecto, infelizmente faltam ainda exemplos de excelência, que mostrem o contrário. Assim, nos parece que é o campo que mais pode ser bem explorado no âmbito da gestão dos roteiros de turismo subterrâneo.

Além disso, é preciso ficar atento nas tendências do mercado de turismo e do turismo de natureza, de um modo geral. Os consumidores têm buscado suprir outras necessidades e vontades quando viajam à lazer. Se isto não for considerado, todo o esforço de planejamento e gestão

pode ser perdido ou pouco aproveitado, deixando as cavernas turísticas literalmente às escuras. Nas próximas seções, discutiremos brevemente sobre algumas destas tendências.

Novas tendências gerais do mercado de turismo

De um modo geral, o mercado de turismo de lazer vem mudando em grande velocidade e de forma drástica, sobretudo a partir da virada do presente século. Se durante o século passado as grandes mudanças no turismo se deram em função à evolução na forma e eficiência nos meios de transporte (Barbosa, 2002), observa-se que no presente século a evolução ocorre na forma, eficiência e criatividade na prestação dos serviços, em conjunto com a evolução tecnológica do mundo virtual (Trigueiro, 2008; Pires, 2010; Cunha, 2011). Além disso, a virada do século trouxe também, ainda que por necessidade, um aumento na preocupação com a conservação do ambiente, gerando leis cada vez mais robustas e intensas de consumidores que têm sido classificados como “sustentáveis”.

Tais mudanças refletem significativamente no mercado de turismo, como estudos sobre o cenário atual e tendências têm mostrado. Um bom exemplo que consolida algumas destas tendências é o estudo *10 Tendências para Viagens e Turismo na América Latina em 2018* (Edelman e Panrotas, 2018). Embora suas colocações sejam feitas para um território definido, algumas delas podem ser bem aproveitadas para a realidade do turismo subterrâneo, de um modo geral.

Dentre as 10 tendências apontadas no referido estudo, destacam-se algumas que diretamente podem contribuir para a gestão das cavernas turísticas. A primeira a ser destacada é o denominado *volunturismo*. As novas gerações de consumidores, sobretudo os *millenials*, são pessoas que querem, além de satisfazer seus próprios interesses, fazer diferença nos contextos em que interagem. Isso inclui o turismo, o que se evidencia por meio das iniciativas de volunturismo mundo afora. Os dados da pesquisa mostram que hoje, no mundo, existem aproximadamente 10 milhões de turistas voluntários – devendo chegar à 20 milhões até 2020 –, os quais movimentam 2 bilhões de dólares atualmente. Grande parte deste público é composto por mulheres com menos de 30 anos que viajam sozinhas. Para atender este público, mais do que conhecer seu perfil, é preciso reconhecer o que buscam. Assim, as cavernas turísticas que quiserem conquistar uma fatia deste mercado precisam adaptar ou criar atividades para possibilitar o envolvimento dos visitantes em aspectos ligados à sustentabilidade social ou ambiental em seus serviços turísticos.

Também mantendo o foco nas novas gerações de consumidores, as cavernas turísticas precisam entrar de vez na revolução digital. Aqui cabem diversos aspectos, começando pela propaganda ativa em redes sociais, passando pelo monitoramento e interação em plataformas colaborativas de viagens e culminando em aplicativos como intermediadores da experiência de visitação. Estes três primeiros aspectos já são, em maior ou menor grau, desenvolvidos por algumas cavernas turísticas, embora devam ser itens mínimos e obrigatórios em todos os empreendimentos turísticos em cavernas que queiram se manter no ritmo e nas tendências do consumidor atual. Em outras palavras: este nível de atenção ao mundo digital não é mais inovação, é quase que uma obrigação. Além disto, o estudo feito pela Edelman e Panrotas (2018) apresenta outra faceta do mundo digital e virtual: a conversão da realidade virtual para a *realidade aumentada* no âmbito do turismo, a segunda tendência ora destacada.

Embora as tendências de consumo no turismo apontem que os viajantes estão usando cada vez mais a realidade aumentada em suas viagens e até mesmo no processo de decisão de compras, superando a realidade virtual, nota-se certa resistência em alguns empreendimentos de turismo em cavernas em adentrar nas inovações da era digital. Isto se evidencia pelo uso de sistemas tradicionais de captação em ambiente virtual, como sítios na rede, uso de propaganda em correio eletrônico e, apenas em alguns casos, terminais digitais em centros interpretativos. Todavia, a expectativa do consumidor atual vai além, pois este está se ambientando cada vez mais à chamada “internet das coisas”, bem como aos ambientes de realidade virtual e de realidade aumentada. Não se trata de substituir as experiências reais por outras virtuais, tampouco de espetacularizar a visitação. Trata-se, sim, de usar as ferramentas disponíveis em prol do encantamento do cliente e da complementa o da experiência de visita o. Considerando as particularidades do ambiente subterr neo, iniciativas neste sentido poderiam realmente surpreender, levando o nível de experimenta o da visita o para fronteiras provavelmente ainda inexploradas.

A terceira tendência apontada é a *evolu o do luxo*. Até pouco tempo atrás, em  mbito mundial de consumo, luxo era traduzido como ostenta o e alto padrão. Em sua evolu o, o conceito de luxo tornou-se mais ligado ao tempo,   experiência e   personaliza o, sem abrir mão totalmente de seus significados iniciais. No mercado de viagens, isto vem sendo traduzido pela qualidade na presta o de serviços (dentro e fora dos atrativos, como as cavernas) e na perspectiva de conhecer lugares singulares, intocados e que permitam a vivência de uma experiência única de vida. Poucos sítios naturais no mundo estão naturalmente pr -preparados para esta possibilidade como as cavernas! Assim,   necessário aproveitar esta onda de consumo experi ncial associado à qualidade intrínseca dos serviços para melhorar e bem ofertar as cavernas turísticas ao mercado.

Outra faceta das tendências, a quarta delas, é a realiza o de viagem para *estar bem*, conceito que vem sendo trabalhado para além do significado óbvio de saúde corporal ou est tica. Os consumidores, sobretudo aqueles das novas gera es, estão interessados em viver experiências e compartilhar histórias. As cavernas e seu entorno permitem esta abordagem, desde que se preparem roteiros em que se possa trabalhar a busca pelo autoconhecimento, a explora o de emo es e, por fim, o contato com as comunidades locais de seu entorno. A existência de atividades diferenciadas, como momentos e aulas de relaxamento, medita o ou atividades similares, dentro de uma caverna, pode ser o diferencial que este mercado está buscando. Se os visitantes buscam inspira o, a escuridão e a oportunidade de introspec o que as cavernas oferecem podem ser as respostas para as perguntas que não são feitas de forma direta e objetiva, mas que direcionam a busca por viagens de lazer.

A quinta tendência aqui comentada do estudo de Edelman e Panrotas (2018)   a chamada *aventura ao extremo*. Nesta, a visita o de cavernas   textualmente citada, com o título de espeleologia. Obviamente que se trata de cavernas com maior grau de dificuldade, não aquelas já estruturadas para o turismo em média ou larga escala. Estes turistas buscam experiências com maiores desafios, mas com total segurança, pois querem a simula o de risco, não o risco propriamente dito. Este aspecto é facilmente provido por muitas cavernas, mesmo aquelas já estruturadas para o uso em maior escala, desde que sejam usados trechos menos antropizados do ambiente. Por outro lado, há uma característica fundamental destes consumidores que as cavernas turísticas, em sua maioria, ainda não conseguem atender: o acesso à *internet* para o pronto compartilhamento de suas experiências, algo denominado como “Efeito GoPro”. O ob-

jetivo destes turistas não é se gabar, mas sim, compartilhar com seus pares as suas experiências vivenciadas. Ou seja: em termos de divulgação segmentada de produtos, ainda se tornam aliados dos destinos que captam e atendem estas necessidades.

Por fim, das 10 tendências mencionadas, a sexta e última que foi entendida como diretamente aplicável à realidade das cavernas turísticas e a chamada *economia do compartilhamento e on demand* – com o quê os especialistas da OMT também concordam (Notimerica, 2017). Esta tendência diz respeito, sobretudo, aos consumidores das gerações X e *Millenials*. São pessoas que buscam o melhor aproveitamento de seus recursos e, ao mesmo tempo, a vivência de experiências diferenciadas, começando pelo meio de transporte, passando pela hospedagem e alimentação e podendo culminar nos atrativos, como as cavernas. Como são politicamente mais corretos e buscam um consumo consciente, estão à procura de serviços baratos e que funcionam, preferindo investir em momentos memoráveis e, para isso, se dispõem em economizar em serviços de acomodação e alimentação. Como a atratividade destes consumidores se evidencia por meio dos demais serviços, além dos atrativos, é importante estabelecer parcerias com moradores da região que possam oferecer serviços de hospedagem e alimentação alternativos, pois estes são chamarizes para este público. Do ponto de vista da gestão do próprio atrativo, a iniciativa de comercialização por meio de serviços virtuais de compras coletivas pode ser uma estratégia interessante a ser testada, mas que deve funcionar melhor se as demais características esperadas para os consumidores da economia do compartilhamento estiverem também disponíveis.

Para além destas tendências anunciadas, acrescenta-se o fato de que, cada vez mais, os consumidores (desde os *baby boomers*, que no momento atual estão em fases de aposentadoria e tem mais tempo para viajar, passando pela geração X e culminando nos *Millenials*) estão em busca dos serviços de uma nova era da economia, baseada nos serviços e em um mundo no qual a presença digital aumenta exponencialmente ano a ano na vida das pessoas. Pode-se pensar até em ter as cavernas turísticas como o “oásis” das tradições, tal como um retorno ao passado, ao tempo que os seres humanos viviam nas cavernas. De certa forma, uma visão romântica e nostálgica – falsa, neste segundo caso –, funcionando como um pilar de resistência para a inovação na sociedade. Mas, por outro lado, é preciso entender que um grupo ínfimo de consumidores deve ter interesse nessa perspectiva ancestral associada às cavernas, talvez especialistas do assunto ou, talvez, como um dos muitos produtos possíveis em uma caverna turística. No entanto, se apegar aos modelos antigos de produção (engessada, em larga escala, padronizada) é não enxergar que os consumidores estão buscando o oposto disso: singularidade, exclusividade e flexibilidade. Assim, pode até funcionar como um quartel-general da resistência à modernidade, mas não como um produto turístico adequado às necessidades de consumo das gerações atuais e futuras. Com isso vem à tona um dos dilemas fundamentais: se estamos aceitando impactar uma caverna ao adaptá-la para o uso turístico, não queremos que seja visitada? Gestão de recursos é fundamental!

Novas tendências e realidades do turismo de natureza: horizontes específicos para a gestão das cavernas turísticas

Além dos aspectos observados como tendência no mercado do turismo em geral e que podem ser aplicados na gestão das cavernas turísticas, existem também aqueles que são tendência e

realidade no turismo de natureza. Até a virada do século, o turismo de natureza tinha com seu principal foco de atração a “natureza intocada”, ou mesmo as “espécies bandeira” existente em cada localidade, em uma reprodução da visão biocêntrica de natureza (Plog, 2001; Lima e Partidário, 2002; Fennell, 2014; Anishchenko, 2016). Esta concepção vem se alterando aos poucos, de forma que os turistas de natureza, cada vez mais, estão também buscando encontrar na natureza a resposta para suas necessidades subjetivas, motivadas por seus sentimentos ou por desejos criados pela sociedade de consumo (Lu e Stepchenkova, 2012; Deng e Li, 2015; Anishchenko, 2016). Das diversas tendências de crescimento do turismo de natureza, destacam-se aquelas que claramente podem ser aplicadas ao turismo em cavernas: patrimônios da humanidade, busca por lugares exóticos, segmentos específicos – novos ou em fase de crescimento – do turismo de natureza e locações de filmes e séries.

Os Patrimônios da Humanidade são chancelados pela UNESCO, sendo o selo de patrimônio concedido para os sítios que se destacam por características de diferenciação ou representatividade natural, cultural ou mista (UNESCO, 2018). As cavernas podem ser incluídas em qualquer uma delas, desde que atendam aos critérios e procedimentos específicos de cada categoria e possuam algum destaque de interesse mundial. Embora a obtenção do selo de Patrimônio da Humanidade seja um ato de reconhecimento da necessidade de conservação do sítio agraciado, sabe-se há muito que este atrai turistas do mundo todo. Por se tratarem de lugares que se destacam em suas categorias, tornam-se mais atrativos que os demais de mesma natureza, gerando fluxos maiores de visitação. Assim, a tentativa de obtenção do reconhecimento enquanto Patrimônio da Humanidade, embora seja um processo demorado, custoso e que não seja para todas as cavernas turísticas, entende-se que é uma estratégia interessante para aqueles sítios que tenham condição de serem alçados a esta categoria.

A busca por lugares exóticos é outra realidade do turismo de natureza (Correia *et al.*, 2007). Neste contexto, um lugar exótico é aquele sítio que possui características que possam distingui-lo do modelo de sociedade capitalista-ocidental-cristão. Esta realidade está ligada às tendências gerais para o turismo já comentadas, como a busca por autenticidade (típica dos consumidores que buscam o estar bem e a economia do compartilhamento) e pela aventura. Para algumas cavernas turísticas, inseridas no entorno urbano ou tradicional de sociedades ocidentais contemporâneas, é mais difícil ou por vezes impossível atender esta demanda. Por outro lado, pensando na amplitude da realidade Ibero-Americana, em diversas localidades onde resistam modos tradicionais ou remotos de produção e organização social (populações tradicionais, indígenas), esta é uma realidade alcançável. O produto turístico resultante pode ser um misto de experimentações naturais e culturais, nas quais a caverna turística se insere em diversos papéis, entre o principal e o coadjuvante, dependendo do contexto local.

Os segmentos emergentes do turismo de natureza também podem ter seu papel de revitalização ou alavancagem no fluxo de visitação de cavernas turísticas. Tratam-se em sua maioria de novas abordagens ou roupagens para produtos já existentes, os quais são desenvolvidos sob motes temáticos ou de forma de execução das atividades. Na Europa, as iniciativas ligadas ao geoturismo e aos geoparques têm dado bons frutos (e.g. Farsani *et al.*, 2011; Boley e Nickerson, 2013). Este mesmo sucesso não se repetiu no continente americano, no qual tanto o geoturismo quanto os geoparques tem se mostrado como redutos de especialistas e estudiosos das geociências, ao menos por enquanto. Outro segmento crescente no turismo de natureza é o já comentado Tu-

rismo de Aventura, o qual pode ser trabalhado em diferentes níveis de dificuldade e intensidade para atender públicos mais amplos, se valendo do benefício de que o próprio conceito de aventura é relativo (Spink, 2012). Para algumas pessoas, apenas entrar em uma caverna é o momento mais radical de suas vidas. Para outros, o lado extremo e desafiador somente existirá se atividades como mergulho, rapel, trechos de natação, superação de obstáculos naturais ou grande tempo de percurso se fizerem presentes (Lobo *et al.*, 2010). O importante, neste caso, é saber segmentar o produto conforme as necessidades dos distintos públicos que se pretende atingir.

Por último, uma das estratégias que vem sendo cada vez mais bem utilizadas pelos destinos turísticos para a atração de visitantes é o uso de suas paisagens na locação de filmes e séries. Muitos destinos, inclusive, tem se especializado à ponto de contratar equipes de marketing focadas na captação de oportunidades para se inserirem neste mercado. Embora não seja uma estratégia nova (e.g. Riley e Doren, 1992; Riley *et al.*, 1998), observa-se que é pouquíssimo aproveitado pelos gestores dos ambientes subterrâneos. Neste caso, tanto a paisagem das cavernas quanto a de seu ambiente externo (sobretudo se forem em áreas cársticas, nas quais as formas de relevo podem ser monumentais), estão entre os chamarizes para aproveitar esta tendência. Compete aos gestores captarem as possibilidades, sobretudo tentando desmistificar a imagem tradicional de cavernas, que muitas vezes são usadas apenas como espaços negativos, sombrios e perigosos (Figueiredo, 2010).

Considerações finais

Entendemos que a gestão das cavernas turísticas possui pilares já estabelecidos, muitos deles calcados em dois extremos: a conservação acima de tudo ou o uso massivo do ambiente. Embora estes pilares ainda sustentem o turismo em cavernas no âmbito Ibero-americano, é preciso começar a enxergar, cada vez mais, que o perfil da sociedade está mudando. Com isso, novas vontades e necessidades passam a ser reconhecidas pela própria sociedade – em sua busca de autoconhecimento – ou oferecidas pelo mercado – que aponta para inovações e cria necessidades de consumo, muitas vezes. A gestão das cavernas turísticas não pode ficar fora deste ritmo evolucionar do mercado. Sabemos que é arriscado e difícil investir em novas tendências, sobretudo quando ainda não estão apoiadas nos fluxos atuais de consumidores que as cavernas atendem, podendo gerar situações perigosas e desastrosas do ponto de vista administrativo. Todavia, não podemos também nos imobilizar. Saídas importantes talvez sejam a realizações de pesquisas, projetos-piloto e testes controlados, sobretudo nos aspectos mais fáceis de inovar e que sejam menos custosos. Começar pela reorientação das equipes de atendimento para a proposição de produtos menos padronizados e mais exclusivos e participativos pode ser um, dos muitos passos possíveis, para o início desta caminhada necessária para sobrevivência das cavernas turísticas no cenário do turismo mundial.

Referências

- Anishchenko, M. 2016. *Ecotourists' motivation and its relation to the ecotourism's principles*. Umea University.
- Barbosa, Y.M. 2002. *História das viagens e do turismo*. Aleph.

- Bastian, F. e Alabouvette, C. 2009. Lights and shadows on the conservation of a rock art cave: The case of Lascaux Cave. *International Journal of Speleology*, 38(1), 55-60.
- Boley, B. e Nickerson, N. 2013. Profiling geotourists: an a priori segmentation identifying and defining sustainable travelers using the Geotourist Tendency Scale (GTS). *Journal of Sustainable Tourism*, 21(2), 314-330.
- Calaforra, J.M., Fernández-Cortés, A., Sánchez-Martos, F., Gisbert, J., y Pulido-Bosch, A. (2003). Environmental control for determining human impact and permanent visitor capacity in a potential show cave before tourist use. *Environmental Conservation*, 30(2), 160-167.
- Cifuentes, M. 1992. *Determinación de capacidade de carga turística em áreas protegidas*. Turrialba: CATIE.
- Cigna, A.A. 1993. Environmental management of tourist caves: The examples of Grotta di Castellana and Grotta Grande del Vento, Italy. *Environmental Geology*, 21(3), 173-180.
- Cigna, A.A. e Burri, E. 2000. Development, management and economy of show caves. *International Journal of Speleology*, 29(1), 1.
- Cigna, A.A. e Forti, P. 2013. Caves: the most important geotouristic feature in the world. *Tourism and Karst areas*, 6(1), 9-26.
- Correia, A., do Valle, P.O. e Moço, C. 2007. Why people travel to exotic places. *International Journal of Culture, Tourism and Hospitality Research*, 1(1), 45-61.
- Cunha, L. 2011. Autenticidade e Inovação: factores de renovação dos destinos turísticos maduros. *Journal of Tourism Studies*, 4, 9-28.
- Diegues, A.C.S. 2000. *O mito moderno da natureza intocada*. Hucitec.
- Deng, J. e Li, J. 2015. Self-identification of ecotourists. *Journal of Sustainable Tourism*, 23(2), 255-279.
- Edelman e Panrotas 2018. *10 tendências para viagens e turismo na América Latina em 2018*. Disponível em: < <https://edelman.com.br/propriedades/viagens-e-turismo-latam/>>. Acesso em: 10.mai.2018.
- Farsani, N.T., Coelho, C. e Costa, C. 2011. Geotourism and geoparks as novel strategies for socio-economic development in rural areas. *International Journal of Tourism Research*, 13(1), 68-81.
- Fennell, D.A. 2014. *Ecotourism*. Routledge.
- Fernández-Cortés A., Calaforra J.M. e Sánchez-Martos F. 2006a. Spatiotemporal analysis of air condition as a tool for the environmental management of a show cave (Cueva del Agua, Spain). *Atmospheric Environment* 40, 7378-7394.
- Fernández-Cortés A., Calaforra, J.M. e García-Guinea, J. 2006b. The Pulpí gigantic geode (Almería, Spain): geology, metal pollution, microclimatology, and conservation. *Environmental Geology*, 50, 707-716.
- Figueiredo, L.A.V. 2010. *Cavernas como paisagens racionais e simbólicas: Imaginário coletivo, narrativas visuais e representações da paisagem e das práticas espeleológicas*. Universidade de São Paulo.
- Gabrielli, C.P. 2017. Turismo responsável: caminhos possíveis? *Revista de Turismo Contemporâneo*, 5(1), 81-97.
- Giacomini Filho, G. 2004. *Ecopropaganda*. Senac.
- Gillieson, D. 1996. *Caves: Processes, Development, Management*.
- Gillieson, D. 2011. *Management of Caves*. In: Van Beynen, P. (ed.) *Karst and Cave Management*, 141-158. Springer.
- Lima, S. e Partidário, M.R. 2002. *Novos turistas e a procura da sustentabilidade*. GEPE.
- 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.
- Lobo, H.A.S., Trajano, E., Marinho, M. de A., Bichuette, M.E., Scaleante, J.A.B., Scaleante, O.A.F., Rocha, B.N. e Laterza, F.V. 2013. Projection of tourist scenarios onto fragility maps: Framework for determination of provisional tourist carrying capacity in a Brazilian show cave. *Tourism Management*, 35, 234-243.
- Lobo H.A.S., Sallun Filho W., Veríssimo C.U.V., Travassos L.E.P., Figueiredo L.A.V. e Rasteiro M.A. 2010. Espeleoturismo: oferta e demanda em recente expansão e consolidação no Brasil. In: Castro S.F.L., Souto W., Rangel B.B. (Coords.) *Segmentação do turismo: experiências, tendências e inovações – artigos acadêmicos*. Ministério do Turismo, 35-58.

- Lu, W. e Stepchenkova, S. 2012. Ecotourism experiences reported online: Classification of satisfaction attributes. *Tourism Management*, 33(3), 702-712.
- Moretti, E.C. 2001. *Atividade turística: produção e consumo do lugar Pantanal*. In: Banducci Júnior, Á. y Moretti, E.C. (Orgs.). Qual paraíso? Turismo e ambiente em Bonito e no Pantanal. UFMS/Chronos.
- Notimerica. 2017. *Día Mundial del Turismo, destinos y nuevas tendencias en Iberoamérica*. Disponível em: < <http://www.notimerica.com/sociedad/noticia-dia-mundial-turismo-destinos-nuevas-tendencias-iberoamerica-20170927082641.html>>. Acesso em: 10.mai.2018.
- Pires, L.C. 2010. Análise dos impactos da tecnologia de informação e comunicação para o turismo. *Observatório de Inovação do Turismo*, 5(4), 1-20.
- Plog, S.C. 2001. The power of psychographics and the concept of venturesomeness. *Journal of Travel Research*, 40(3), 244-251.
- Pulido-Bosch, A., Martin-Rosales, W., López-Chicano, M., Rodriguez-Navarro, C. M. e Vallejos, A. 1997. Human impact in a tourist karstic cave (Aracena, Spain). *Environmental Geology*, 31(3-4), 142-149.
- Riley, R.W. e Doren, C.S.V. 1992. Movies as tourism promotion: A 'pull' factor in a 'push' location. *Tourism Management*, 13(3), 267-274.
- Riley, R.W., Baker, D. y Doren, C.S.V. 1998. Movie induced tourism. *Annals of Tourism Research*, 25(4), 919-935.
- Spink, M.J.P. 2012. Aventura, liberdade, desafios, emoção: os tons do apelo ao consumo do risco-aventura. *Revista de Ciências Sociais*, 37, 45-65.
- Swarbrooke, J. 2000. *Turismo sustentável: conceitos e impacto ambiental*. Aleph.
- Trigueiro, C. 2008. Novas tendências do consumidor de turismo na nova economia. In: III Semana de Turismo da UFOP. 1-10.
- UNESCO 2018. *The criteria for selection*. Disponível em: <<https://whc.unesco.org/en/criteria/>>. Acesso em: 10.mai.18.

A. Espín de Gea, *et al.*, 2018. Apertura del nuevo acceso a la cueva del Puerto de Calasparra (Murcia), un reto tecnológico desde la investigación geofísica inicial hasta el método de excavación del túnel de acceso. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 389-404.

Apertura del nuevo acceso a la cueva del Puerto de Calasparra (Murcia), un reto tecnológico desde la investigación geofísica inicial hasta el método de excavación del túnel de acceso

A. Espín de Gea, A. Gil Abellán, M. Reyes Urquiza y L. Arévalo Lomas

Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales
Polígono Industrial El Matadero Ctra. De Murcia s/n, CP. 30430, Cehegín. Murcia. (ESPAÑA)
antonio.espin@ctmarmol.es; antonio.gil@ctmarmol.es; monica.reyes@ctmarmol.es; lucia.arevalo@ctmarmol.es

RESUMEN

La cueva del Puerto se descubre en el año 1968 y desde ese momento se ha producido una intensa evolución encaminada a la divulgación, mayor conocimiento de sus estructuras y de sus salas, tanto desde el punto de vista espeleológico como turístico. El problema fundamental de la cueva para los visitantes era su difícil acceso en la parte alta del cerro, donde, a través de la entrada ubicada en la charnela de un pliegue anticlinal, se empezaba la visita. La subida era larga y tediosa, atravesando grandes pendientes que hacían desistir a más de un visitante. Para superar este problema siempre se han barajado numerosas soluciones, optándose por la posibilidad de un túnel entre la sala de Los Garbanzos y el exterior, cerca del centro de visitantes y sin apenas pendiente. Con este objetivo, la Unidad Tecnológica Geológico-Minera del Centro Tecnológico del Mármol, a instancia de la Mancomunidad de Turismo del Noroeste de Murcia, se puso a trabajar con la tecnología que se utiliza en la minería para roca ornamental. La cartografía, en ese momento era imprecisa por lo que no se conocía la localización exacta de las diversas salas y galerías, susceptibles de ser incorporadas al nuevo recorrido. Se realizó una topografía del eje de la cueva, se caracterizó el subsuelo con una antena de georradar especialmente diseñada para trabajos en terrenos difíciles que puede llegar a 40 m de profundidad, se realizó una tomografía eléctrica de alta resolución para la caracterización de los materiales presentes. También se realizaron sondeos tanto, de comprobación y calibración del método, como de recogida de muestras para ensayos. Con la información recogida se diseñó y ejecutó el proyecto de un túnel hasta la sala de Los Garbanzos, con forma de prisma de base pentagonal. Paralelamente, se controló medioambientalmente la cueva mediante tres estaciones climáticas.

Palabras clave: charnela, georradar, tomografía, túnel.

Opening of the new access to the Cueva del Puerto (Calasparra Murcia): a technological challenge from the initial geophysical research to the excavation method of the access tunnel

ABSTRACT

The cave of the Port was discovered in 1968 and since that time there has been an intense evolution aimed at the dissemination and greater knowledge of its structures and its rooms, both from the speleological and tourist point of view. The main problem of the cave for the visitors was its difficult access in the high part of the hill, where, through the entrance located in the hinge of an anticlinal fold, the visit began. The climb was long and tedious, crossing large slopes that made more than one visitor declines. To overcome this problem, many solutions have always been considered, opting for the possibility of a tunnel between the Los Garbanzos room and the exterior, near the visitor center and with hardly any slope. With this objective, the Geological-Mining Technological Unit of the Marble Technological Center, at

the request of the Tourism Association of the Northwest of Murcia, started to work with all the technology that was being used in ornamental stone mining. The existing cartography was imprecise, so the exact location of the various halls and galleries, which could be incorporated into the new route, was not known. A topography of the axis of the cave was made, the subsoil was characterized with a georadar antenna specially designed for work in difficult terrain, that can reach 40 m depth, high resolution electrical tomography was made for the characterization of the present materials and testing and method calibration wells were carried out, as well as sample collection for tests. With the information collected, a tunnel project was designed and executed up to the Los Garbanzos room, in the shape of a prism with a pentagonal base. At the same time, the cave was environmentally controlled through three climatic stations.

Keywords: *electrical tomography, ground penetrating, hinge zone, radar, tunnel.*

Introducción

La cueva del Puerto de Calasparra (Murcia) se descubre en el año 1968 por el Grupo Espeleológico Ciezano, llegando en la actualidad a una longitud de 4.389 m y 114 m de desnivel. Desde su descubrimiento se ha producido una evolución encaminada al conocimiento por parte del mayor número de personas de sus estructuras y de sus salas, tanto desde el punto de vista espeleológico como turístico. Uno de los grandes problemas con el que contaba la cueva para los visitantes era su acceso por la parte superior del cerro, donde se encontraba la entrada turística inicial ubicada en la charnela de un pliegue anticlinal. La llegada hasta esta entrada era larga y tediosa atravesando grandes pendientes que hacían desistir a más de un visitante. Este detalle siempre ha sido visto como un obstáculo a superar para el desarrollo turístico de la cueva y para el aumento de sus visitas. Para superar este problema siempre se han barajado numerosas soluciones de las que al final se optó, tras una laboriosa investigación, por la realización de un túnel que conectara la sala de Los Garbanzos con el exterior, cerca del centro de visitantes y sin apenas pendiente.

Esta tarea fue encomendada a la Unidad Tecnológica Geológico-Minera del Centro Tecnológico del Mármol, a instancias de la Mancomunidad de Turismo del noroeste de Murcia donde estaba representado el Ayuntamiento de Calasparra, impulsores de la idea de mejorar el acceso, con otra vía, y ampliar la zona visitable. Desde el momento en que se empezaron los trabajos, se constató la necesidad de realizar una cartografía precisa del recorrido que deberían de seguir los visitantes y la localización exacta de las diversas salas y galerías existentes en la cueva del Puerto, ya que en el momento de iniciar el proyecto la cartografía existente estaba desplazada y deformada por lo que su utilización era problemática.

Para llevar a cabo el proyecto encomendado y una vez analizada toda la información disponible se dividió este estudio en tres fases:

- La primera ha consistido en la realización de un estudio geológico y geofísico completo del área comprendida entre la entrada turística antigua y el centro de interpretación existente. Se ha utilizado GPR (georadar) y tomografía eléctrica de alta resolución para la caracterización de la zona karstificada y seleccionar la mejor zona susceptible de realizar la apertura de una futura nueva vía de acceso a la cueva.
- En la segunda fase se ha llevado a cabo una exploración completa de la zona de la cavidad situada más al Oeste, desde el final de la zona visitable antigua, hasta la sala llamada de Los

Garbanzos, examinando estructuras, acceso, estabilidad y dimensiones, junto con la elaboración de una poligonal, mediante brújula, de las posibles vías del camino a seguir por una futura vía de acceso turístico, que posteriormente fue completada con mediciones precisas mediante estación total georeferenciada en coordenadas absolutas.

- La tercera fase fue la elaboración del proyecto de túnel para el nuevo acceso a la cueva donde se había detectado más favorable que correspondía con una zona en el barranco cercano al centro de visitantes donde existía una diferencia de cota de 19 m hasta llegar a la sala de Los Garbanzos. Se trata de realizar una galería inclinada con una sección final de 5,04 m², una longitud de 20 m, una inclinación de 29° y una orientación N 262°.

Marco geográfico

La Sierra del Puerto es una alineación montañosa enclavada en la comarca del Noroeste de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (figuras 1 y 2), tiene dirección este-oeste y per-



Figura 1. Situación de la Sierra del Puerto y la cueva en el mapa topográfico de la Región de Murcia.

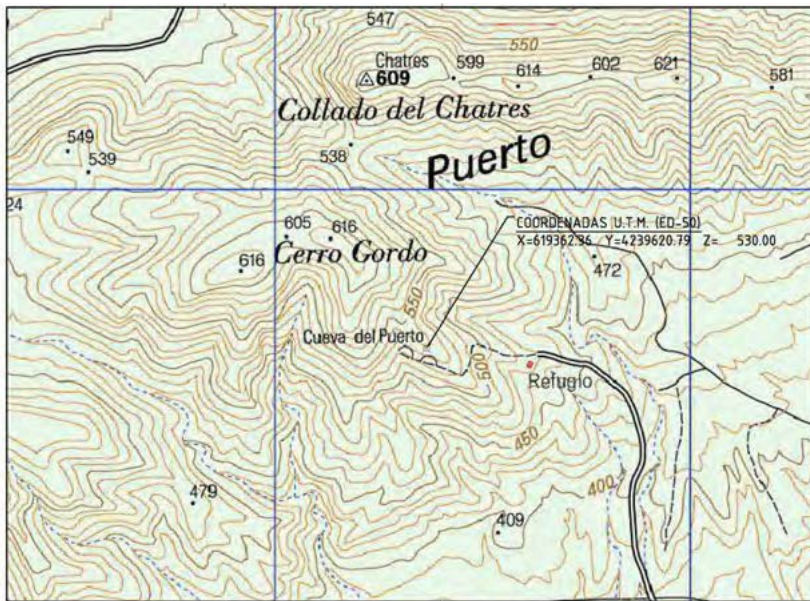


Figura 2. Detalle de la zona de estudio en el mapa topográfico (escala original, 1:25.000).

tenece a los términos municipales de Cieza y Calasparra, siendo esta última la localidad más cercana a la cueva y a la que pertenece la gestión de la misma.

Al sur, toda esta zona es atravesada por el río Segura, el cual genera una geomorfología en paredes verticales de indudable belleza en la zona denominada como Cañón de Almadenes. La Sierra del Puerto y otras sierras cercanas forman parte de la estructura llamada “el sinclinal de Calasparra” visible desde la cueva.

Aspectos geológicos

La Sierra del Puerto pertenece a la Zona Externa de la Cordilleras Béticas, más concretamente al Prebético Externo. Los estudios del Prebético en otras zonas nos permiten tener una idea de los materiales que se encuentran en las sierras y elevaciones montañosas a lo largo de la transversal Jumilla-Yecla.

Los límites del área Prebética quedan definidos por el sur mediante el frente de cabalgamiento de las Unidades Intermedias y/o Zona Subbéticas. Por el Norte, en el sector localizado al oeste de Alcaraz, el límite coincide con el de erosión-depósito en el borde de la Meseta. Al este de Alcaraz, por el contrario, el límite con el Sistema Ibérico se efectúa sin grandes cambios estratigráficos hasta el punto de que el criterio seguido para limitar la Zona Prebética y el Sistema Ibérico es esencialmente tectónico. Al este de Martos (provincia de Jaén) se pierden los materiales prebéticos por quedar bajo las unidades alóctonas del Guadalquivir y los materiales neógenos de relleno de la Depresión del Guadalquivir (Fallot, 1948, Vera 1982).

La Zona Prebética representa un área de plataforma o borde de cratón donde se desarrollaron a lo largo del Mesozoico y Paleógeno materiales marinos someros y continentales, según los episodios. El carácter marino de las series, así como la continuidad vertical y espesor de las mismas, aumenta hacia el sur, es decir, hacia la parte más alejada del continente o Meseta Ibérica.

Las características de los materiales, permiten dividir la zona Prebética en dominios paleogeográficos diferentes cuya denominación varía según los distintos autores; siguiendo los trabajos de García Hernández et al. (1978), Azema et al. (1979) y García Hernández et al. (1980) podemos dividir la Zona Prebética en dos grandes dominios: Prebético Externo (Zona de estudio) y Prebético Interno.

La zona donde se encuentra la cueva del Puerto se engloba dentro de las formaciones geológicas: Tramo Superior de la Formación Dolomítica y Formación de la Solana de edad Cretácico Superior (figura 3).

El tramo superior de la Formación Dolomítica de edad Turoniense, corresponde a dolomías grises masivas, azoicas muy compactas. Tiene un espesor que oscila entre 10 y 30 m y conforman el centro del anticlinal de la zona de estudio.

El conjunto calizo superior puede dividirse en dos términos:

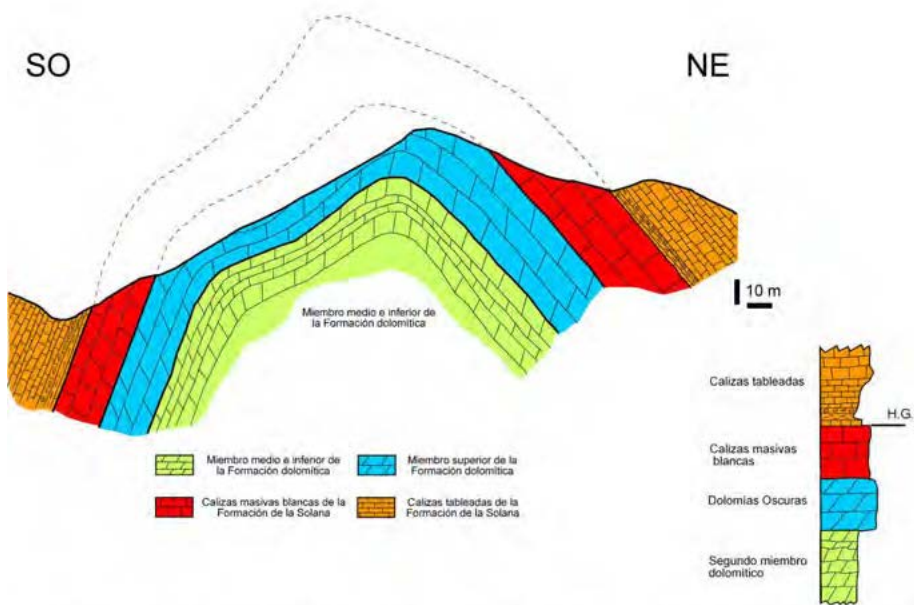
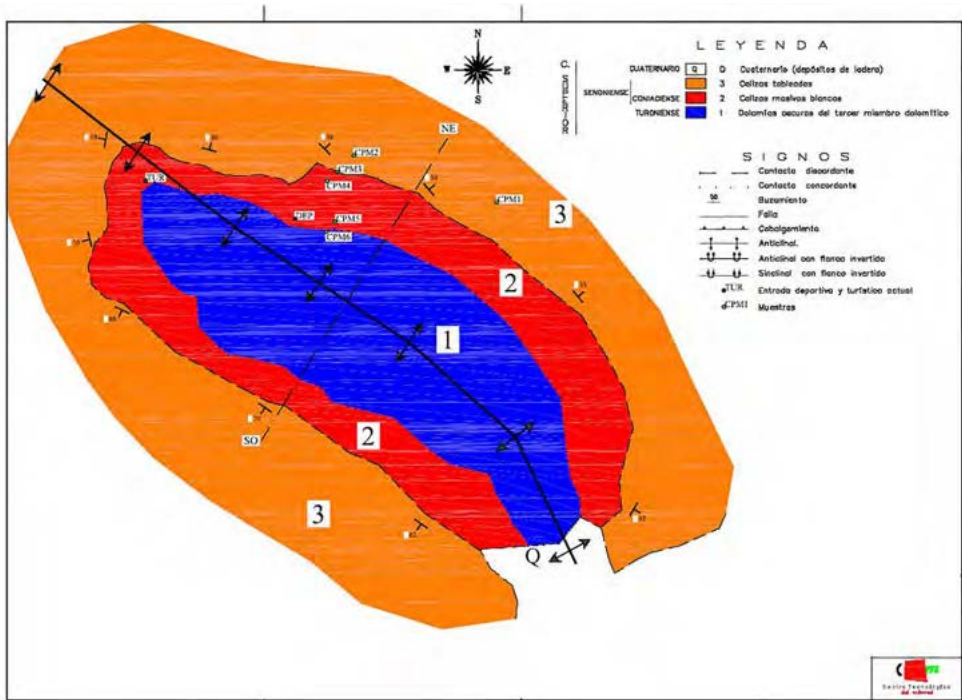
- El inferior se compone de calizas masivas blancas. Cuando se cortan aparecen gran cantidad de superficies de discontinuidad, fracturas verticales, estilolitos con espaciados del orden de los 10 cm. Su espesor es de 10 a 20 m. Materiales de la cueva.
- El superior es un potente paquete de calizas estratificadas con un espesor que ronda los 130 m y que se dispone a techo de las calizas masivas. Este contacto se puede observar en la sala de Los Clastos donde por karstificación de las calizas masivas y por derrumbamientos, las calizas estratificadas están visibles y conforman un foco de inestabilidad.

Tras el análisis geológico de toda la zona que se puede observar en la figura 4, se constató que la cueva siempre afloran en las calizas masivas blancas, y más concretamente, en el contacto entre estas y las dolomías masivas oscuras.



Figura 3. a) Detalle de las dolomías masivas superiores. b) Detalle de la caliza masiva. c) Vista general de las calizas estratificadas.

A. Espín de Gea, et al., 2018. Apertura del nuevo acceso a la cueva del Puerto de Calasparra (Murcia), un reto tecnológico desde la investigación geofísica inicial hasta el método de excavación del túnel de acceso.



CORTE GEOLÓGICO EN LA CUEVA DEL PUERTO COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

Figura 4. Mapa y corte geológico de la zona de estudio donde se aprecia el anticlinal; la entrada turística está ubicada en la parte superior, coincidiendo con la charnela del pliegue.

Prospección geofísica de la zona de estudio

Desde el punto de vista técnico la utilización de métodos geofísicos en este trabajo ha supuesto un aporte de información fundamental a la hora de llevar a cabo los trabajos en el interior de la cueva y el túnel de acceso, ya que se han detectado cavidades, planos de estratificación y discontinuidades que han condicionado los trabajos posteriores.

Se han utilizado varias técnicas de estudio para minimizar errores y ver el grado de solapamiento existente entre los resultados obtenidos por técnicas diferentes.

Estudio mediante georradar

La técnica de georradar, GPR por sus siglas en inglés (*Ground Penetrating Radar*), es un método electromagnético que consiste en la emisión de pulsos de alta frecuencia por parte de una antena transmisora o emisor y su posterior recepción, tras las reflexiones sufridas en el subsuelo, en una antena receptora. Las reflexiones se producen como consecuencia del contraste en las propiedades electromagnéticas del subsuelo por el que se propagan las ondas, concretamente de la conductividad eléctrica, o su inverso, la resistividad eléctrica, la permeabilidad magnética y la constante dieléctrica o permitividad. La señal reflejada es recibida por una antena receptora de las mismas características que la emisora. Esta señal recibida se amplifica, digitaliza y almacena para posteriormente, mediante un adecuado procesado, obtener información de las características, contenido y posibles anomalías del subsuelo.

Se realizaron 39 perfiles (figura 5), con los que se ha conseguido un barrido significativo de la zona de estudio y zonas que pudieran ser de interés. Esta tecnología se ha apoyado de manera

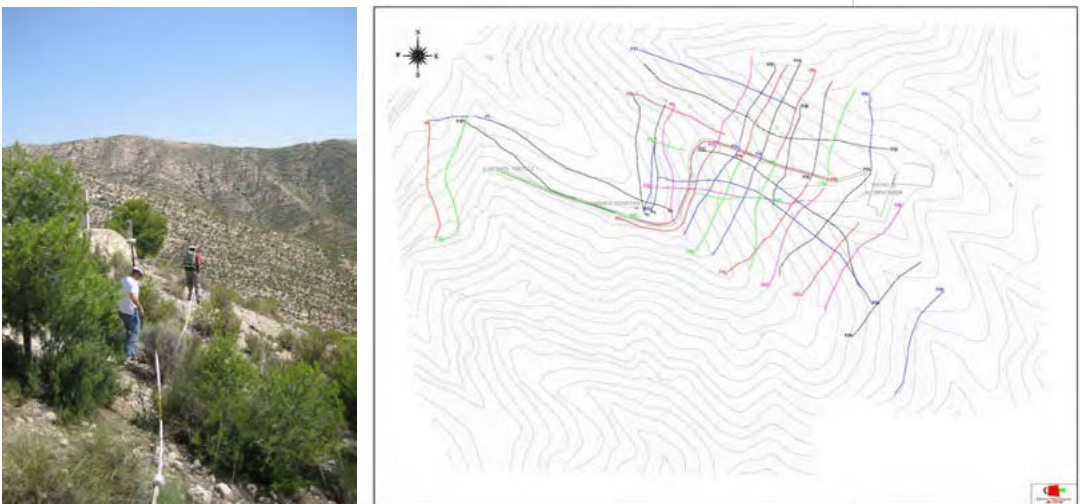


Figura 5. Mediciones con GPR en el campo y su ubicación mediante GPS centimétrico.

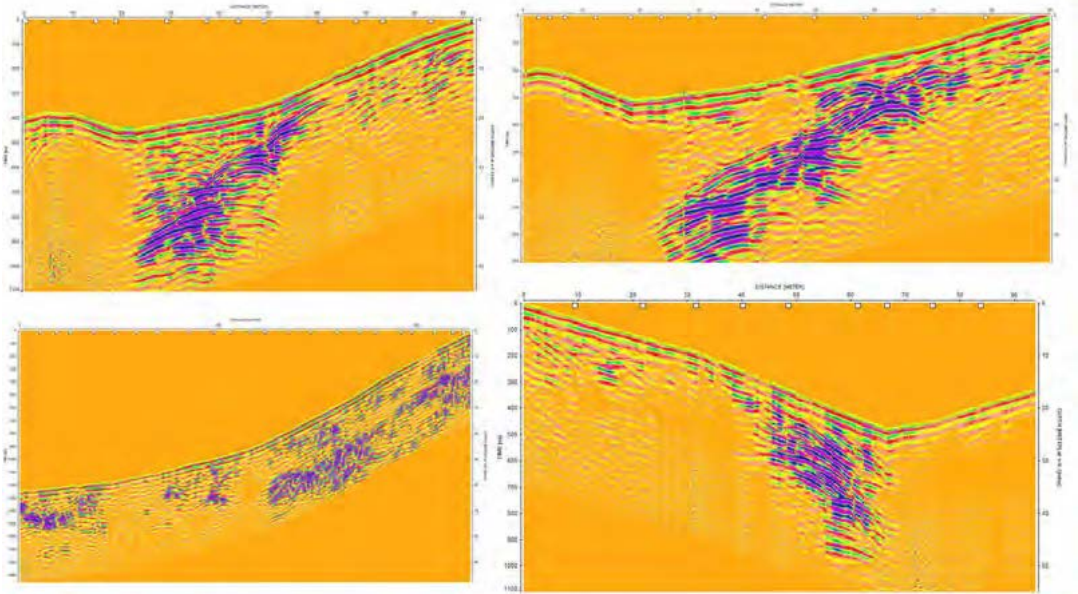


Figura 6. Radargramas con la presencia de reflectores (tonos oscuros) que delimitan la presencia de la cueva.

fundamental en el GPS centimétrico para el desarrollo de los trabajos, ya que todos los datos han sido georreferenciados para su posterior análisis en gabinete minimizando incertidumbres.

Se efectuaron en todas las zonas donde se encuentra el afloramiento de las calizas masivas blancas dentro del anticlinal estudiado. Al iniciar la visualización de los diferentes perfiles llaman la atención los fuertes contrastes de color que se encuentran en cada uno, correspondientes a las anomalías provocadas por cambios bruscos en las propiedades del medio. Hay que prestar atención a esos reflectores más marcados en todos los perfiles y a las formas que generan (figura 6).

En los distintos perfiles ejecutados con la antena RTA de 25 MHz se ha determinado la presencia de multitud de discontinuidades y de cavidades pertenecientes a la cueva a determinadas cotas, así como la presencia del contacto entre las calizas y las dolomías, donde se ha podido constatar siempre el desarrollo de la cueva. Con todos los perfiles realizados, se ha podido obtener un conocimiento exhaustivo de las direcciones predominantes en el desarrollo de la cueva con identificación de un escalonamiento de salas a favor del plano de estratificación en el flanco NE del pliegue, y la identificación de galerías que no han sido descubiertas todavía, que se desarrollan hacia el SE por debajo del centro de visitantes y en la base del cerro.

Estudio mediante tomografía eléctrica

La tomografía eléctrica es una técnica geofísica que tiene por objetivo específico determinar la distribución real de la resistividad eléctrica del subsuelo en un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de medida, a partir de los valores de resistividad aparente obtenidos mediante

medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua, proporcionando en este trabajo los cambios de resistividades presentes en el terreno entre los materiales calizos y la cavidad.

La investigación geofísica ha consistido, en la realización de 5 perfiles de tomografía eléctrica de 185 m de longitud, sumando una longitud total de 925 m (figura 7).

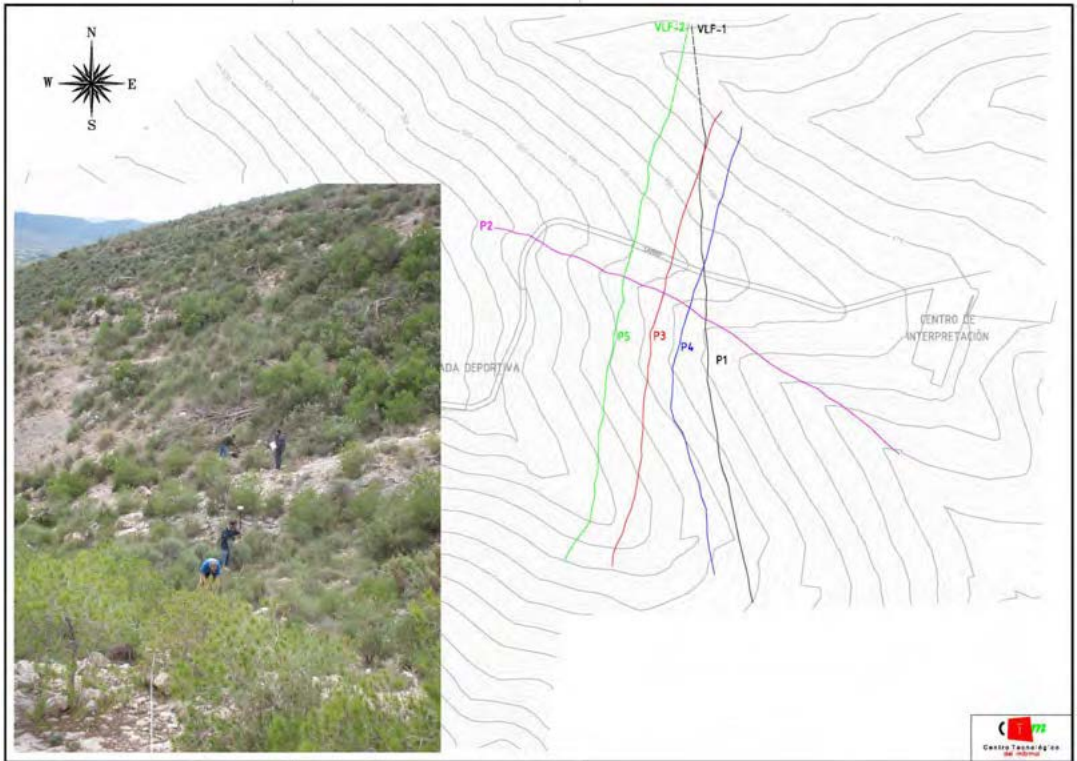


Figura 7. Mediciones con tomografía eléctrica y su ubicación mediante GPS centimétrico.

Se puede observar una clara respuesta diferencial entre los carbonatos comprendidos en el intervalo en el perfil de 0-100 m y 100-185 m. Ello se podría justificar por una diferencia del contenido arcilloso y de humedad que sería muy superior en el segundo intervalo. Por otro lado, las resistividades eléctricas obtenidas presentan diferentes tendencias, los colores rojos, que representan las zonas más alteradas, arcillosas o húmedas, mientras que hacia el máximo, con colores azulados, se representan los niveles más cementados o masivos con escasa porosidad y expuestas en menor medida a la influencia del agua (figura 8).

Los huecos presentan un comportamiento eléctrico complejo en función de su situación de vacío o relleno. El comportamiento del hueco vacío, es decir, relleno de aire es el de un fuerte resistivo

A. Espín de Gea, et al., 2018. Apertura del nuevo acceso a la cueva del Puerto de Calasparra (Murcia), un reto tecnológico desde la investigación geofísica inicial hasta el método de excavación del túnel de acceso.

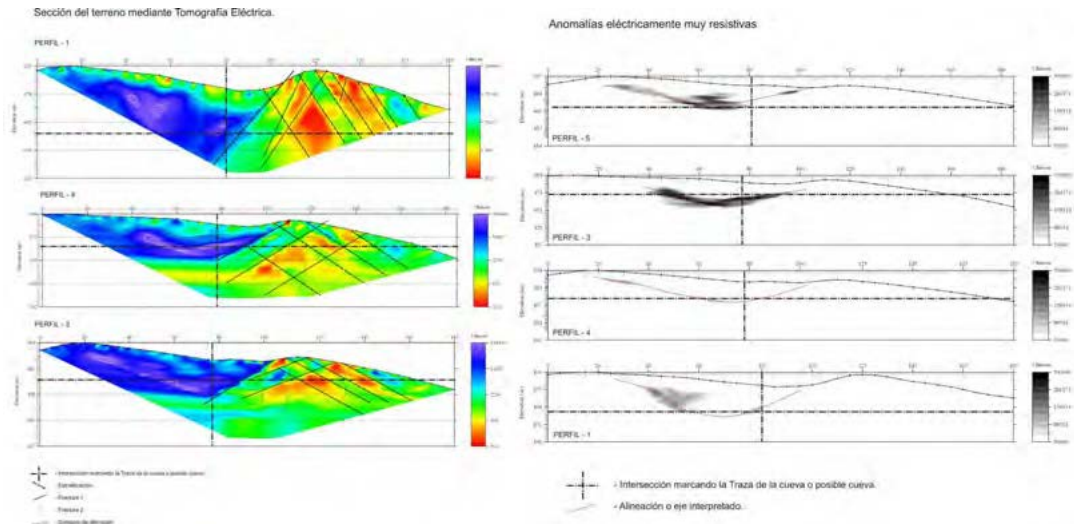


Figura 8. Perfiles de tomografía eléctrica interpretados con presencia de las anomalías resistivas.

eléctrico por ser el aire un gran aislante, mientras que el comportamiento del hueco relleno será función del tipo de material que lo rellene, normalmente este estará constituido por sedimentos finos, arcillas y limos aunque en algunos casos, el agua lo podría saturar generando valores de resistividad eléctrica mínimos.

Por lo tanto y tras las observaciones directas realizadas, este caso debe ser considerado como el de una cueva vacía en un medio de muy alta resistividad eléctrica, carbonatos masivos, donde los valores de resistividad eléctrica influidos por el efecto del aire en el interior de la cueva son máximos.

Identificación del tramo más favorable para el nuevo acceso

La cueva del Puerto contaba con un recorrido turístico de 400 m situado sobre todo en la parte alta del pliegue. Tras la investigación se observa una alineación sucesiva de salas que coinciden con la ruta hacia la sala de Los Garbanzos, en la que se ha realizado una poligonal, primero de manera más rápida para obtener una preliminar correlación con la investigación de superficie y después con estación total determinando la futura ruta de acceso. Esta traza no trata de ser una topografía al detalle de esta parte de la cueva sino una poligonal ejecutada con laser y brújula para orientar los trabajos de apertura de la nueva vía de acceso y seleccionar la zona más cercana al centro de interpretación. Para realizar la traza de este tramo se han instalado 40 bases de referencia en la nueva vía de acceso desde la continuación del actual recorrido turístico al inicio de la sala de Los Clastos hasta la sala de Los Garbanzos y 24 bases para control desde la entrada turística antigua hasta la sala de Los Clastos, identificando cada uno de los factores que pueden controlar la viabilidad del proyecto como son: pasos estrechos, desniveles, abundancia de formaciones, desprendimientos, bifurcaciones hacia el fondo de la capa, inestabilidad de bloques, etc., que se plasma todo esto en diferentes planos y vistas tridimensionales (figura 9).

NUEVA VÍA DE ACCESO A LA CUEVA DEL PUERTO

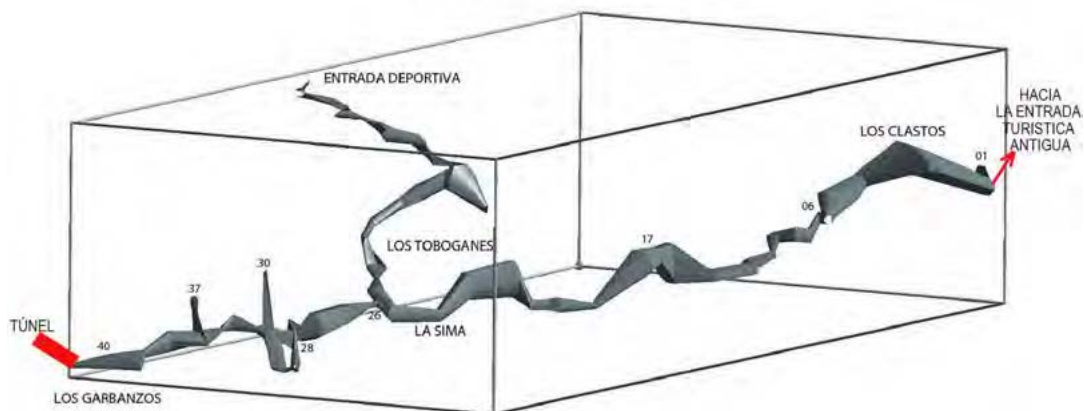


Figura 9. Representación tridimensional de las estaciones medidas.

Los datos obtenidos fueron:

- Desnivel entre la entrada turística y la estación 01 (final antigua ruta turística antes de Los Clastos): -21,27 m.
- Desnivel entre entrada deportiva y la estación 40 (Los Garbanzos): -51,38 m.
- Desnivel entre la estación 01 (final ruta turística antigua) y la 40, nuevo recorrido estudiado: -24,23 m.

En este estudio se ha obtenido un recorrido geométrico de la nueva vía de acceso desde la última base de la zona turística antigua, hasta la sala de Los Garbanzos de 304 m y un recorrido proyectado de 282 m.

La dirección de la nueva vía de acceso estudiada desde la sala de Los Clastos hasta Los Garbanzos es E-SE con un rango de direcciones del recorrido entre N 90° y N 140° predominando N 110° a N 120°.

Identificación del tramo más favorable para el nuevo acceso

Tras estos trabajos se efectuó un sondeo de comprobación de la existencia de la sala de Los Garbanzos (figura 10) y de investigación de los materiales que estaban entre esta sala y la superficie (figura 11). Para esto se realizó un sondeo a destroza con una maquina versátil que puede ser transportada por dos operarios accionada mediante aire comprimido, muy utilizada en las canteras de roca ornamental. Este sondeo tuvo una orientación e inclinación similar a la descrita para el futuro acceso, longitud de 20 m, inclinación de 29° y orientación N 262°. Resultando todo un éxito su realización y corroborando los datos tanto de la investigación del exterior como del interior.

A. Espín de Gea, et al., 2018. Apertura del nuevo acceso a la cueva del Puerto de Calasparra (Murcia), un reto tecnológico desde la investigación geofísica inicial hasta el método de excavación del túnel de acceso.



Figura 10. Realización del sondeo a destroza e imagen del martillo en la sala de Los Garbanzos, certificando la exactitud de los trabajos realizados.

Una vez analizado todo el trabajo se ha realizado el proyecto de ejecución del nuevo acceso para lo que ha sido necesaria la obtención de muestras para ensayar y caracterizar los materiales presentes a todo lo largo del futuro túnel. Se ha realizado mediante una testiguera portátil y un



Figura 11. Obtención de muestras en el laboratorio.

sondeo con recuperación de testigo en la zona del nuevo acceso, lo que supuso un reto para transportar la máquina hasta el lugar adecuado (figura 11).

El ensayo de compresión, medido en megapascales, que mide la resistencia o esfuerzo último de un suelo cohesivo o roca a la compresión no confinada, lo que nos ha arrojado es diferentes comportamientos de la caliza presente en nuestro afloramiento. La caliza está dividida en tres partes bien diferenciadas en cuanto a su calidad ya que se ha pasado de 120 Megapascales (MPa) en el primer tramo superficial a 27-21 MPa en la zona alterada central, volviendo en la parte final cercana a la sala de Los Garbanzos a valores de 120 MPa. Estos valores también van relacionados con la existencia de mucha fracturación que en algunos tramos del sondeo, el testigo tiene aspecto de brecha y presencia masiva de estilolitos. Esto explica la existencia de cuñas en la traza del túnel (figura 12), donde la cuña más desfavorable calculada tiene un volumen de 7,20 m³ y con el sostenimiento asignado para cada sección tipo, el factor de seguridad es superior a 2, más que suficiente para garantizar su seguridad.

Diseño y realización del túnel

Una vez recopilados los datos de ubicación, calidad de los materiales en la trayectoria del acceso, estabilidad de la sala en la zona del entronque de la obra, viabilidad del acceso y su continuación con el recorrido trazado, se ha realizado la simulación 3D del túnel donde la geometría es una galería inclinada con una sección final de 5,04 m², una longitud de 20 m, inclinación de 29° y orientación N 262° (figura 13 A).

Para hacer frente a esta obra se ha utilizado un sistema novedoso en la realización de túneles de estas características, ya que se han utilizado herramientas provenientes de la minería de roca or-

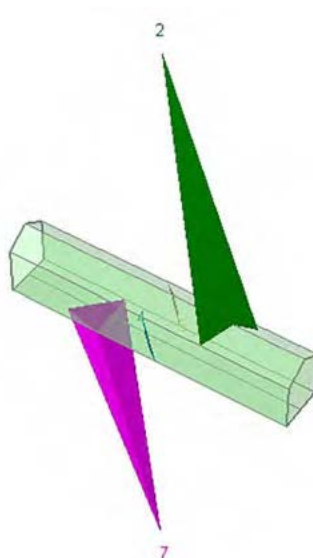


Figura 12. Algunas de las cuñas presentes en el túnel. La 2 puede moverse, mientras que la 7 no.

amental como ha sido el corte con hilo diamantado. Se realizó un paraguas en la parte superior del túnel para dar mas estabilidad con diez bulones que llegan hasta 2 m antes de la galería, rellenos de lechada de cemento. Posteriormente se realizaron los cinco taladros con una perforadora en las cinco esquinas del pentágono que conforma la sección del túnel, llegando hasta la sala de los Garbanzos. Estos taladros han servido para realizar los cortes de las paredes de la galería con hilo diamantado y separarlas del macizo para su posterior retirada mediante un martillo robot que realizaba el picado en todas las direcciones del espacio. Esta operación se realizó con todas las medidas de seguridad pertinentes para estabilizar la zona durante la perforación, sobre todo en la parte alterada, figura 13 B y C.

Una vez realizada la galería se procedió a su gunitado completo y a la colocación de cerchas equidistantes 2 m entre sí, perfiles de hierro que unían las cerchas y a la colocación de bulones en el entronque con la sala de los Garbanzos, todo, para un sostenimiento seguro que al final se sobredimensionó por encima de las especificaciones del proyecto, figura 13 D.

Antes de realizar cualquier actuación en la cueva se realizaron medidas de CO₂, velocidad del viento, temperatura de la roca y humedad en varias zonas y en el exterior para tener un punto

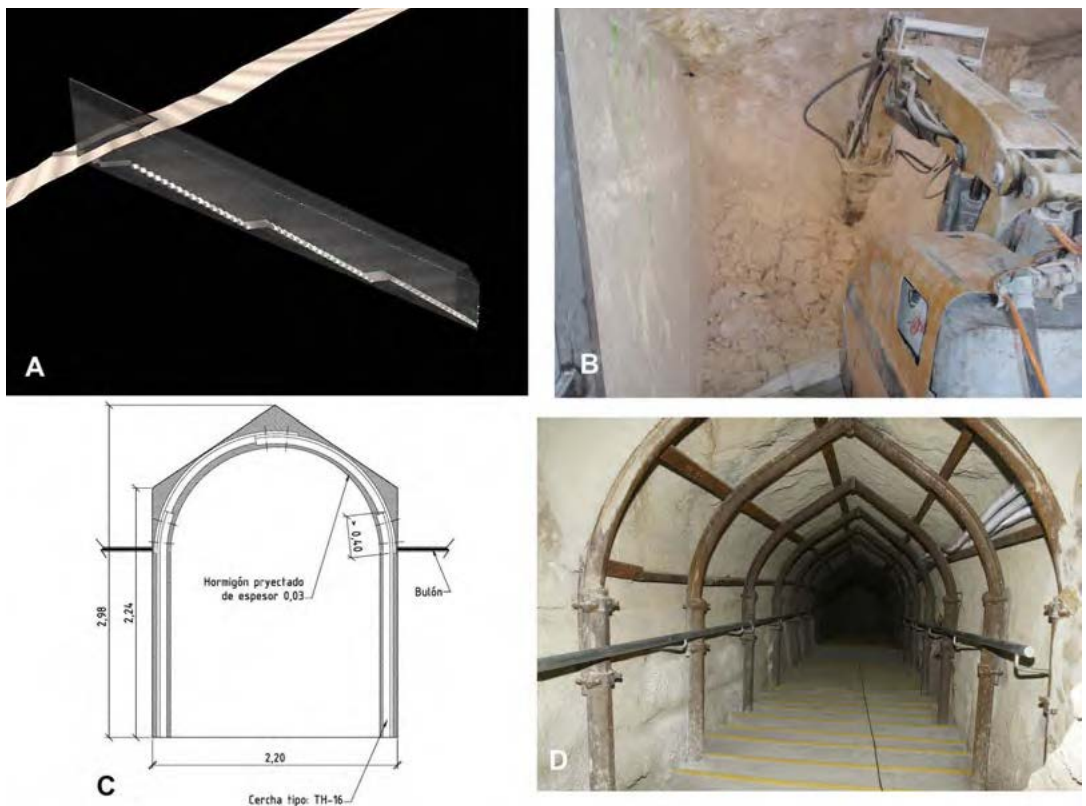


Figura 13. Detalles del túnel excavado en el nuevo acceso a la cueva del Puerto. A) Recreación para el proyecto. B) Labores de picado a todo lo largo del acceso. C) Detalle de las cerchas colocadas. D) Imagen final del estado del túnel.

de partida de las condiciones climáticas en las que se encontraba la cueva. Antes de ejecutarse la obra se instalaron tres estaciones climáticas en el interior y una más en el exterior, en el tejado del centro de interpretación que estuvieron tomando datos durante la obra por lo que se ha podido constatar las variaciones sufridas durante la misma y su recuperación tras los trabajos de apertura y posterior cierre para iniciar las visitas.

Conclusiones

En este trabajo se ha constatado que los métodos geofísicos utilizados de manera eficiente solucionan y obtienen multitud de datos de gran utilidad para llevar a cabo proyectos de esta índole. Se ha producido una transferencia de metodología desde el sector minero de roca ornamental a la realización de túneles que ha solucionado o minimizado los problemas que la tecnología tradicional pudiera presentar en este tipo de proyectos. La elaboración de este trabajo metódico y completo ha proporcionado a la cueva del Puerto un incremento en un 100% del recorrido turístico y ha solventado el problema tradicional de pendientes elevadas que tenía para su acceso y que limitaba la llegada de visitantes.

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración de los espeleólogos que iniciaron al personal del CTM en las técnicas de escalada en cuevas y al Excmo. Ayuntamiento de Calasparra por las facilidades a la hora de realizar este trabajo y artículo.

Referencias

- Martín Chivelet, J. 1992. *Las plataformas carbonatadas del Cretácico Superior de la margen bética (altiplano de Jumilla - Yecla, Murcia)*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 899.
- Ferrer, M. y González de Vallejo, L. 2007. *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 134.
- Ragan, D.M. 1980. *Geología estructural: Introducción a las técnicas geométricas*. Editorial Omega, 207.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. 2004. *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall Pearson Educación, Madrid, 750.
- Caumartin, V. 1975. La conservación de las cavidades habilitadas. *Centre de Documentació de la Gerència de Serveis d'Espais Naturals*. Escuela Catalana de Espeleología. 1, 15.
- Geze, B. 1968. *La espeleología científica*. Ed. Martinez Roca, Barcelona, 192.
- Hoek, E. y Brown, E.T. 1980. *Underground Excavations in rock*. Institution of Mining and Metallurgy, London, 527.



**Geoarqueología e historia
en cavidades**

J.A. Casabó Bernad y M.L. Rovira Gomar, 2018. Los primeros asentamientos humanos en les Coves de Sant Josep (La Vall d'Uixó, Castelló). En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 407-420.

Los primeros asentamientos humanos en les Coves de Sant Josep (La Vall d'Uixó, Castelló)

J.A. Casabó Bernad⁽¹⁾ y M.L. Rovira Gomar⁽²⁾

(1) Consejería de Educación, Investigación, Cultura y Deporte. Generalitat Valenciana, Av del Mar, 23. 12003 Castelló.
casabo_jos@gva.es

(2) Museo Arqueológico de La Vall d'Uixó Av Jaume I, 26. 12600 La Vall d'Uixó. mrovira@lavallduixo.es

RESUMEN

Las cuevas siempre han sido lugar de refugio para los seres humanos, pero solo algunas reúnen condiciones óptimas de habitabilidad. Cuando esto ocurre, es posible documentar extensos períodos de actividad humana. En la Cova de Sant Josep y en las vecinas Cova de Can Ballester y Cova dels Orgues, la arqueología ha permitido documentar asentamientos durante los últimos dieciséis mil años. Lamentablemente, gran parte de la información arqueológica se perdió con la destrucción de Can Ballester, pero investigaciones recientes en Sant Josep permiten concluir que las primeras ocupaciones humanas de este lugar corresponden al final del último periodo glaciario, concretamente al Solutrense y Magdaleniense, que en cronología calibrada oscilaría entre 20000 y 15000 cal. BP. Hasta el momento, solo se ha podido realizar una campaña de excavaciones, por lo que los resultados son todavía preliminares, sin embargo, el reciente descubrimiento de arte parietal de posible cronología paleolítica constituye una extraordinaria novedad que debería por sí misma garantizar la continuidad de los trabajos.

Palabras clave: arte parietal, Magdaleniense, Paleolítico, Solutrense.

The first human settlements in the Sant Josep Cave (La Vall d'Uixó, Castelló)

ABSTRACT

Caves have always been a shelter for human beings, but only some of them have optimal conditions of habitability. When this happens, it is possible to document extensive periods of human activity. In Sant Josep cave and in the neighboring Can Ballester and Orgues caves, archeology has allowed to document settlements over the last sixteen thousand years. Unfortunately, most of the archaeological information was lost with the destruction of Can Ballester, but recent research in Sant Josep allows us to conclude that the first human occupations of this place belong to the end of the last glacial period, specifically Solutrean and Magdalenian, which in calibrated chronology it would oscillate between 20000 and 15000 cal. BP. So far the results are still preliminary since we have been able to carry out only one excavation campaign, however, the recent discovery of rock art of possible Paleolithic chronology is an extraordinary novelty that should guarantee by itself the continuity of works.

Keywords: Magdalenian, Palaeolithic, rock art, Solutrean.

Introducción

A poniente de la población, junto a la ermita de Sant Josep, se abren al menos seis cavidades

conectadas entre sí, que forman parte de un enorme complejo kárstico (Nebot *et al.*, 1981). Desde el punto de vista arqueológico interesan especialmente la Cova dels Orgues donde se excavó un sondeo que quedó inacabado, con niveles ibéricos y del hierro antiguo (Oliver, 2010), Can Ballester por haberse documentado allí una extensa ocupación humana que abarca desde el Paleolítico superior a época ibérica (Gusi y Olaria, 1979), y la Cova de Sant Josep donde se documentaron niveles paleolíticos y del Bronce antiguo (figura 1) (Casabó, 2004). A pesar de su indudable interés científico, dejaremos fuera de este estudio la Cova dels Orgues donde, por ahora, no hay evidencias de ocupaciones paleolíticas, centrando nuestra investigación en los niveles más antiguos de Can Ballester y Sant Josep.

Ambas cavidades se sitúan en el valle del río Belcaire a unos 140 m s.n.m, justo en el lugar en que éste se abre a la llanura litoral de la Plana. La ubicación de ambos yacimientos es muy peculiar por cuanto están junto a una gran surgencia hídrica que vertía su abundante caudal al río hasta su completo aprovechamiento para el consumo humano.

El estudio territorial de ambos asentamientos revela la posibilidad de acceder a dos ecosistemas diferentes con una mínima inversión energética. Por una parte se podría acceder a los recursos del río y la llanura litoral, mientras que por otra parte se pueden explotar los recursos económicos que ofrecía la Serra d'Espadà, un territorio abrupto, surcado de barrancos angostos y roquedos calizos y de arenisca, con abundantes fuentes y una alta biodiversidad. Además de la dualidad de ecosistemas, la ubicación específica de las cavidades las dota de una gran ventaja estratégica al controlar una importante ruta de paso entre la llanura, la sierra y el cercano valle del río Palancia.



Figura 1. Ubicación de les Coves de Sant Josep, a caballo entre los relieves de la Sierra del Espadón (izquierda) y las llanuras del río Belcaire (derecha).

En el entorno inmediato se conocen un buen número de yacimientos que como veremos más adelante ayudan a perfilar el marco cronológico de ambos yacimientos. Por su cercanía nos interesan especialmente La Cova y Blaus. Este último además, tiene una importante serie estratigráfica que nos ha permitido reconstruir el final de la secuencia paleolítica a nivel regional.

La historia de Can Ballester es una historia triste. En diciembre de 1976 su propietario D. Vicente Ballester decidió vaciarla para construir un restaurante (figura 2). Por la descripción de un grupo de jóvenes, pudo saberse que el depósito parecía constar de tres grandes niveles, uno superior con cerámicas a torno ibéricas, otro central con abundantes cerámicas a mano y el inferior con mucha menos cerámica y numerosos restos óseos y líticos (Gusi y Olaria, 1979). Esta primera apreciación, vaga y carente del más mínimo rigor científico, pudo ser parcialmente contrastada al quedar intactos dos pequeños covachos junto a la entrada, que fueron excavados por el S.I.A.P. en 1977.

Años más tarde, en 1981, cuando parecía que ya no quedaba yacimiento por destruir, el Sr. Ballester volvió a sorprendernos a todos y arrasó con lo que quedaba de la cueva. Consumada la destrucción, sin consecuencias legales para nadie, tan solo pudimos limpiar un pequeño corte de sedimento junto a la pared noreste de la cavidad, de donde procede un lote de materiales líticos que permitieron constatar la existencia de niveles paleolíticos en la base de la estratigrafía.

La Cova de Sant Josep es una enorme caverna de 2384 m de recorrido topografiado, recorrida en toda su longitud por una corriente hipogea con episodios de fuertes crecidas estacionales



Figura 2. Destrucción de Can Ballester.

que condicionan su habitabilidad (figura 3). Conocida desde antiguo, la gruta ha sufrido numerosas alteraciones desde que en 1901 comenzase su exploración, aunque no fue hasta 1950 cuando al dinamitarse la entrada y la galería denominada *boca del forn* se pudo hacer accesible y visitable con barca. Hasta mediados de siglo la entrada estaba formada por dos pequeñas bocas situadas una encima de la otra, consecuencia de cambios en el nivel freático del río, que ha venido dejando varias entradas fosilizadas desde la Prehistoria hasta nuestros días. Desde aquí hasta el embarcadero, la cueva comunica por el este con Can Ballester, a través de un enorme caos de bloques de un desplome. En este punto, en 1993 se realizó la excavación arqueológica (González y Viñuela, 1995).



Figura 3. Planta de Sant Josep con indicación de la zona de excavación.

Las ocupaciones paleolíticas y epipaleolíticas de Can Ballester y Sant Josep

Destruída Can Ballester, solo podemos hacer un esbozo de su estratigrafía a partir de la precipitada excavación de los covachos anexos, la aparición de elementos muebles de indudable cronología paleolítica (Gusi y Olaria, 1979), y de la accidentada limpieza de un perfil estratigráfico durante la segunda destrucción de la cueva (Casabó, 2004).

Según Gusi y Olaria, en los covachos se identificaron diversos niveles que abarcan desde el Mesolítico geométrico a época ibérica, aunque el estudio de la industria lítica sugiere ligeros cambios (Casabó y Rovira, 1990-1991). Del sondeo I se extrajeron dos muestras de carbón para su datación, pero todas ellas en niveles cerámicos (N-I, 3310±95 BP. 3453-3667 cal BP; N-III 6950±120 BP. 7687-7909 cal BP).

Por lo que respecta a los materiales recogidos durante la destrucción de la cavidad, obviamente se trata de un palimpsesto carente del valor científico necesario para su valoración. La excepción son tres huesos decorados con motivos geométricos claramente paleolíticos que se valorarán más adelante. Por otra parte, la limpieza de un pequeño perfil estratigráfico situado en la base de la secuencia de Can Ballester arrojó datos interesantes, tanto por la ausencia de cerámica, como por la composición de la industria lítica, que encaja perfectamente con los ajuares característicos del final del Paleolítico superior y Epipaleolítico.

En Sant Josep González y Viñuela excavaron dos sectores entre el caos de bloques que separa esta cavidad de Can Ballester. Lamentablemente su trabajo quedó inconcluso por el evidente peligro que acarrea el precario equilibrio en que estaban los grandes bloques.

El Sector B proporcionó una secuencia estratigráfica con siete niveles, la mayoría de ellos atribuidos al Tardiglacial (Fumanal, 1997). El nivel I, en contacto erosivo con el II, está formado por arenas y arcillas consecuencia de arroyadas de energía moderada. Se ha datado en 3.810 ± 90 BP (4078-4350 cal BP) por lo que queda fuera de nuestro ámbito de estudio.

El nivel II está formado por numerosos cantos angulosos de distintas procedencias acumulados por procesos coluviales, consecuencia de la activación de la erosión en un momento fresco del Dryas. Se encuentra en contacto brusco con el nivel III y se ha datado en 12.950 ± 50 BP (15365-16154 cal BP).

Por debajo, el nivel III está formado por un sedimento arcilloso de deposición fluvial que corresponde a un periodo algo más templado, y que se superpone al nivel IV, un paquete formado por la acumulación caótica de grandes bloques angulosos que separa dos series sedimentarias con alternancia de fases frías y templadas.

El nivel V se formó en condiciones erosivas similares al II, en un ambiente fresco y árido. Inmediatamente infrapuesto, el nivel VI que se gestó bajo condiciones templadas y húmedas se dató en 16.240 ± 630 BP (18854-20267 cal BP).

Por último, el nivel VII, de color pardo rojizo, con escasos cantos y gravas en una matriz arcillosa, tiene un origen fluvial con fases evidentes de decantación.

Las industrias líticas y óseas de Sant Josep y Can Ballester

La información arqueológica de ambos yacimientos dista mucho de ser óptima. Se han señalado los problemas de la excavación en Sant Josep y las desgraciadas circunstancias que condujeron a la práctica destrucción de Can Ballester. Además, a pesar del tiempo transcurrido desde su excavación, no hay datos sobre la fauna, el polen y la antracología de ninguno de los dos yacimientos. Tan solo la sedimentología y las dataciones de Sant Josep aportan alguna información adicional para tratar de atribuir un contexto cronológico a las diferentes ocupaciones. Por otro lado, la industria lítica es escasa o procede de agregados de materiales en posición derivada (tabla 1).

	SJ. N-II		SJ. N-III		SJ. N-V		SJ. N-VI		CB Perfil		CB Superf	
Raspadores	15	.283	1				4	.200	11	.211	47	.219
Denticulados	7	.132					3	.150	12	.226	74	.344
Raederas	7	.132	1				4	.200	5	.094	43	.200
Puntas							1	.050			2	.009
Abruptos ind.							1	.050	1	.019	2	.009
Truncaduras					1				7	.132	13	.060
Perforadores	1	.019					1	.050	1	.019	2	.009
Lám. dorso	9	.170					1	.050	7	.132	8	.037
Puntas dorso	9	.170							2	.038	4	.019
L dorso trunc									2	.038	1	.005
P dorso trunc.											1	.005
Bipuntas dors									1	.019		
Bitruncaduras											2	.009
Foliáceos											1	.005
Astillados							3	.150			4	.019
Buriles	5	.094					2	.100	3	.057	11	.051
Canto tallado									1	.019		
Total:	53		2		1		20		53		215	

Tabla 1. Industria lítica de Can Ballester y Sant Josep a nivel de grupos tipológicos. Los datos estadísticos se representan en frecuencias relativas.

A pesar de estas limitaciones, podemos intentar una aproximación a las ocupaciones paleolíticas de Les Coves de Sant Josep a partir del análisis de los niveles II y VI de Sant Josep (en adelante SJ-II y SJ-VI) y de la limpieza del perfil de Can Ballester (en adelante CBP).

El nivel paleolítico más reciente de Sant Josep tiene una datación que nos retrotrae al Magdaleniense superior inicial. Su industria lítica se caracteriza por el predominio de raspadores sobre buriles, siendo éstos últimos únicamente diedros, un porcentaje de láminas y puntas de dorso del 34%, con predominio de dorsos rectos, ausencia de truncaduras y un sustrato que en conjunto supera el 26%.

Muchos de estos rasgos son compatibles con el tramo medio inicial de la secuencia de Cova Matutano, concretamente con los niveles IIC, IIB y IIA del sondeo I (Olaria *et al.*, 1981). Las diferencias las marca el menor porcentaje de piezas con dorso abatido en Matutano, aunque esa es una característica muy específica de ese yacimiento.

Las similitudes con el tramo superior de Matutano, con la serie estratigráfica de Blaus (Casabó 2004, 2012) y con la de otros yacimientos epimagdalenienses de las comarcas septentrionales de Castelló (Román y Domingo, 2017) son menos evidentes, puesto que en SJ-II faltan las truncaduras y los dorsos arqueados, tan característicos del Epimagdaleniense avanzado y del Sauveterriense.

La industria ósea está representada por solo dos objetos. Se trata de dos fragmentos de azagaya de sección cuadrada, muy robustas, y con acanalados longitudinales, cuya precisa tipología apunta también a momentos antiguos dentro del Magdaleniense superior de Matutano (figura 4 nº 23 y 24).

SJ-VI muestra rasgos industriales sensiblemente diferentes que se concretan en una notable disminución de laminitas y puntas con dorso abatido y una importante presencia de piezas astilladas. La datación radiométrica tiene una banda de indeterminación muy elevada, y nos situaría entre el Solutrense final y el Magdaleniense inicial / Badeguliense.

En la provincia de Castelló el Solutrense es un periodo poco conocido. Además todos los yacimientos están al aire libre con la consiguiente falta de estratigrafía y mezclas de materiales más recientes. En la Terrassa del Pont Nou se intuye por la presencia de algunas piezas netamente solutrenses en un contexto Auriñaciense (Casabó *et al.*, 2010). Más claros son los conjuntos de La Balsa de la Dehesa, Pla de la Pitja y Corral Blanc (Casabó y Rovira 1981, 1982-83; Gusi y Casabó, 1985), en este caso se trata de yacimientos claramente atribuibles al Solutreogravetiense, con puntas escotadas, laminitas y puntas de dorso abundantes, un nutrido grupo de buriles y algunos foliáceos con retoque plano. Todos estos yacimientos tienen evidentes similitudes con los de las comarcas centro-meridionales del País Valenciano (Fullola, 1979, Iturbe *et al.*, 1993) pero, salvo el Corral Blanc, todos se alejan de SJ-VI.

La relación con el Badegouliense, que por el momento solo se ha documentado en Parpalló (Aura 1995, 2007), ha de descartarse en lo tipológico, pero sobre todo en lo tecnológico, por el neto componente laminar de SJ-VI. Otra cuestión es la posible vinculación con el Magdaleniense antiguo que, por ahora, solo se documenta con certeza en la base del nivel XII de Cendres, pero la industria de ese yacimiento todavía no se ha publicado en detalle (Villaverde *et al.*, 2012).

La industria ósea de SJ-VI es más variada, con puntas de sección circular y cuadrada. Destaca un fragmento proximal de azagaya de sección oval monobiselada con bisel muy largo en lengüeta, tipo característico del Solutreogravetiense regional (figura 4, nº 30).

CBP tiene evidentes conexiones con el nivel II de Sant Josep que se manifiestan en el predominio de los raspadores sobre los buriles, un elevado componente de laminitas y puntas de dorso y el alto porcentaje del sustrato. Sin embargo difiere de éste por la tipología de los buriles, la abundancia de truncaduras y la mayor variabilidad tipológica de las piezas con borde abatido. Todos estos rasgos nos aproximan al Magdaleniense final y Epimagdaleniense de Blaus, aunque la escasez de piezas y la falta de dataciones absolutas o de cualquier otro estudio, dificulta cualquier intento de establecer mayores precisiones.

Arte parietal y mueble de Sant Josep y Can Ballester

Durante la destrucción de Can Ballester se recuperó una gran cantidad de materiales fuera de contexto. Entre esos objetos hay tres fragmentos óseos decorados con motivos geométricos de clara tipología paleolítica que se describen a continuación.

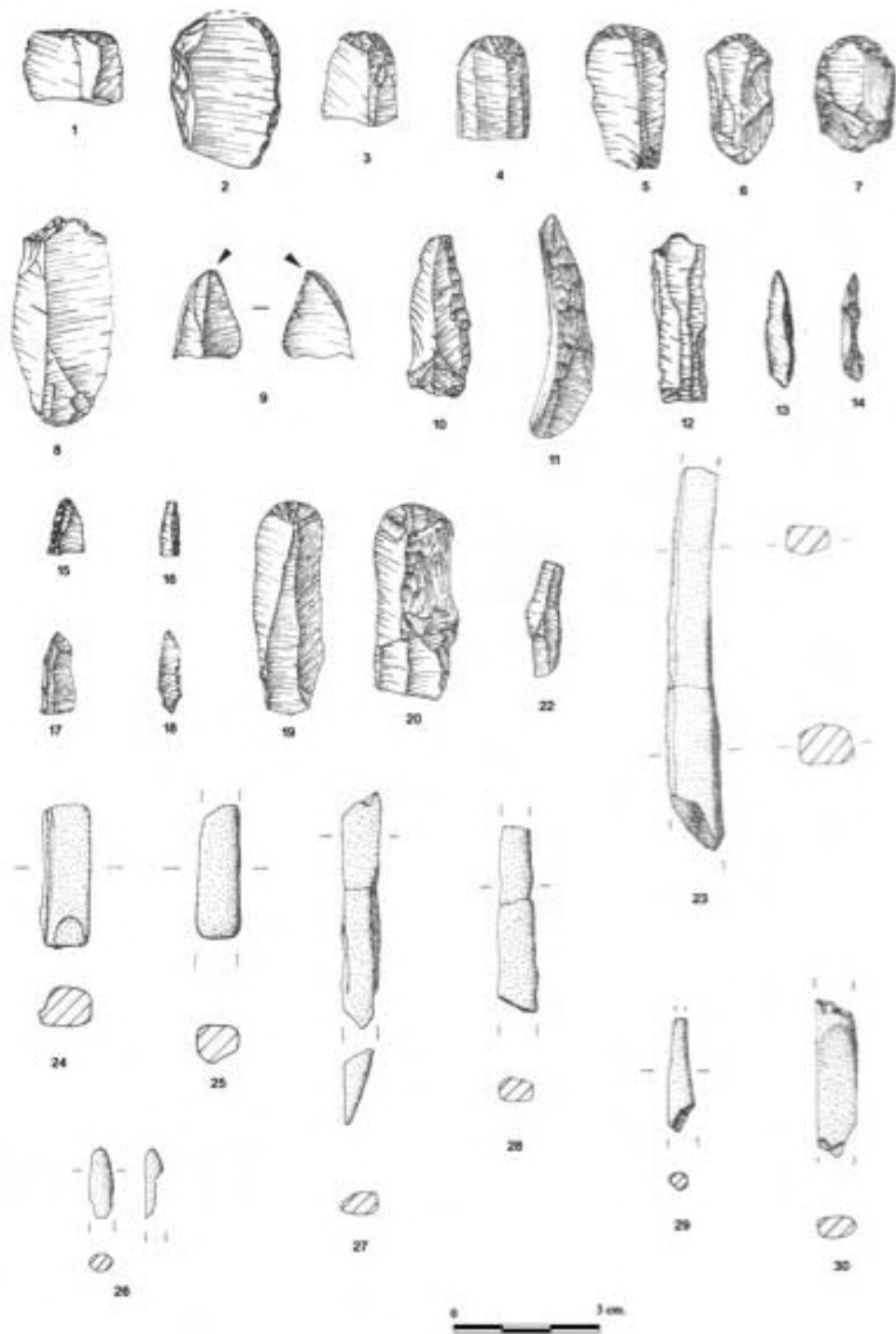


Figura 4. Industria lítica y ósea de Sant Josep. SJ-II 1-18, 23, 24. SJ-VI 19-22, 25-30.

- CGCB1. Fragmento de diáfisis seccionado longitudinalmente, con un fuerte pulido en ambas caras y apuntamiento distal. Medidas: longitud 120 mm, anchura 28 mm, espesor 9 mm. Presenta varios motivos geométricos simples y uno compuesto. En la parte superior se localizan cinco incisiones cortas, paralelas y oblicuas al eje de la pieza, de unos 7 mm de longitud que conforman el motivo C-1d, V-2.1A.

En la parte medial hay un motivo complejo formado por una línea vertical de unos 35 mm de longitud con cuatro ángulos opuestos dos a dos, tipo C-15dd.

En la parte inferior hay tres incisiones simples, una oblicua y las otras dos horizontales de 11, 9 y 19 mm respectivamente (figura 5.1).

- CGCB2. Fragmento de diáfisis de sección plano-convexa fracturada en los extremos, con un fuerte pulido a lo largo de toda la superficie. Medidas: longitud 108 mm, anchura 26 mm, espesor 10 mm. Presenta varios motivos incisos, con trazo ancho y profundo. De arriba a abajo aparece una figura de flecha compuesta, tipo 6c de Corchón y V-3.1A, de 50 mm de longitud. Inmediatamente por debajo aparecen dos trazos parcialmente conservados, oblicuos al eje longitudinal y más abajo un trazo ancho, transversal que corta la pieza de parte a parte al igual que ocurre en la pieza anterior (figura 5.2).

-CGCB3. Fragmento indeterminado de diáfisis, de sección plano-convexa que presenta idéntico pulido que las piezas anteriores. Está fragmentada en los extremos. Medidas: longitud 111 mm., anchura 25 mm., espesor 10 mm. Presenta un motivo serpentiforme longitudinal, con dos líneas oblicuas en cada extremo, que corresponde al tipo C-26 y V-5.4A (figura 5.3).

Los motivos que presentan los tres objetos son comunes tanto en el paleolítico superior cantábrico como en el mediterráneo. La cronología de los signos más complejos es siempre posterior al Magdaleniense medio, siendo la mayoría propios del Magdaleniense superior (Corchón, 1986; Villaverde, 1994).

En la vecina Cova dels Blaus encontramos los paralelos más cercanos. En un nivel revuelto con materiales indiscutiblemente del Magdaleniense superior, se recuperó un cilindro óseo perteneciente al radio de un buitre con diversos motivos complejos entre los que se encuentra una serie de dos meandros paralelos incisos similares al de CGCB3 (Casabó *et al.*, 1991). En el mismo nivel se localizó un fragmento de diáfisis con dos profundas incisiones, muy anchas, similares a los profundos grabados paralelos y oblicuos del motivo en flecha compuesta de CGCB2 (Casabó, 2004).

El arte parietal se localiza exclusivamente en Sant Josep. Se trata de cuatro paneles, dos en la entrada y los otros al final del gran caos de bloques. En dos de los paneles los motivos son simples signos no figurativos cuya tipología es frecuente en el Paleolítico superior peninsular, mientras que los otros dos muestran sendas representaciones de zoomorfos no exentos de polémica.

SJ-P1. En la entrada de la cavidad, en una corta galería colgada a unos 3 m de altura hay un único signo pintado en rojo. Se trata de un meandro de unos 80 cm de anchura y 50 cm de altura que termina en una mancha del mismo color (González y Viñuela, 1995).

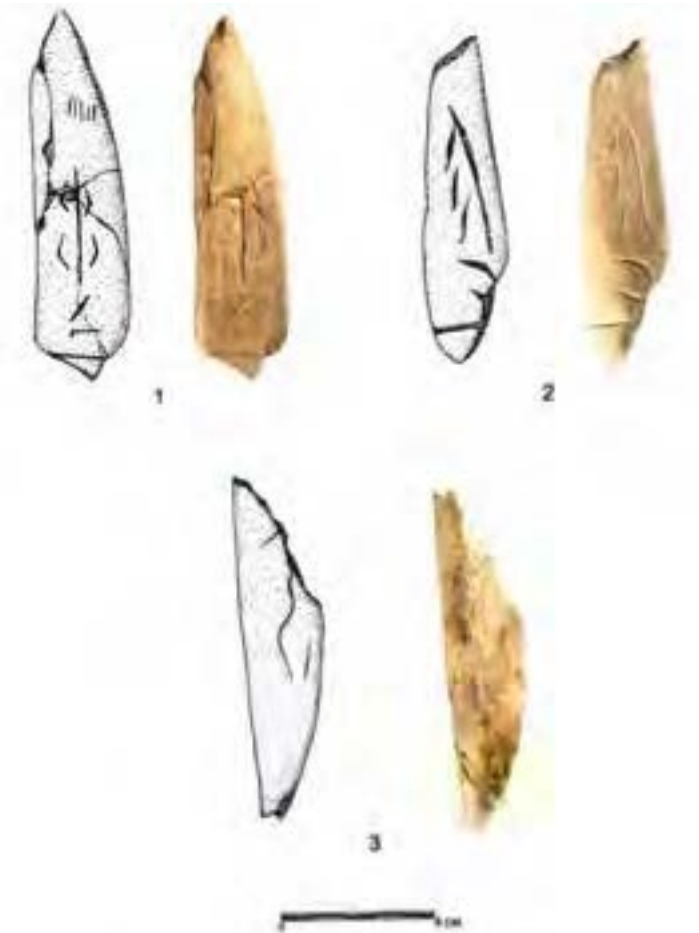


Figura 5. Huesos decorados de Can Ballester.

Estudios recientes no terminan de confirmar la edad paleolítica de este signo, Martínez y Guillem (2013) señalan que quizá podría tener una cronología histórica, aunque a nuestro juicio se trata de una conclusión precipitada. Es cierto que los trazos que conforman el meandro tienen tendencia a la horizontalidad, lo que contrasta con lo que suele ser habitual en representaciones paleolíticas, que como el cilindro de Blaus o el hueso grabado CGCB3, descrito anteriormente, tienen una morfología longitudinal. El tipo de pintura, espesa y con corrimientos recuerda a los pigmentos del estilo Macro-esquemático del primer neolítico peninsular, donde además no son extraños los signos meandriiformes, algunos de delineación horizontal. No obstante en el panel XVII de la Cueva de la Pileta existen meandriiformes similares al de Sant Josep (figura 6) (Breuil *et al.*, 1915) por lo que a falta de estudios concluyentes nos inclinamos por mantener la edad paleolítica de este signo.

SJ-P2. Justo debajo del panel anterior, en la misma entrada de la cueva, se conservan tres motivos

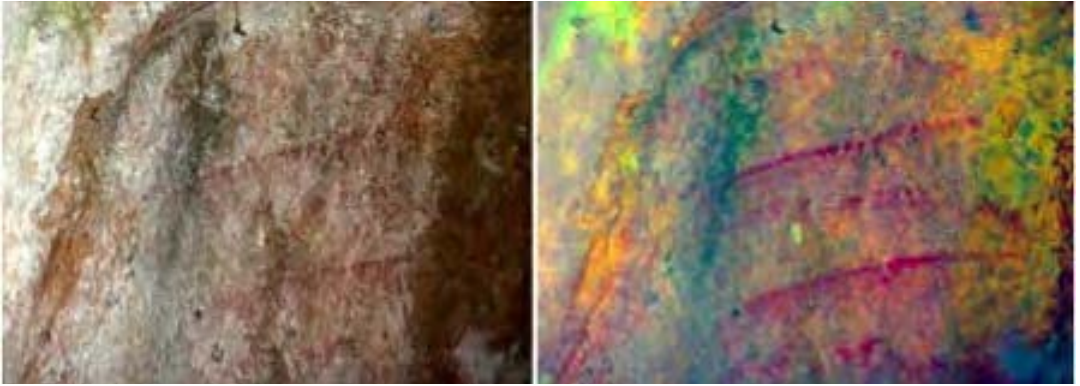


Figura 6. Signo meandriforme del panel I de Sant Josep. Imagen original y tratada con Dstrech.

incisos. Dos corresponden a sendos signos en forma de V, realizados con trazo ancho y redondeado. El otro motivo parece que representa un prótomo de caballo, realizado con trazo ancho y profundo por picado. Uno de los trazos conforma la quijada con una línea curva y sinuosa que termina en un belfo inferior caído. El otro trazo, ejecutado también por piqueteado, conforma el hocico y belfo superior del animal. Ambos trazos no llegan a juntarse conformando un morro abierto. Para completar la figura se aprovecha una fractura natural de la roca que conformaría la frente.

En Parpalló la configuración abierta del morro es habitual, siendo más frecuente en la fase pre-magdalenense (Villaverde, 1994). La plaqueta 17760, atribuida al Solutreo-gravetiense guarda un estrecho paralelo formal con el supuesto équido de Sant Josep (figura 7). Lo mismo ocurre con el caballo pintado del panel XIV de la Pileta (Breuil *et al.*, 1915), atribuido a la fase Solutrense antigua (Sanchidrián, 1997; Sanchidrián y Márquez, 2003).



Figura 7. Posible prótomo de caballo del panel II de Sant Josep.

SJP3. Entre la entrada y el embarcadero encontramos el gran caos de bloques que separa Can Ballester de Sant Josep. Una de estas rocas, la más cercana al embarcadero, sirve de soporte a un pilar de obra y presenta alteraciones recientes provocadas durante las labores de mantenimiento y repintado de las barcas. En su superficie pueden verse un gran número de trazos incisos de origen y cronología incierta que no conforman ningún motivo figurativo. En un lateral de la roca puede verse un reticulado inciso, que recuerda signos similares paleolíticos. Este motivo es frecuente en Parpalló y lo encontramos fundamentalmente en el Magdalenense superior (Villaverde, 1994).

SJP4. Finalmente, junto al embarcadero, encontramos una pared muy alterada por procesos de disolución, surcada de profundas grietas y fisuras. En ella se adivina el posible prótomo de un bóvido que aprovecha las fisuras naturales, retocándolas ligeramente para conseguir la forma deseada. Dos series de trazos en la cabeza y cuello contribuyen a realzar la figura del zoomorfo (figura 8). Esta técnica está también presente en Parpalló, y guarda una estrecha similitud con los tres bóvidos de la plaqueta 20664A.

Discusión y conclusiones

La presencia humana en el complejo kárstico de les Coves de Sant Josep está atestiguada desde el Solutrense superior. Las especiales características de este enclave, buena habitabilidad, abundancia de agua y control estratégico del territorio propiciaron su ocupación durante más de dieciséis mil años. Lamentablemente, el registro arqueológico que se había conservado razonablemente bien en Can Ballester fue objeto del mayor atentado al patrimonio que nunca ha padecido La Vall d'Uixó y Sant Josep tampoco se libró en el pasado de acciones poco respetuosas.

Pero debemos de mirar al futuro, y éste pasa por la explotación racional y respetuosa de un recurso turístico de primer orden, haciéndolo compatible con la investigación científica que nece-



Figura 8. Posible prótomo de bóvido del panel IV de Sant Josep.

sariamente ha de pasar por la excavación de Sant Josep y el estudio de las posibles manifestaciones parietales, al objeto de caracterizar con detalle sus primeras ocupaciones humanas.

Referencias

- Aura, J.E. 1995. *El Magdalenense Mediterráneo: La Cova del Parpalló (Gandia València)*. Trabajos Varios del Servicio de Investigación Prehistórica 91, València, 216.
- Aura, J.E. 2007. Badegouliens et Magdaléniens du versant méditerranéen espagnol. *Bulletin de la Société Préhistorique Française* 104-4. *Actes de la table ronde: Le dernier Maximum glaciaire et après. en France et en Espagne. Synthèses régionales et réflexions autour de la diversité des cultures matérielles de 19000 à 14000 BP*, 797-807.
- Breuil, H., Obermaier, H. y Werner, W. 1915. *La Pileta a Benaojan (Málaga-Espagne)*. Institut de Paléontologie Humaine. Mónaco, 112.
- Casabó, J. A. 2004. *Paleolítico superior final y Epipaleolítico en la Comunidad Valenciana*. MARQ Serie Mayor, 3, Alicante, 381.
- Casabó, J.A. 2012. Las industrias de la Cova dels Blaus (La Vall d'Uixó, Castelló). Aportación a la transición paleolítico-epipaleolítico en las comarcas septentrionales del País Valenciano. *MARQ. Arqueología y Museos* 5, 19-51.
- Casabó, J., Tapias, F., López, M., Morín, J., Valcárcel, A. y Gimeno, H. 2010. El paleolítico medio y superior en la desembocadura del río Millars (Castelló). *Sagvntvm* 42, 11-34.
- Casabó, J. y Rovira, M.L. 1981. La Balsa de la Dehesa en Soneja. Nuevo yacimiento lítico de superficie en Castellón. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología Castellonenses*, 8, 101-128.
- Casabó, J. y Rovira, M.L. 1982-1983. El yacimiento Epimagdalenense al aire libre del Pla de la Pitja (La Pobla Tornesa, Castellón). *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología Castellonenses*, 9, 7-34.
- Casabó, J. y Rovira, M.L. 1990-1991. La industria lítica de la Cova de Can Balleter (La Vall d'Uixó, Castellón). *Lucentum* IX-X, 7-24.
- Casabó, J., Grangel, E., Portell, E. y Ulloa, P. 1991. Nueva pieza de arte mueble paleolítico en la provincia de Castellón. *Saguntum* 24. 131-136.
- Corchón, M.S. 1986. *El arte mueble paleolítico cantábrico: contexto y análisis interno*. Centro de Investigación y Museo de Altamira. Monografías, 16, Madrid, 482.
- Fullola, J.M. 1979. *Las industrias líticas del Paleolítico superior ibérico*. Trabajos Varios del Servicio de Investigación Prehistórica 60, Valencia, 262.
- Fumanal, P. 1997. Secuencia sedimentoclimática del Pleistoceno superior final en el País Valenciano (18.000 al 12.000 BP). *El món mediterrani després del Pleniglacial (18.000-12.000 BP)*. *Centre d'Investigacions Arqueològiques, Sèrie Monogràfica*, 17, 321-327.
- González, A. y Viñuela, A. 1995. Sant Josep y el Arte Rupestre de nuestros antepasados. *Aigüalit* 2, 57-72.
- Gusi, F. y Casabó, J. 1985. El yacimiento al aire libre de El Corral Blanc (La Pobla Tornesa, Castellón). Estudio analítico. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología Castellonenses*, 11. 87-110.
- Gusi, F. y Olaria, C. 1979. El yacimiento prehistórico de Can Ballester (Vall d'Uixó, Castellón). *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología Castellonenses*, 6. 39-95.
- Iturbe, G., Fumanal, M.P., Carrión, J.S., Cortell, E., Martínez, R., Guillem, P.M., Garralda, M.D. y Vandermeersch, B. 1993. Cova Beneito (Muro, Alicante): una perspectiva interdisciplinar. *Recerques del Museu d'Alcoi*, 2. 23-88.
- Martínez, R. y Guillem, P.M. 2013. El Arte. In: *El arte rupestre en la provincia de Castellón*. Universitat Jaume I. Castelló, 111-229.
- Nebot, V., Casabó, J., Montoriol, A., Borràs, J. y Ribé, G. 1981. Resultats de la campanya G.E.S. a La Vall d'Uixó. *Sotaterra* 2, 6-57.
- Olaria, C., Gusi, F., Estévez, J., Casabó, J. y Rovira, M.L. 1981. El yacimiento Magdalenense de Cova Matutano (Villafamés, Castellón). Estudio del sondeo estratigráfico, 1979. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología Castellonense*, 8. 21-100.

- Oliver, A. 2010. Cova dels Orguens, La Vall d'Uixó (Castellón). Un nuevo asentamiento ibérico en cueva. *Quaderns de Prehistòria i Arqueologia de Castelló*, 28. 191-205.
- Román, D. y Domingo, I. 2017. El final del Paleolítico superior en Castellón: un territorio clave para la comprensión del final del Pleistoceno en el Mediterráneo ibérico. *PYRENAE* 48-1. 47-70.
- Sanchidrián, J.L. 1997. Propuesta de la secuencia figurativa de la cueva de la Pileta. *El món mediterrani després del pleniglacial (18.000-12.000 BP)*. *Sèrie Monogràfica* 17. Museu d'Arqueologia de Catalunya. 411-430.
- Sanchidrián, J.L. y Márquez, A.M. 2003. Radiodataciones y sus repercusiones en el arte prehistórico malagueño. *MAINAKE* 25. 275-292.
- Villaverde, V. 1994. *Arte paleolítico de la Cova del Parpalló. Estudio de la colección de plaquetas y cantos grabados y pintados*. Diputación de Valencia. 2 vol.
- Villaverde, V., Román, D., Pérez, M., Bergadà, M. y Real, C. 2012. The end of the Upper Palaeolithic in the Mediterranean Basin of the Iberian Peninsula. *Quaternary International* 272-273.

S. Machause López, *et al.*, 2018. Las cuevas en torno al poblado ibérico de Sant Josep (La Vall d'Uixó): ¿Espacios rituales o auxiliares?. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 421-432.

Las cuevas en torno al poblado ibérico de Sant Josep (La Vall d'Uixó): ¿Espacios rituales o auxiliares?

S. Machause López

Av. Blasco Ibáñez, 28. 46010 València (Universitat de València) Sonia.machause@uv.es

RESUMEN

Las cuevas son espacios naturales cuyo simbolismo ha sido reconocido desde la Prehistoria hasta nuestros días. Durante la época ibérica (siglos VI-I a.C.), determinadas cavidades, generalmente alejadas de los lugares de hábitat, fueron escenario de diversos rituales de paso protagonizados por un grupo selecto de la población. A través de las evidencias materiales conservadas en estos espacios, podemos reconstruir parte de las prácticas acontecidas. Para ello, debemos tener en cuenta no solo los materiales, sino también la localización de estas cavidades y su relación con el poblamiento circundante. En el paraje cercano a les Coves de Sant Josep, contamos con dos interesantes ejemplos: la Cova de Can Ballester y la Cova dels Orgues. Si bien ambas cuevas han sido altamente afectadas sedimentológicamente, los datos recuperados a través de diversas intervenciones arqueológicas nos aportan información relevante sobre su uso durante la época ibérica. Generalmente, las cuevas que presentan materiales ibéricos suelen relacionarse con actividades rituales, sin embargo, esta no es su única función posible. De hecho, las características físicas, locacionales y materiales de las cuevas situadas en torno al poblado ibérico de Sant Josep, se relacionan más bien con su uso como espacios auxiliares que como lugares sacros. Así pues, tanto la Cova dels Orgues como la Cova de Can Ballester estarían relacionadas con las actividades productivas del hábitat permanente, sin contar con las características habituales detectadas en otras cuevas con un uso claramente ritual. Su situación a pocos metros del poblado, sus características óptimas para el almacenaje o el hábitat secundario y sus materiales relativamente abundantes que no muestran pautas rituales de depósito y acumulación de determinados elementos, ratifican esta interpretación.

Palabras clave: cueva prehistórica, cultura ibérica, La Vall d'Uixó, ritualidad, Sant Josep.

The caves around the Iberian site of Sant Josep (La Vall d'Uixó): ¿Are they ritual or auxiliary spaces?

ABSTRACT

Caves are natural spaces whose symbolism has been recognized since the prehistory to the present day. During the Iberian period (from the 6th century to the 1st century BC), some cavities, generally far from the habitat places, were the scene of different rituals of passage carried out by a select group of the population. Through the material evidence preserved in these spaces we can reconstruct part of the practices that were performed inside of these natural spaces. However, we cannot understand its use without taking into account its location and its relationship with the surrounding settlements. In the area near to Les Coves de Sant Josep, there are two interesting examples: Cova de Can Ballester and Cova dels Orgues. Although both caves have been highly affected sedimentologically, the data collected in the excavations provide relevant information about their use during the Iberian period. Generally, the caves that contain Iberian materials were used as ritual spaces, but this is not their only possible function. In fact, the physical, locational and material characteristics of the caves situated around the Iberian settlement of Sant Josep are related more to their use as auxiliary spaces than as sacred places. Thus, both Cova dels Orgues and Cova de Can Ballester would be related to the productive activities of the permanent habitat. Their characteristics are different from the other caves with a clearly ritual use. Their location, a few meters from the town, their optimal characteristics for storage or secondary

habitat with light and twilight zones, and the absence of ritual patterns of deposit and accumulation of certain elements, confirm a use other than ritual activities.

Keywords: Iberian culture, La Vall d'Uixó, prehistoric cave, ritual, Sant Josep.

Introducción

El término actual de La Vall d'Uixó ocupa un espacio de transición entre la Sierra de Espadán y la llanura aluvial de la Plana, por lo que presenta fuertes desniveles. La composición geológica de la zona tiende en gran medida a la karstificación y a la fisuración, lo cual da lugar a la formación de numerosas cavidades. Del conjunto de cuevas documentadas en el término de La Vall d'Uixó destacamos aquí dos cuevas y sus covachos asociados: la Cova de Can Ballester y la Cova dels Orgues, porque son las que cuentan con una cantidad más representativa de materiales ibéricos. Ambas se encuentran a unos 160 msnm, a 1 km de la actual población de La Vall d'Uixó, al pie de las estribaciones orientales de la Serra d'Espadà (figura 1). Son dos de las nueve cavidades que componen el sistema kárstico del barranco. Sobre ellas, a unos 180 msnm, se halla el poblado ibero-romano de San Josep y a pocos metros se encuentra la boca de la cueva del mismo nombre, con la cual estaba conectada Can Ballester en origen (Gusi y Olària, 1979; Gusi, 1985, 2000, 2001; Casabó y Rovira, 1990-1991; Oliver, 2010).

La explotación turística realizada sobre todo en el margen izquierdo del Barranc de Sant Josep, a pocos metros del cauce del río Belcaire, ha afectado en gran medida la conservación sedimentológica y arqueológica de sus cuevas. Las características de las intervenciones arqueológicas realizadas en esta zona son bastante homogéneas. Se trata de excavaciones de urgencia, llevadas a cabo a raíz de la explotación turística del paseo cercano a las Grutas de Sant Josep. La mayoría de estas cavidades son propiedad privada, por lo que han sido víctimas de una construcción descontrolada durante los años 70 y 80. Si bien en algunos casos se ha podido recoger material en superficie y se ha realizado alguna excavación de urgencia, la secuencia



Figura 1. Situación de La Vall d'Uixó y vista del cerro de Sant Josep desde el río Belcaire: poblado de San Josep (1), cova dels Orgues (2), La Cova (3), cova de Can Ballester (4) y Coves de San Josep (5).

estratigráfica de la mayoría de ellas se ha perdido. En 1994, con el objetivo de realizar un estudio de impacto ambiental y remodelar el paseo que daba acceso a las Grutas de Sant Josep, se llevaron a cabo varios sondeos junto a los muros de los restaurantes y comercios situados en la base de la montaña. La información de estos sondeos se recoge en una completa memoria depositada en el Museu Arqueològic Municipal de La Vall d'Uixó (González y Viñuela, 1994).

Los materiales de Can Ballester que presentamos aquí, proceden de una intervención previa, tanto en el interior de la cavidad principal como en sus dos covachos. Dicha excavación se llevó a cabo en 1976, tras la noticia de su destrucción por parte del propietario para instalar un salón/comedor (actual Restaurante "La Gruta"). Por suerte, algunos vecinos de la localidad recogieron parte de los materiales, que evidenciaban una frecuentación desde el Epipaleolítico hasta época ibérica. Aunque la cueva se vació casi por completo, se pudo realizar un pequeño sondeo en una zona inalterada que aportó materiales escasos pero muy interesantes (Gusi, 1976; Gusi y Olària, 1979). Por otra parte, se identificaron dos covachos cercanos a la cueva principal, que iban a ser transformados en dependencias anexas a la cocina del restaurante. Como estos no habían sido alterados por las obras, se decidió realizar una excavación de urgencia en enero de 1977 (Gusi, 1976; Gusi y Olària, 1979). Posteriormente, en 1981, antes de que se destruyera por completo la Cova Gran como consecuencia de un nuevo permiso para realizar obras en el mismo lugar, el Servicio de Investigaciones Arqueológicas y Prehistóricas (SIAP) realizó un pequeño corte estratigráfico. Sin embargo, debido a la alteración sufrida por la cueva durante los últimos cinco años, la bóveda se desprendió impidiendo continuar los trabajos de excavación. Los materiales de esta última intervención fueron, básicamente, material lítico y óseo, pero muy escaso (Casabo y Rovira, 1990-1991; Gusi, 2000). Por lo que respecta a la Cova dels Orgues, dicha área fue uno de los focos de excavación durante los sondeos de 1994. Se realizó un sondeo frente a la entrada, siendo ésta la zona más cercana a la cueva que seguía siendo propiedad del ayuntamiento (Oliver, 2010). Además, se llevó a cabo una limpieza de los covachos y un sondeo en el más próximo, situado a unos 4 m de distancia. Si bien el material hallado en este último fue muy escaso, documentándose cerámicas a mano, junto a cerámicas ibéricas y modernas (González y Viñuela, 1994), el registro arqueológico recuperado en el sondeo de la entrada a la cueva principal evidencia un uso continuado de este espacio (Oliver, 2010).

Con motivo de la tesis doctoral llevada a cabo sobre las cuevas como espacios rituales en época ibérica (Machause, 2017), llevamos a cabo una revisión completa de las intervenciones y los materiales recogidos en Can Ballester y Orgues, depositados en el SIAP y en el Museu Arqueològic Municipal de La Vall d'Uixó, respectivamente. A continuación, expondremos los principales resultados de dicho análisis. Si bien existen algunas referencias orales sobre la presencia de materiales ibéricos a la entrada de la Cova de Sant Josep, la explotación turística a la que está sometida esta gruta, junto con las constantes surgencias de agua producidas en su interior, han afectado por completo la conservación de la sedimentación arqueológica.

Materiales y métodos

La mayoría de materiales que presentamos en este artículo son cerámicos. Su análisis se ha basado principalmente en la tipología existente sobre cerámica ibérica, en la que se diferencia entre cerámica fina o Clase A y cerámica tosca o Clase B (Mata y Bonet, 1992). Dentro del primer

tipo, encontramos diversos grupos a los que haremos referencia en las siguientes líneas: grupo I (grandes contenedores para el almacenaje o transporte), grupo II (recipientes multifuncionales relacionados con la despensa u otras actividades domésticas y artesanales), grupo III (servicio y vajilla de mesa), grupo IV (microvasos), grupo V (auxiliares) y grupo VI (imitaciones).

Cova de Can Ballester

El conjunto de Can Ballester, hoy en día ocupado por el restaurante *La Gruta*, está formado por una cueva principal (la cova Gran) y dos covachos. En el momento de su hallazgo, la cavidad principal contaba con unas dimensiones de 11,80 m de anchura, 21,40 m de longitud y una altura de entre 3 y 6 m (Gusi, 1976, 1985, 2000; Gusi y Olària, 1979; Fernández *et al.*, 1982; Casabó y Rovira, 1990-1991; Moraño y García, 1990-1991) (figura 2). La secuencia estratigráfica de la Cova Gran fue completamente destruida. Sin embargo, el interior de ambos covachos se encontraba completamente colmatado por la sedimentación. En el sondeo del covacho 1 se identificaron cinco niveles. Los materiales ibéricos aparecieron en el nivel superficial, mientras que los otros cuatro evidenciaron materiales del Bronce, Eneolítico y Neolítico respectivamente. En el covacho 2, se distinguieron seis niveles, documentándose más materiales ibéricos en su nivel superficial que en el del covacho 1. Los siguientes niveles evidenciaron materiales desde el Bronce al Epipaleolítico. Ambos covachos mostraron similitudes cronológicas y culturales que seguramente coincidirían con la información que podría haber aportado la cova Gran (Gusi y Olària, 1979; Casabó y Rovira, 1990-1991).

Si bien la mayoría de materiales procedentes tanto de la cova Gran como de la intervención arqueológica de los dos covachos se adscriben principalmente a momentos prehistóricos, destacamos aquí los niveles superiores donde se documentaron materiales de cronología ibérica. Lamentablemente, aunque hay constancia del hallazgo de abundantes cerámicas ibéricas durante

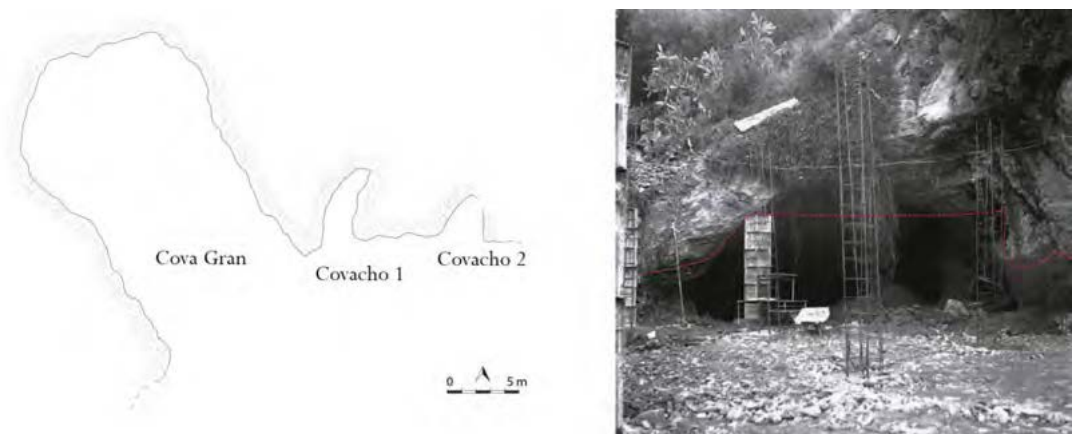


Figura 2. Planta de la cova Gran y de los covachos (a partir de Gusi y Olària, 1979: fig. 1) (i); Vista de la cova Gran durante la construcción del restaurante, con el nivel de sedimentación original indicado (a partir de Gusi y Olària, 1979: lám. 1) (d).

los trabajos que destruyeron la cova Gran, en el lote de materiales aportados por los vecinos de la localidad tan solo se incluyeron dos recipientes de cerámica ibérica (Gusi y Olària, 1979). Según la publicación de los resultados de esta excavación, la mayoría de materiales ibéricos proceden del covacho 2 (Gusi y Olària, 1979). Sin embargo, las referencias a los materiales de cronología ibérica no son precisas y nos ha sido imposible establecer la procedencia exacta de todos los materiales, por lo que realizamos un análisis global de los mismos.

A excepción de una aguja de bronce, que pudo pertenecer a época ibérica, el resto de materiales de dicha cronología, son cerámicos. Documentamos un total de 464 fragmentos, que corresponden a un Número Mínimo de Individuos (NMI a partir de ahora) de 27. La mayoría de recipientes son de Clase A o cerámica fina (75,86%), destacando el grupo II (35% entre los determinados de Clase A), así como los grupos I y III (25% del total de determinados de Clase A). Mientras que sólo se documenta un 10,34% de Clase B o cerámica tosca. El resto de recipientes son importaciones fenicias (6,90%) y cerámicas grises de otras áreas ibéricas (6,90%). De las 27 formas identificadas, 12 de ellas presentan algún tipo de decoración pintada a base de bandas y filetes principalmente, siendo una de ellas bícroma. Destacamos además los motivos vegetales del *Kalathos* CCB34 (figura 3).

La estratigrafía de ambos covachos no es concluyente en los niveles en los que se halló la cerámica de cronología ibérica. Sin embargo, sus formas y decoraciones, así como las importaciones, nos permiten establecer una horquilla cronológica bastante amplia, desde el s. VI hasta el s. II a.C. Así pues, los momentos más antiguos están presentes a través de las importaciones fenicias y las decoraciones bícromas (figura 3: CCB29). El s. IV a.C. está presente a través de la pátera de imitación griega hallada en la Cova Gran (figura 3: CCB30). Mientras que los momentos más recientes aparecen representados a través de formas como el *kalathos* decorado con motivos vegetales (figura 3: CCB34). Con los datos que disponemos, tan solo podemos indicar que existieron diversos momentos de frecuentación durante época ibérica, sin conocer si alguno de ellos tuvo mayor o menor relevancia.

Cova dels Orgues

El nombre de la cova dels Orgues, también citada como Cueva de los Órganos (Sarhou 1920) o cova dels Orguens (Oliver, 2010), deriva de la apariencia de sus formaciones kársticas que *semejan los canalones de un órgano de iglesia* (Sarhou, 1920). Esta cueva cuenta con tres bocas de acceso comunicadas entre sí en el interior, dos pequeñas y una principal de mayores dimensiones (Fernández *et al.*, 1982). La boca principal está orientada hacia el suroeste, es de fácil acceso y cuenta con unas medidas de 4,5 m de ancho por 5 m de alto (figura 4). Esta da paso a una galería de 43 m de longitud, con una anchura y altura máximas de 3 por 5 m (Fernández *et al.*, 1982). Según las descripciones existentes sobre su interior, en el último tramo, existiría un *tabique horizontal* natural que dividiría la cueva en dos alturas (Sarhou, 1920).

Tal y como observamos en la figura 5, el sondeo realizado en 1994 se situó justo delante de la reja de la entrada actual. En la publicación existente sobre esta cueva, A. Oliver recoge la información más relevante de este sondeo, por lo que aquí nos limitaremos a realizar una descripción general de la intervención, así como a añadir imágenes inéditas cedidas por el Museu

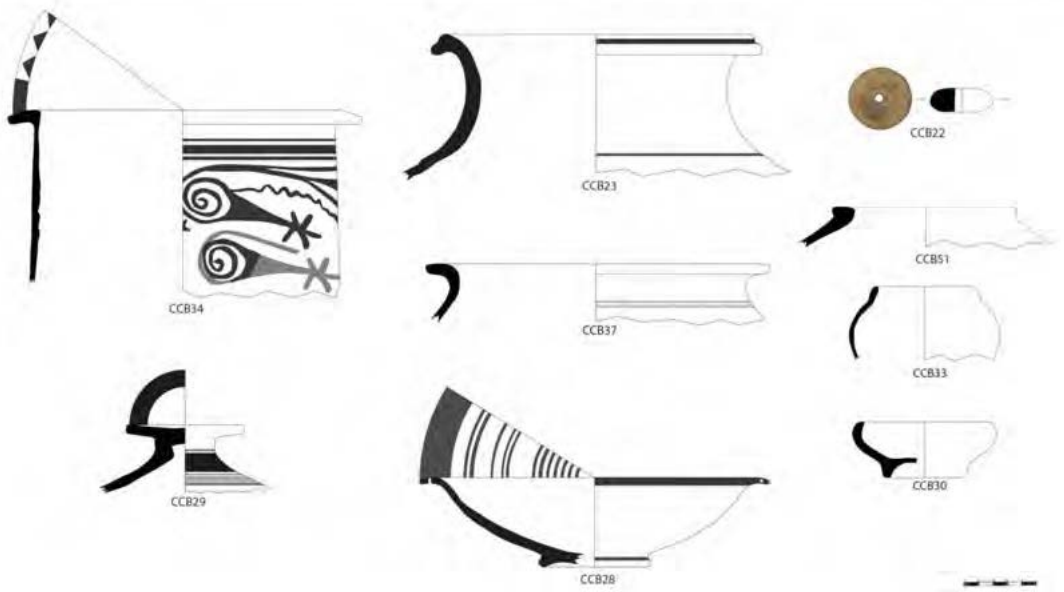
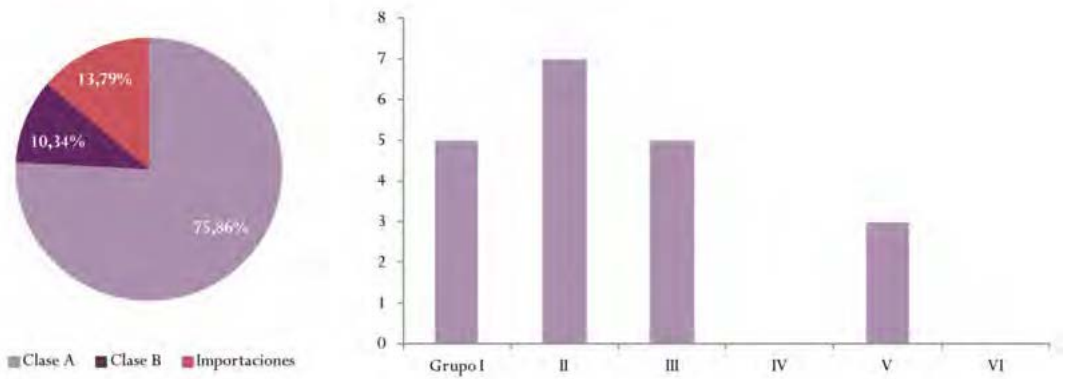


Figura 3. Representación porcentual de las cerámicas de cronología ibérica halladas en la cova de Can Ballester y dibujos de algunos de los recipientes más representativos (elaboración propia).

Arqueològic Municipal de La Vall d'Uixó que nos ayudarán a comprender la problemática de esta intervención (Oliver, 2010). En primer lugar, debemos tener en cuenta que los materiales recogidos durante el sondeo proceden todos de la entrada a la cavidad. No se conocen materiales hallados en el interior de la misma. En segundo lugar, la excavación se limitó a un sondeo que no refleja la potencia estratigráfica del acceso a la cueva en su conjunto. Sin embargo, las características de los materiales, nos aportan información relevante a tener en cuenta a la hora de realizar algún tipo de interpretación sobre el uso de este espacio en época ibérica.

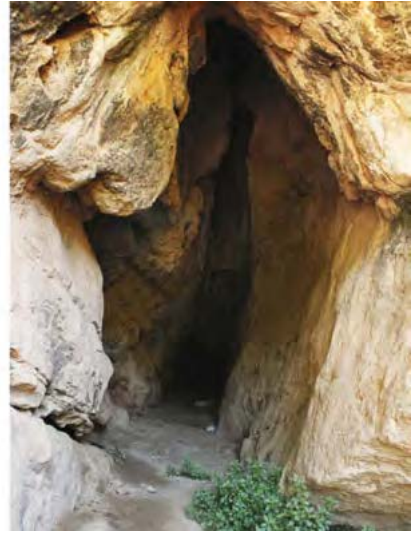
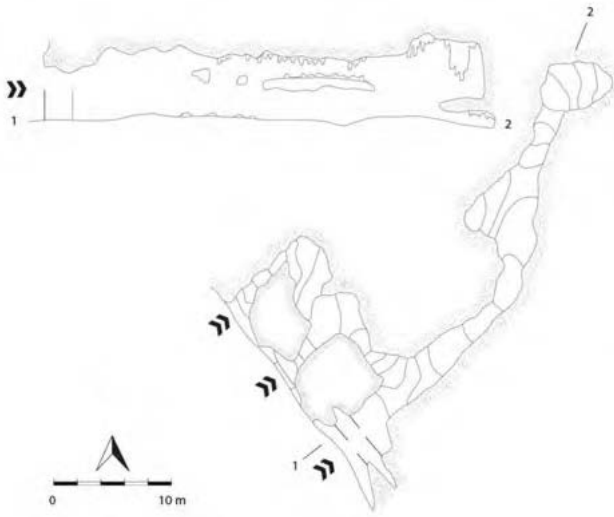


Figura 4. Plano y sección de la cova dels Orgues (a partir de Fernández et al., 1982: 128); Vista de la boca principal de la cueva (Oliver, 2010: fig. 2) para la planta del covacho 1.

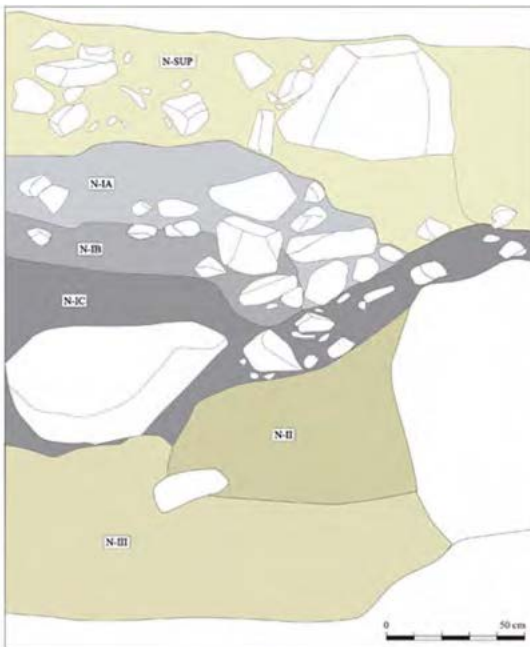


Figura 5. Corte estratigráfico del sondeo (a partir González y Viñuela, 1994; Oliver, 2010: fig.4) con imágenes del comienzo del sondeo y del final de la excavación del nivel I (fotografía: Museu Arqueològic de La Vall d'Uixò).

Tal y como se indica en la memoria de excavación (González y Viñuela, 1994) se documentaron tres niveles, aparte del nivel superficial en el que existe una clara remoción de cerámicas de varias épocas. Al comenzar la excavación del nivel I, se observa un muro de aproximadamente 1,20 m de longitud máxima. En relación a esta construcción, se diferencian tres zonas en el nivel I, una al suroeste del muro (zona 1) y dos al noreste del mismo (zona 2 y 3) (figura 5). Son de especial interés las apreciaciones que se realizan en la memoria, en relación a estas zonas, ya que el suelo que aparece al final del nivel I y se adosa al muro, tan solo se aprecia en la zona 2 y 3. Por lo tanto, parece ser que se prepararía un suelo tan solo en la zona que queda al interior del muro y más cercana a la cueva. Una vez se desmonta el muro, se excava el suelo del nivel I, para llegar al nivel II. Conforme se excava este segundo nivel, se observa la disminución de cerámica ibérica y el aumento de las importaciones fenicias, hasta llegar al nivel III, cuyos materiales son básicamente cerámicas de la Edad del Bronce (González y Viñuela, 1994; Oliver, 2010).

A continuación realizaremos una valoración global de los materiales procedentes de niveles de época ibérica: nivel superficial, nivel I, donde se concentran la mayoría de materiales, y nivel II. Del total de 5254 fragmentos, documentamos un NMI de 199, destacando las cerámicas ibéricas (NMI 193, 96,98%), frente a las importaciones (NMI 5, 3,02%). En el conjunto de cerámicas ibéricas, las más representativas son las cerámicas finas o de Clase A (156, 78,39%), en especial las cerámicas del grupo I (35,90% del total de Clase A) y las del grupo III (30,77% del total de Clase A). Mientras que las cerámicas toscas o de Clase B tan solo representan el 18,59% del total (NMI 37) (figura 6). Si observamos la muestra estudiada basándonos en los tres niveles indicados con anterioridad, vemos que el nivel I es el que presenta tanto un mayor número de fragmentos (3824), como de recipientes (163). Mientras que los niveles con material removido, cuentan con 24 recipientes (1006 frags.). Y el nivel II con un NMI de 12 (424 frags.). Además, tal y como se indica en la memoria de excavación, la presencia de fragmentos de origen fenicio y materiales de la Edad del Bronce, aumenta en el Nivel IC y el Nivel II. Por lo tanto, aunque haya una ligera remoción en los primeros niveles, sí que existe una estratigrafía clara en los niveles finales (González y Viñuela, 1994).

Aparte de los materiales cerámicos, también se documentaron tres fragmentos de bronce pertenecientes a una varilla de sección circular (nivel IC) y un total de 406 restos de fauna. Estos restos fueron objeto de un análisis preliminar por P. Iborra, identificándose una representación mayor de ovicaprinos, bovinos y suidos (Oliver, 2010). Del mismo modo que ocurre con el volumen de cerámicas, la mayoría de restos faunísticos se localizan en el Nivel IC (32,02%) y en el Nivel II (34,48%).

Por lo que respecta a la cronología de la frecuentación ibérica del espacio cercano a la Cova dels Orgues, tal y como indica Oliver (2010), los niveles superficiales presentan una clara remoción material. Existe una convivencia entre cerámicas fenicias, con formas ibéricas de características propias entre el s. V-III/II a.C. La decoración geométrica es algo más elaborada en los fragmentos hallados en estos niveles: melenas y motivos circulares, frente a la preeminencia de decoraciones simples en los niveles inferiores (IC y II) (figura 6: COR 211). Las cerámicas áticas, que aportan una cronología del s. IV a.C., se documentan tanto en el nivel IA, como en el IB. Las importaciones fenicias están presentes en todos los niveles, mostrando por tanto cierta remoción incluso en el nivel IA. Sin embargo, bien es cierto que el número de fragmentos es mucho mayor en el Nivel IC (257 frags.) y en el nivel II (80 frags.). En líneas generales, podemos deducir, por

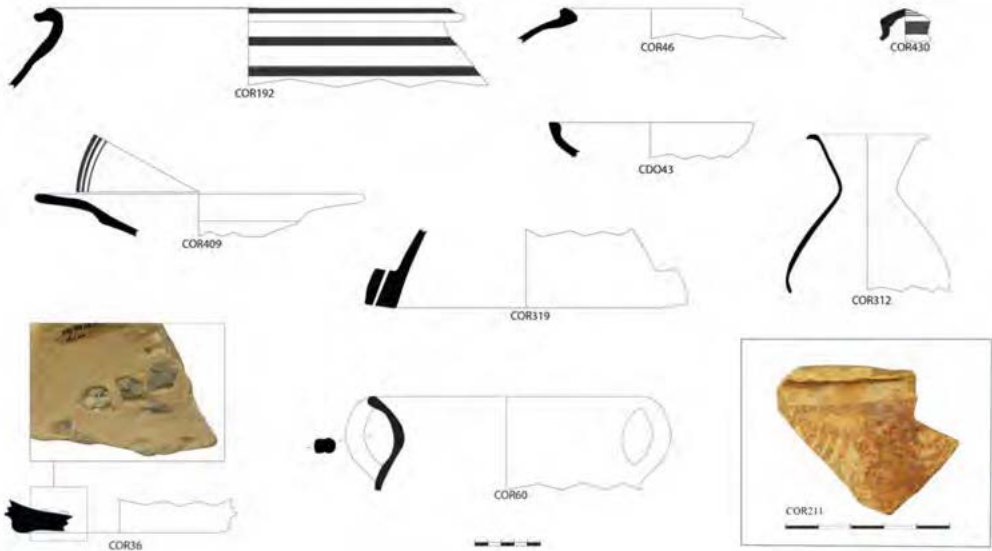
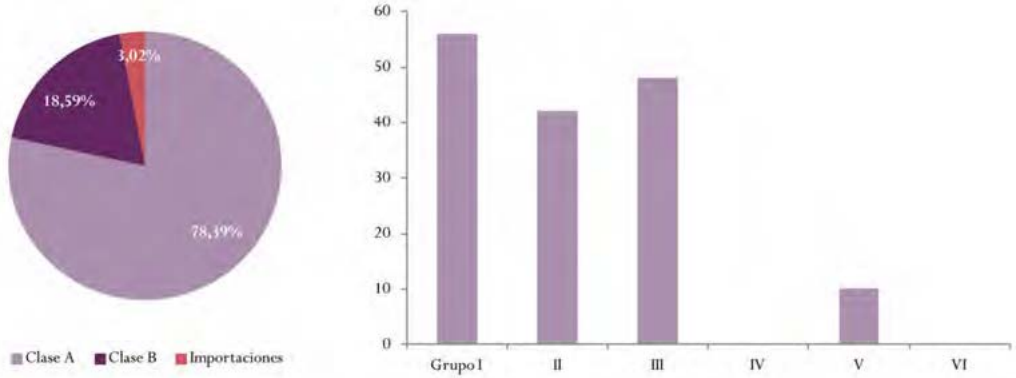


Figura 6. Representación porcentual de las cerámicas de cronología ibérica halladas en la intervención frente a la cova dels Orgues y dibujos de algunos de los recipientes más representativos.

tanto, que hubo al menos dos momentos de uso del espacio situado a la entrada de la cavidad en época ibérica. Un primer momento entre los ss. VI-V a.C., que estaría representado por el Nivel II y el nivel IC. Y un segundo momento entre los ss. V-III/I a.C., en el cual se construyó un muro y un nivel de suelo en la zona más cercana a la cueva.

¿Espacios rituales o auxiliares?

Los estudios previos a esta revisión han aportado interpretaciones diversas para ambos contextos, siempre relacionándolos con el poblado ibérico del Cerro de Sant Josep, ocupado desde el s. V

a.C. (Gusi y Olària, 1979; Rosas, 1981, 1984, 1991). En el caso de Can Ballester, se ha relacionado tanto con una actividad ritual similar a la que se documenta en otras cuevas de la zona, teniendo en cuenta la importancia de las aguas de la Gruta de Sant Josep para la ritualidad del espacio (Járrega, 2010; Blázquez *et al.*, 1994), como con un uso de refugio esporádico en época ibérica (González-Alcalde, 2002-2003a; 2002). Por lo que respecta a la cova dels Orgues, son muy pocas las referencias publicadas sobre esta cueva ya que permaneció inédita hasta que en 2010 A. Oliver publicó parte de los resultados de la intervención de 1994, proponiendo dos interpretaciones posibles. Por una parte, indica la cercanía al poblado de Sant Josep, reflexionando sobre el posible uso de la cueva como un espacio artesanal o de vivienda, habitada por agricultores o pastores que explotaban el entorno (Oliver, 2010). Y por otra parte, indica su posible uso sacralizado relacionado con la cercanía del río Belcaire y el río subterráneo de las Grutas de Sant Josep, así como la presencia de importaciones de varias épocas. De todos modos, de considerar un uso ritualizado de este espacio, indica que se trataría de un lugar de culto periurbano o de entrada, diferente a las conocidas como cuevas-santuario que publicaron Gil-Mascarell (1975) o González-Alcalde (1993b, 2002-2003a) (Oliver, 2010).

Si analizamos ambos casos en su contexto y comparamos los resultados presentados aquí con otras evidencias de materiales ibéricos en cuevas de esta zona (Gil-Mascarell, 1975; González-Alcalde, 1993, 2002, 2002-2003; Grau y Amorós, 2013; Machause *et al.*, 2014; Machause, 2017, entre otros), observamos que Can Ballester y Orgues se relacionarían más bien con un uso como espacios auxiliares que como lugares sacros. Las características locacionales, físicas y materiales de la cova dels Orgues y de la cova de Can Ballester evidencian un uso de estos espacios relacionado con las actividades productivas del hábitat permanente. Esta afirmación se basa tanto en su cercanía al poblado de Sant Josep, como en las características óptimas para el almacenaje o el hábitat secundario de su interior y los materiales que no muestran pautas rituales de depósito y acumulación de determinados elementos, como ocurre en otras cuevas con un uso claramente ritual.

En el caso específico de la cova dels Orgues el tipo de materiales documentados es muy diferente al de otras cuevas con evidencias de ritualidad (Machause, 2017). No se produce una repetición evidente de un solo tipo cerámico, pero sí destaca la cantidad de grandes contenedores. La presencia de este tipo de recipientes, pudo estar relacionada con el uso del espacio como un área de almacenaje o simplemente un área auxiliar de alguna vivienda localizada a orillas del río y dependiente del poblado situado en la cima de la montaña. Es cierto que la presencia de importaciones (áticas y fenicias) en este tipo de contextos, se suele asociar con algún tipo de ofrenda ritual. Sin embargo, no se trata de pequeñas copas o vasos como en otras cuevas claramente rituales, sino que se trata principalmente de grandes contenedores de almacenaje, como ánforas o tinajas.

De todos modos, el registro material disponible es limitado, ya que no contamos con excavaciones arqueológicas propiamente dichas en el interior de estas cavidades. Si bien no podemos proponer un uso ritual de las cuevas situadas en torno al poblado de Sant Josep, no negamos que futuras intervenciones aporten datos que nos permitan reinterpretar su uso durante época ibérica.

Agradecimientos

Agradecemos a Marisa Rovira y Arturo Oliver su colaboración durante la revisión de materiales de la cova dels Orgues y la cova de Can Ballester en el Museu Arqueològic de la Vall d'Uixò y en el Museu de Belles Arts de Castelló-SIAP, respectivamente.

Referencias

- Blázquez, A., Garay, P. y Medina, R. 1994. Estudio de la Cova de Sant Josep (La Vall d'Uixò, Comarca de la Plana Baixa). Parte I: Topografía. *Lapiaz*, 23, 19-34.
- Casabó, J. y Rovira, M^a. L. 1990-1991. La industria lítica de la Cova de Can Ballester (La Vall d'Uixò, Castellón). *LVCENTVM*, IX-X, 7-24.
- Fernández, J., Garay, P., Giménez, S., Ibañez, P. A. y Sendra, A. 1982. *Catálogo espeleológico del País Valenciano*, tomo II. Federació Valenciana d'Espeleologia, Valencia.
- Gil-Mascarell, M. 1975. Sobre las cuevas ibéricas del País Valenciano. Materiales y problemas. *SAGVNTVM-PLAV*, 11, 281-332.
- González, A. y Viñuela, A. 1994. *Sondeos del paseo de Sant Josep*, Diario de excavación inédito depositado en el Museu Arqueològic Municipal de la Vall d'Uixò.
- González-Alcalde, J. 1993. Las cuevas santuario ibéricas en el País Valenciano: Un ensayo de interpretación. *Verdolay*, 5, 67-78.
- González-Alcalde, J. 2002. *Las cuevas santuario y su incidencia en el contexto social del mundo ibérico*, Tesis doctoral inédita, Universidad Complutense de Madrid.
- González-Alcalde, J. 2002-2003. Cuevas-refugio y cuevas-santuario en Castellón y Valencia: Espacios de resguardo y entornos iniciáticos en el mundo ibérico. *Quaderns de Prehistòria i Arqueologia de Castelló*, 23, 187-240.
- Grau, I. y Amorós, I. 2013. La delimitación simbólica de los espacios territoriales: el culto en el confín y las cuevas-santuario. In: Rísquez, C. y Rueda, C. (eds.), *Santuarios iberos: Territorio, ritualidad y memoria*. Actas del Congreso Internacional "El Santuario de la Cueva de La Lobera de Castellar. 1912-2012" (Jaén, 4-6 octubre 2012), Asociación para el desarrollo rural de la Comarca de El Condado, Jaén, 183-212.
- Gusi, F. 1976. Excavaciones de salvamento en los covachos eneolíticos de Can Ballester (Vall d'Uixò). *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología Castellonenses*, 3, 281-282.
- Gusi, F. 2001. *Castellón en la Prehistoria. Memoria de los tiempos de ensueño*. Colección de Prehistoria y arqueología castellonenses, Diputació de Castelló, 366.
- Gusi, F. (Coord.). 1985. *X aniversari (1975-1985)*. *Servei d'Investigacions Arqueològiques i Prehistòriques*. Diputació de Castelló, 86.
- Gusi, F. (Coord.). 2000. *XXV aniversari (1975-2000)*. *Servei d'Investigacions Arqueològiques i Prehistòriques*. Diputació de Castelló.
- Gusi, F. y Olària, C. 1979. El yacimiento prehistórico de Can Ballester (Vall d'Uixò, Castellón). *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología Castellonenses*, 6, 39-96.
- Járrega, R. 2010. *El poblamiento de la Plana en época romana*. Universitat Jaume I, Castellón de la Plana, 607.
- Machause López, S. 2017. *Las cuevas como espacios rituales en época ibérica. Los casos de Kelin, Edeta y Arse*. Tesis doctoral inédita, Universitat de València.
- Machause López, S., Pérez, A., Vidal, P. y Sanchis, A. 2014. Prácticas rituales ibéricas en la Cueva del Sapo (Chiva, Valencia): Más allá del caliciforme. *Zephyrus*, LXXIV, 157-179.
- Mata, C. y Bonet, H. 1992. La cerámica ibérica: ensayo de tipología. In: Juan Cabanilles, J. (coord.), *Estudios de Arqueología ibérica y romana. Homenaje a Enrique Pla Ballester*. Serie de Trabajos Varios del SIP 89, Diputación Provincial de Valencia, 117-173.

- Moraño, I. y García Fuertes, J. M. 1990-1991. Introducción al estudio del poblamiento durante la Edad del Bronce en el Sur de la Plana Baixa (Castellón). *Butlletí de l'Associació Arqueològica de Castelló*, 9/11, 13-67.
- Oliver, A. 2010. Cova dels Orguens, la Vall d'Uixó (Castellón). Un nuevo asentamiento ibérico en cueva. *Quaderns de Prehistòria i Arqueologia de Castelló*, 28, 191-205.
- Rosas, M. 1981. El poblament ibero-romà de Sant Josep (La Vall d'Uixó). Aportació a la història de la Plana durant l'Edat Antiga. *Bulletí de l'Associació Arqueològica de Castelló*, 2, 15-17.
- Rosas, M. 1984. El poblament ibero-romà de Sant Josep (La Vall d'Uixó). *Fonaments. Prehistòria i Món Antic als Països Catalans*, 4, 247-277.
- Rosas, M. 1991. La muralla del poblament de Sant Josep (la Vall d'Uixó, Castelló). In: VVAA., *Actes del Simposi Internacional d'Arqueologia Ibèrica: Fortificacions. La problemàtica del Ibèric Ple* (Manresa 1990). Centre d'Estudis del Bages-Societat Catalana d'Arqueologia, Manresa, 315-319.
- Sarthou, C. 1920. Provincia de Castellón. In: Carreras y Candi, F. (dir.), *Geografía General del Reino de Valencia*, tomo IV. A. Martin Editorial, Barcelona.



Aplicación de nuevas tecnologías en cuevas turísticas

E. Navarrete-Martín, et al., 2018. Eficiencia energética del sistema de iluminación de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva): un paso más hacia un turismo sostenible. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 435-444.

Eficiencia energética del sistema de iluminación de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva): un paso más hacia un turismo sostenible

E. Navarrete-Martín⁽¹⁾, W. Martín-Rosales⁽²⁾, O. Rabaza-Castillo⁽³⁾, E. Romero-Bomba⁽¹⁾, M. López-Chicano⁽²⁾, R. Moya-Díaz⁽¹⁾, A.B. Torres-Asensio⁽¹⁾ y M. Guerra-González⁽¹⁾

(1) Excmo. Ayuntamiento de Aracena, 21200 (Aracena, Huelva). turismo@ayto-aracena.es

(2) Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada 18071, (Granada, España). wmartin@ugr.es

(3) Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Granada 18071, (Granada, España)

RESUMEN

Es bien sabido que el turismo subterráneo es una actividad generadora de beneficios, si bien una gestión inadecuada del mismo puede causar daños y perjuicios irreversibles en el patrimonio cultural y natural. En el caso de las cuevas habilitadas para las visitas turísticas, uno de los impactos más importantes es el derivado del sistema de iluminación, por otro lado imprescindible en cavidades donde se quiere resaltar el patrimonio geológico (morfologías de galerías y salas, espeleotemas y zonas inundadas). Un sistema de iluminación inadecuado puede derivar en modificaciones del medio ambiente subterráneo, tales como el aumento de la temperatura del aire, desarrollo de algas, e incluso costes económicos excesivos que podrían poner en riesgo la viabilidad de la explotación turística. En este trabajo se muestran los resultados del análisis de eficiencia energética del sistema de iluminación de la Gruta de las Maravillas durante el decenio 2006-2016, periodo en el que ha tenido lugar la sustitución progresiva del sistema de iluminación, desde las tradicionales fuentes de luz de tipo incandescente, aún en funcionamiento a principios de 2006, hasta los sistemas basados en la tecnología LED (en pleno funcionamiento en 2016), pasando por las lámparas de bajo consumo, que estuvieron operativas en toda la cavidad durante el año 2011. Se ha analizado la eficiencia energética, en términos de Kvh por visitante de los dos últimos sistemas de iluminación con respecto al inicial, teniendo en cuenta la afluencia de visitantes, grupos, así como los tramos horarios. Los resultados demuestran que el actual sistema basado en la tecnología LED supone un ahorro energético del 70 % con respecto al tradicional existente hasta 2006. Asimismo, se ha constatado la eficiencia en la reducción de la temperatura del aire, que ha descendido, en media, casi 0,8 °C en el mes de agosto, el de mayor afluencia de visitantes.

Palabras clave: cuevas turísticas, eficiencia energética, gestión ambiental, Gruta de las Maravillas, turismo sostenible.

Energy efficiency of the lighting system of the Grotto of Maravillas (Aracena, Huelva): a step towards sustainable tourism

ABSTRACT

It is well known that underground tourism is a profit generating activity, although an inadequate management of it can cause irreversible damage to the cultural and natural heritage. In the case of show caves, one of the most important impacts is that related to the lighting system, on the other hand it is essential in the cavities where the geological heritage stands out (morphologies of galleries and halls, speleothems and flooded areas). An inadequate lighting system can cause changes in the underground environment, such as increased air temperature, the development of algae and even excessive economic costs that could jeopardize the viability of tourism exploitation. This article shows the results of the energy efficiency analysis of the lighting system of the Cave of Marvels during the decade 2006-2016, period in which

there has been the progressive replacement of the lighting system, from traditional sources of light from the incandescent type, in operation at the beginning of 2006, to systems based on LED technology (fully operational in 2016), including energy-saving lamps, which were operational throughout the cavity during 2011. The energy efficiency has been analyzed in terms of kWh per visitor of the last two lighting systems compared to the initial, taking into account the influence of visitors, groups, as well as time segments. The results show that the current system based on LED technology represents an energy saving of 70% compared to the traditional system that existed until 2006. In addition, the efficiency in the reduction of air temperature has been verified, which has decreased, on average, 0,8 °C in the month of August, one of greater affluence of visitors.

Keywords: energy efficiency, environmental management, Maravillas Grotto, sustainable tourism, tourist caves.

Introducción

Uno de los aspectos esenciales de la habilitación de cuevas para su uso turístico es la iluminación. Es sin duda uno de los pasos clave para la puesta en valor de las cuevas turísticas y su implantación está condicionada por el tipo de patrimonio a mostrar al visitante (arqueológico, geológico, etc). Evidentemente, al igual que las visitas, la iluminación puede constituir una fuente de contaminación en las cuevas, ya que el uso de dispositivos luminarios inadecuados en estos ambientes provoca una modificación de la temperatura del aire, además de inducir el desarrollo de algas y cianobacterias, entre otros. Existen diversos trabajos encaminados al desarrollo de estrategias para controlar el desarrollo de dichos microorganismos, como por ejemplo a través del diseño sistemas de iluminación específicos basados en la información pigmentaria ofrecida por las técnicas de microscopía (Del Rosal, 2016). Por otra parte, la iluminación de cavidades con gran desarrollo espacial constituye un elemento esencial en los costes de explotación, derivado, lógicamente, del consumo eléctrico, que está en relación directa con la afluencia de visitantes. Una de las estrategias para la reducción de los impactos derivados de la iluminación de las cavidades ha sido la de utilizar sistemas denominados genéricamente de "luz fría", con menor poder calorífico y menores consumos, aunque requieren un cierto esfuerzo de inversión. El objetivo del presente trabajo es precisamente estimar la eficiencia energética del actual sistema de iluminación operativo en la Gruta de las Maravillas (Aracena) desde 2016, basado en la tecnología LED, que posee diversas ventajas respecto de los sistemas tradicionales basados en lámparas de incandescencia (Porfilio, 2012).

Fuentes de información y metodología de estudio

La información de partida utilizada para la elaboración del análisis procede de diversas fuentes; por un lado, se han obtenido los datos de consumo eléctrico mensual de las distintas franjas horarias y potencia demandada durante el periodo de estudio a partir de los denominados ficheros SIPS (Sistema de Información del Punto de Suministro), relacionados con el contrato de suministro eléctrico de la Gruta. Además, se han tenido en cuenta los tramos de tarificación horaria, según también el contrato eléctrico, que corresponde a una tarifa de acceso denominada 3.0A, en la que se consideran hasta 6 franjas horarias diferentes. Dichos tramos vienen establecidos según Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre, por el que se establecen tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica.

Por otra parte, se analizaron las facturas del suministro eléctrico de la gruta, de las que se extrajeron

la información referente al coste del consumo eléctrico mensual, en los diferentes tramos tarifarios. En la factura se diferencian tres precios diferentes de energía (punta/llano/valle), en función, lógicamente, del periodo en el que se haya consumido la energía. Además, se tuvieron en cuenta las especificaciones de las lámparas, tanto de las que estaban instaladas inicialmente como de aquellas más eficientes que las fueron sustituyendo durante el periodo de tiempo analizado.

Evidentemente, otra fuente de información necesaria para el estudio ha sido el registro de visitantes, especialmente todo lo concerniente a horarios de visitas, número de visitantes por mes, así como el número de grupos, también con frecuencia mensual. Esta información ya se encuentra disponible de forma electrónica en la Oficina de la Gruta de las Maravillas.

Los datos ambientales de la gruta y climatológicos del exterior se han obtenido a partir los registros disponibles, correspondientes a una estación situada en la zona de la cueva denominada *Cristalería de Dios*, y en el exterior, en la cubierta de la iglesia del castillo.

El indicador estimado para determinar la eficiencia energética del sistema de iluminación de la gruta ha sido el ratio o parámetro que hemos denominado "consumo eléctrico por visitante" (CEV), expresado en kWh/visitante, que es la ratio o relación entre el consumo energético y la afluencia de visitantes a la Gruta.

Evolución del sistema de iluminación en la Gruta de las Maravillas

Cuando la Gruta de las Maravillas abrió sus puertas al turismo en 1914, sólo tres años desde que se iniciaran los trabajos de adecuación para las visitas, ya contaba con un sistema de iluminación, si bien éste se restringía a unos cientos de metros de cavidad, la que se conocía entonces. La dirección de las obras corrió a cargo del ingeniero Francisco Carvaláez D'Almeida, quién también realizó el primer plano topográfico de este sector de la cavidad (Romero Bomba et al., 2010). Los nuevos descubrimientos de galerías que produjeron después dieron lugar a un nuevo sistema de alumbrado en 1927, que se mantuvo, con diversas modificaciones, hasta el año 1974, en el que se realizó una importante renovación e innovación en cuanto a técnicas de iluminación. Dicho sistema, fue diseñado en 1974 por la empresa Oficina Técnica Buigas de Barcelona (OTB), cuyo responsable, Carlos Buigas (1898-1979), fue uno de los ingenieros eléctricos de mayor prestigio en el campo de la luminotecnia a nivel nacional, siendo el artífice de proyectos tales como: el conjunto de fuentes luminosas que inauguraron la Exposición Internacional de Barcelona de 1929 u otros trabajos de iluminación en París, Bruselas, Lisboa o Roma, e incluso proyectos de iluminación de cuevas, como las cuevas del Drach (Mallorca) en 1950. La gran contribución de este sistema de iluminación, que en líneas generales es el que se mantiene en la actualidad, fue sin duda su diseño, ya que poseía una gran eficacia paisajística, al destacar de forma artística las morfologías de la cavidad, consiguiendo la luz propicia para este tipo de ambiente. De hecho, la intensidad de iluminación permitía observar los detalles más interesantes de la cavidad, así como apreciar duros contrastes que hacían resaltar - y en ciertos casos, imaginar- grandes profundidades. Con este contraste entre las zonas profundas (intensamente iluminadas), y los primeros términos o planos (oscuros), se conseguía aumentar de forma aparente el tamaño de la gruta.

Otro aspecto destacable de este sistema de iluminación era que todos los puntos de luz estaban rigurosamente ocultos, con el objeto de evitar que pudiera verse cualquier tipo de artificio y/o impedir el deslumbramiento. Ello obligaba, lógicamente, a la delimitación exacta de la ruta que deben seguir los visitantes, así como la prohibición de salirse de la misma (hay que indicar al respecto que desde entonces todos los recorridos se efectúan con un guía, cuyas funciones son la descripción y exposición de las distintas partes de la cavidad, así como el control y vigilancia de las distintas formaciones). Al igual que ocurre con los puntos de luz, los conductores eléctricos estaban ocultos del recorrido turístico, para lo cual se aprovecharon fisuras, diaclasas y grietas, aún a costa de recorridos más largos. Además, una vez instalados, fueron convenientemente camuflados mediante trabajos de albañilería, imitando las rocas y espeleotemas adyacentes. Según el proyecto original, el sistema de iluminación dividía la Gruta en 16 zonas, que a su vez, se subdividían en sectores, que contemplaban un total de 2.058 puntos de luz, correspondiente a una potencia total de 168,70 kW.

Para evitar que el sistema de iluminación estuviese funcionando en su totalidad durante el recorrido (con el consiguiente gasto energético y el impacto ambiental sobre la cavidad), se dispuso una instalación dividida en siete grupos, con líneas de alimentación independientes desde el cuadro general exterior, y controladas por dispositivos accionados a distancia mediante juegos de pulsadores (ocultos a la vista del visitante), instalados antes y después de los tramos de cavidad cuya iluminación controlan. De esta forma, los visitantes nunca percibirían el encendido y apagado de los distintos tramos de la instalación. Por último, se completó la instalación mediante una línea de alumbrado de emergencia para evitar y prevenir que un fallo de energía en la línea de alimentación pudiera inquietar a los visitantes que eventualmente se encontraran en el interior.

Sistema actual de iluminación

En esencia, el sistema proyectado en 1974 es el mismo, si bien ha sufrido diversas modificaciones hasta la actualidad. Tales variaciones han sido debidas fundamentalmente al cambio de color en diversos puntos de luz con respecto al diseño original, y sobre todo, el aumento considerable del número de puntos de luz, que actualmente asciende a 2800 unidades. Asimismo, en la actualidad el sistema de iluminación comprende siete sectores, tal y como se indica en la figura 1. En el año 2006, prácticamente todo el sistema de iluminación estaba constituido por las tradicionales lámparas de incandescencia (1680 unidades con potencias comprendidas entre 0,06 y 0,08 kW y 1120 con potencias de 0,1 y 0,15 kW), lo que suponía una potencia total de 263,2 kW (tabla 1). A partir de este año, y fruto de las recomendaciones recogidas en los estudios de carácter ambiental realizados a finales de los años 90 en la gruta, se fue sustituyendo el tipo de lámpara por el de bajo consumo, de menor poder calorífico, hasta completarse definitivamente en el año 2011, en el que la potencia total instalada era 33,88 kW. Hay que indicar que en el año 1998 se sustituyeron de forma experimental varias lámparas de incandescencia en el sector de la *Cristalería de Dios*, una pequeña sala de la cavidad con gran vistosidad y fragilidad, instalándose otras de bajo consumo, que demostraron su efectividad en la disminución de la temperatura media del aire de la sala (Martín Rosales et al., 2007).

A partir del año 2014 y tras la consolidación en el mercado de la tecnología LED, con sus cono-

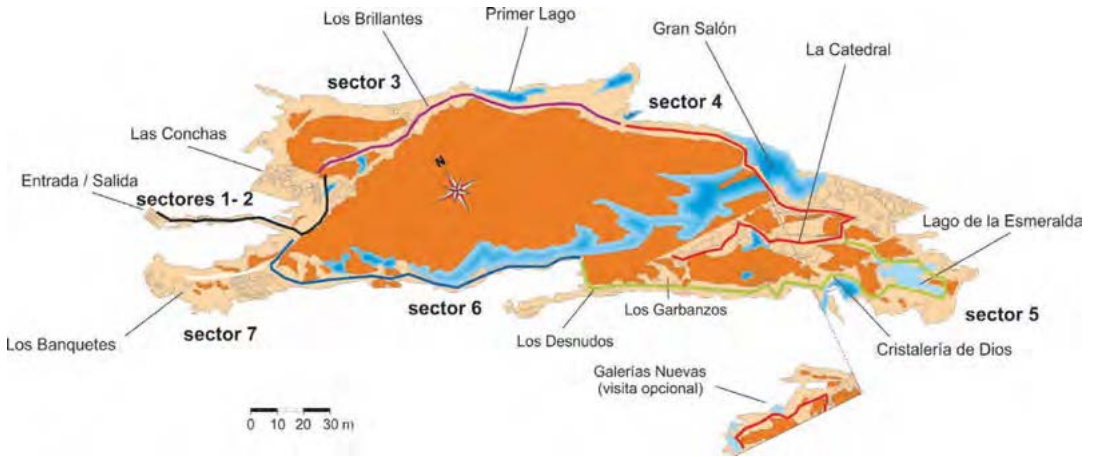


Figura 1. Esquema topográfico de la Gruta de las Maravillas, con indicación de los sectores eléctricos en los que se divide el sistema de iluminación de la cavidad. No se incluyen las galerías no habilitadas para las visitas. Base topográfica: GES de la SEM.

AÑO	ILUMINACIÓN	POTENCIA (Kw)	UNIDADES	TOTAL (Kw)
2006	Incandescencia	0,06-0,08	1680	117,60
	Incandescencia	0,10-0,15	1120	145,60
			2800	263,20
2011	Bajo consumo	0,012	1680	20,16
	Bajo consumo	0,026	1120	29,12
			2800	49,28
2015	LED	0,010	1680	16,80
	LED	0,017	560	9,52
	Bajo consumo	0,026	560	14,56
			2800	40,88
2016	LED	0,010	1960	19,60
	LED	0,017	840	14,28
			2800	33,88

Tabla 1. Evolución de las características del sistema de iluminación de la Gruta de las Maravillas desde 2006. Fuente: Excmo. Ayuntamiento de Aracena.

cidas ventajas técnicas y ambientales respecto a otros sistemas de iluminación, especialmente en el ámbito de las cuevas turísticas (Porfilio, 2012), el Ayuntamiento de Aracena decidió su implantación progresiva en toda la cavidad, de forma que desde 2016 se encuentra iluminada con esta tecnología en su totalidad, reduciendo la potencia instalada a 33,88 kW, tal y como se recoge en la tabla mencionada. Se trata fundamentalmente de lámparas del tipo Pharathom y CorePro LEDbulb de las firmas comerciales Osram y Philips, respectivamente, cuya cobertura

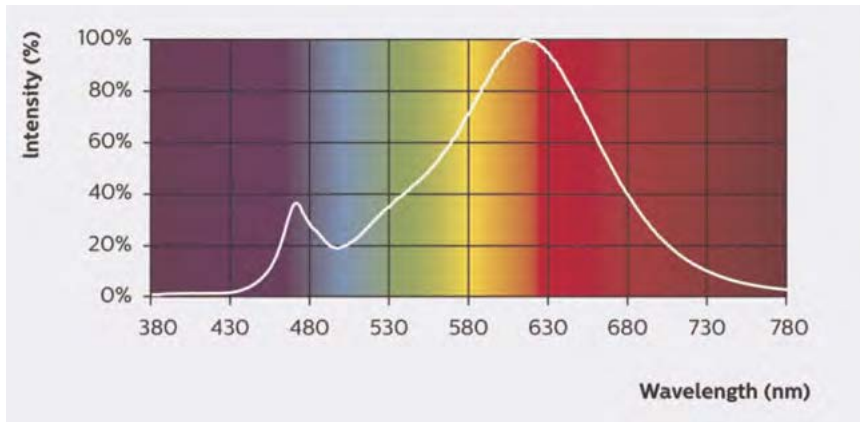


Figura 2. Cobertura espectral de las lámparas del tipo LED operativas en la Gruta de las Maravillas, según la información proporcionada por el fabricante (Philips, 2014).

espectral cubre el rango comprendido entre 450 nm y 780 nm, con el máximo de intensidad en 615 nm, según la documentación suministrada por el fabricante (figura 2). Tal y como se puede apreciar en la tabla 1, la potencia instalada en la Gruta en la actualidad (33,88 kW) representa sólo el 8 % de la que existía en 2006 (263,2 kW).

Resultados del análisis de consumo energético y visitantes

El análisis combinado del número mensual de visitantes y consumos energético se recoge de forma resumida en la tabla 2, donde se muestran, con frecuencia mensual, los datos relativos de visitantes, consumo eléctrico, así como el índice de consumo eléctrico por visitante (CEV). Hay que indicar que el número de visitantes ha sufrido variaciones importantes durante el decenio 2006-2016, especialmente condicionado por la grave crisis económica que afectó a todo el país, y que tuvo repercusiones importantes en el turismo de interior, que es el gran protagonista en la Gruta de las Maravillas. La reducción del número de visitas comenzó en 2008, que registró 144.768 visitantes (casi 12.500 menos que el año anterior, y 5.410 menos que en 2006), hasta registrar su mínimo en 2012 (113.435), año en que comenzó una progresiva recuperación, hasta superar los 148.000 en 2015 e incluso alcanzar valores muy por encima de la media en 2016, con 165.324 visitantes.

A pesar de la variabilidad del número de visitantes durante el decenio analizado, el índice de consumo eléctrico por visitante (CEV) experimenta claramente una tendencia descendente. Dicho índice, alcanza un valor medio de 0,859 kWh/visitante en 2006, descendiendo progresivamente hasta alcanzar un valor de sólo 0,257 kWh/visitante en 2016. Así, tal y como refleja la tabla 2, el ahorro energético durante el periodo 2006-2011 ha sido 0,446 kWh/visitante, es decir, un 52 %. También se experimenta un ahorro energético considerable entre el periodo 2011-2016, en este caso del 38 % (0,156 kWh/visitante). Si se consideran los años extremos (2006 y 2016), el ahorro es mucho más notable, 0,602 kWh/visitante, lo que representa un 70 %.

AÑO	MES	Nº Visit.	Consumo kWh	Consumo kWh/vis.	AÑO	Nº Visit.	Consumo kWh	Consumo kWh/vis.
2006	Ene	6106	7520	1,232	2011	5593	3325	0,594
	Feb	10212	12080	1,183		11466	5383	0,469
	Mar	10536	11520	1,093		10769	4382	0,407
	Abr	17652	14480	0,820		15497	4631	0,299
	May	12295	10240	0,833		9018	4631	0,514
	Jun	8659	7600	0,878		7317	4223	0,577
	Jul	10137	9120	0,900		9318	4447	0,477
	Ago	23548	14000	0,595		17726	4534	0,256
	Sep	12650	10400	0,822		9700	3886	0,401
	Oct	14767	13680	0,926		14001	5200	0,371
	Nov	12245	10000	0,817		10881	5604	0,515
	Dic	11371	8320	0,732		9028	3513	0,389
	150178	128960	0,859	130314	53759	0,413		
2015	Ene	6055	3622	0,598	2016	7898	1702	0,215
	Feb	9438	3792	0,402		13225	3414	0,258
	Mar	14006	4745	0,339		16902	4231	0,250
	Abr	16483	2961	0,180		13198	4656	0,353
	May	11448	2679	0,234		13786	3614	0,262
	Jun	7346	2294	0,312		9536	3538	0,371
	Jul	8813	3837	0,435		12418	2983	0,240
	Ago	20945	3441	0,164		22082	4337	0,196
	Sep	12259	3066	0,250		11919	3898	0,327
	Oct	15637	3645	0,233		19722	3292	0,167
	Nov	14431	3145	0,218		13026	3663	0,281
	Dic	11493	3123	0,272		12212	3288	0,269
	148354	40350	0,272	165924	42616	0,257		

Tabla 2. Evolución del número de visitantes, del consumo eléctrico y del índice de consumo eléctrico por visitante, durante el decenio 2006-2016.

Variaciones en la temperatura del aire

La modificación progresiva de los tipos de lámparas durante el periodo analizado (incandescencia, bajo consumo y LED), han tenido también su repercusión en la evolución de la temperatura del aire de la cavidad. El efecto térmico de la sustitución de las lámparas incandescentes por otras de bajo consumo en algunos sectores de la cavidad, y de forma experimental, ya fueron descritos en trabajos previos (Martín Rosales *et al.*, 2007), registrándose disminuciones de la temperatura media del mes más cálido de hasta 0,5 °C. Esta tendencia ha continuado recientemente y, especialmente, durante el mes de agosto, en el que las temperaturas son más elevadas, debido a la

conjunción de las elevadas temperaturas en el exterior junto con la mayor afluencia de visitantes que durante este mes alcanza sus valores máximos.

En la figura 3 se muestra una comparativa de la temperatura horaria en la zona de la *Cristalería de Dios*, correspondiente al mes de agosto de los años 1995 y 2017, periodos en los que existía un sistema de iluminación con lámparas de incandescencia y LED, respectivamente. Hay que indicar que, ni el número de visitantes (similar en los dos meses) ni la temperatura exterior (incluso mayor en 2017) permiten explicar la notable diferencia en la evolución de la temperatura del aire. Así, mientras que la temperatura media del aire en la cavidad durante el mes de agosto de 1995 fue 19,3 °C (similar a la del mismo mes en 1994), la correspondiente a 2017 fue 18,5 °C, casi 0,8 °C menos. Asimismo, la distribución de grupos de visitantes y el tamaño de los mismos era muy similar, por lo que sólo cabe atribuir esta diferencia al sistema de iluminación.

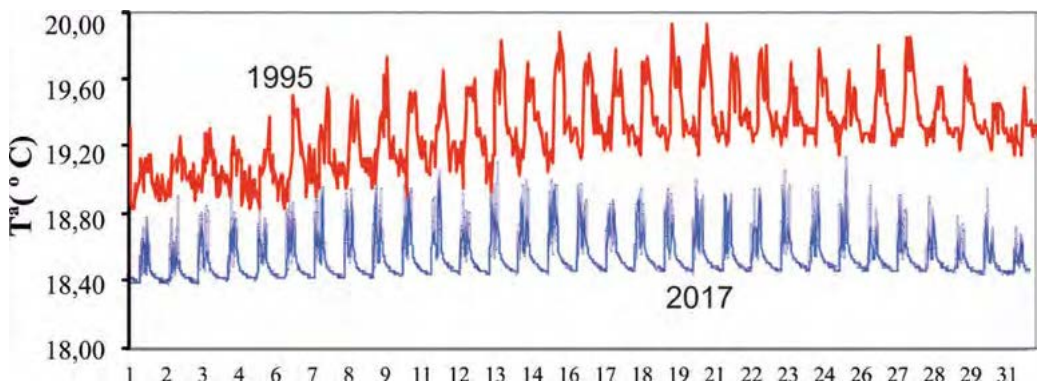


Figura 3. Evolución de la temperatura del aire en la *Cristalería de Dios* durante el mes de agosto de 1995 (sistema de iluminación con lámparas de incandescencia) y el mismo mes de 2017 (sistema LED).

Conclusiones

El análisis de los datos de consumo eléctrico durante el decenio 2006-2016, periodo en el que ha tenido lugar la sustitución progresiva del sistema de iluminación, desde las tradicionales fuentes de luz de tipo incandescente, hasta los sistemas basados en la tecnología LED (en pleno funcionamiento en 2016), ha permitido verificar la eficacia de tales cambios. Los resultados demuestran que el sistema actual basado en la tecnología LED supone un ahorro energético del 70 % con respecto al tradicional existente hasta 2006. Asimismo, se ha constatado la eficiencia en la reducción de la temperatura de la atmósfera de la cavidad, que ha descendido, en media, casi 0,8 °C en el mes de agosto, el de mayor afluencia de visitantes. Aunque todavía es necesario un notable esfuerzo en el estudio de procedimientos que permitan una erradicación de otros problemas derivados del sistema de iluminación, en especial la proliferación de biofilms y líquenes, los resultados sugieren que la gestión de la Gruta de las Maravillas es acorde con los principios de sostenibilidad ambiental que deben imperar en la protección y explotación del patrimonio geológico subterráneo.

Referencias

- Del Rosal, Y. 2016. *Análisis, impacto y evolución de biofilms fotosintéticos en espeleotemas. El caso de la Cueva de Nerja*. Tesis Doctoral Universidad de Málaga, 336.
- Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rodríguez-Navarro, C.M. y Cerón, J.C. 2007. Efectos de las medidas de protección ambiental en la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva). En: J.J. Durán, P.A. Robledo y J. Vázquez (Eds.) *Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible*, 169-180. Madrid. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.
- Porfilio, V. 2012. Las ventajas de la iluminación LED en las cuevas. En: J.J. Durán y P.A. Robledo (eds): *Las cuevas turísticas como activos económicos: conservación e innovación*. 199-202. Madrid. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.
- Philips, 2014. CorePro LEDbulb 9.5-60 W Dimmable. *Technical application guide*. Amsterdam, 8.
- Romero-Bomba, E., Portero, J.R., Romero de la Osa, O., Rodríguez-García, M. y Orquín Sánchez, J. 2010. La Gruta de las Maravillas, una mirada hacia su historia. En: J. J. Durán y F. Carrasco (Eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*, 9-20. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. Madrid.

A. Ros, et al., 2018. Punto de Información Técnica PIT_NFC con tecnología NFC aplicado en cavidades y nuevas marcas para la topografía. En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 445-456.

Punto de Información Técnica PIT_NFC con tecnología NFC aplicado en cavidades y nuevas marcas para la topografía

A. Ros, J.L. Llamusi y A. Sánchez

Centro de Estudios de la Naturaleza y el Mar. CENM-naturaleza, Calle Alcántara 5, 30394 Cartagena
cenm@cenm.es , jl.llamusi@gmail.com, albasanchezesteban@gmail.com

RESUMEN

Aplicaciones de uso de la tecnología de campo cercano NFC (*Near Field Communication* comunicación de campo cercano pasivas) aplicado a cavidades creando el PIT_NFC (punto de información Técnica con tecnología NFC). Es una novedad aplicada a la espeleología es el uso de las tarjetas o colgantes de escritura/lectura NFC, que permiten la inclusión de datos interactivos en el interior de la cavidad. La tecnología NFC no requiere de instalaciones especiales ni de alimentación de corriente en las etiquetas, son fáciles de conseguir y se pueden leer o grabar con terminales de teléfonos móviles que lleven incorporados las tecnologías NFC utilizados cada vez con más frecuencia para pagos de proximidad en compras, autobuses, etc. El PIT_NFC permite incorporar información en el interior de las cavidades valiosa para; investigaciones científicas, topografías, exploraciones o información puntual. Es una nueva forma de facilitar la información en cavidades sin uso de complejas instalaciones y equipos. La utilización de puntos o marcas de referencia en el interior de las cuevas para topografía ha estado sujeta a la creatividad de los grupos de trabajo, sin que haya materiales diseñados para ello, siendo en ocasiones dificultoso y muy diverso. También es un hecho la utilización de elementos metálicos, clavos, tornillos, chapas de marcas, etc., materiales contaminantes que al cabo de los años presentan oxidaciones, repercutiendo negativamente en el ecosistema de la cavidad. Por otro lado, la información que se indica suele ser muy escasa y limitada a una marca o número de estación topográfica. La propuesta que se presenta en este trabajo es una serie de materiales para los puntos o marcas topográficas en cavidades que cumplan requisitos de fácil adquisición, no contaminantes y efectividad, entre otras cualidades.

Palabras clave: NFC, PIT_NFC, punto de información, topografía.

Technical Information Point PIT_NFC with NFC technology applied in cavities and new marks for topography

ABSTRACT

Applications of near field NFC technology (Near Field Communication passive near field communication) applied to cavities creating the PIT_NFC (technical information point with NFC technology). It is a novelty applied to speleology is the use of NFC writing / reading cards or pendants, which allow the inclusion of interactive data inside the cavity. The NFC technology does not require special installations or power supply in the labels, they are easy to obtain and can be read or recorded with mobile phone terminals that incorporate the NFC technologies used more and more frequently for proximity payments in purchases, buses, etc. The PIT_NFC allows to incorporate information inside the cavities valuable for; scientific investigations, topographies, explorations or punctual information. It is a new way of providing information in cavities without the use of complex installations and equipment. The use of points or reference marks inside the caves for topography has been subject to the creativity of the work groups, without there being materials designed for it, being sometimes difficult and very diverse. It is also a fact the use of metallic elements, nails, screws, veneers of brands, etc., contaminating materials that after years have oxidations, negatively impacting the ecosystem of the cavity. On the other hand, the information indicated is usually very limited and limited to a mark or topographic station number. The

proposal presented in this paper is a series of materials for the points or topographic marks in cavities that meet easily acquired, non-polluting and effective requirements, among other qualities.

Keywords: Information point, NFC, PIT_NFC, topography.

Introducción

Las topografías en cavidades nos permiten conocer el desarrollo de la cavidad, su planimetría, volumen, distribución, profundidad, entre otros aspectos. Por ello, es un elemento indispensable para el espeleólogo y para un mejor conocimiento de la cavidad. Su realización suele ser compleja y duradera en el tiempo según las dimensiones de la cavidad. En su interior se suelen colocar puntos o marcas de topografía para referencias de puntos o estaciones topográficas, que históricamente estas han sido de muy diversa índole y de variados materiales, metálicas, de vinilo, rotuladas en pared, estacas, etc., (figuras 1 A, B, C, D), si bien no ha existido un criterio de normalización de las mismas encontrando variados modelos y tamaños.

Otro factor determinante y de repercusiones ambientales negativas es el uso de elementos metálicos, chapas de aluminio, clavos de acero o hierro (fácil oxidación), pintura o rotulación en paredes. Todos estos elementos no son los más recomendables para la conservación de las cavidades, afectando negativamente al ambiente de la cavidad y siendo un grave problema la presencia o generación de óxidos (figuras 1 A, B).

Para solucionar este problema de contaminación ambiental y unificar con un criterio los modelos de etiquetas o puntos topográficos, así como los clavos, presentamos nuevos materiales para topografía en cavidades e incluimos un apartado sobre la información mínima que deberían aportar esos puntos topográficos en cavidades.

Puntos o marcas topográficas

En el año 2013 iniciamos un proyecto de unificación de puntos topográficos con el uso de materiales no contaminantes, reversibles y a su vez de fácil adquisición, (Ros y Llamusí, 2013 a y b). Este proyecto fue patrocinado por Rodcle, fabricante de material de espeleología y que finalmente comercializa el producto bajo la denominación "*Topo Point 41.25 Punto topográfico libre de óxidos*" ha tenido un notable éxito entre los grupos de espeleología. Este primer proyecto consistió en el diseño de una marca de topografía libre de óxidos, realizada en material de vinilo, del utilizado para las sacas de espeleología, (figura 2 B), y una grapa estriada de nylon de 4,5 mm de diámetro, (figura 2 A). El objetivo era unificar los puntos topográficos y utilizar materiales libres de óxidos no contaminantes y reversibles y de fácil adquisición. Los resultados han sido bastante buenos ya que actualmente los utilizan numerosos equipos de espeleología.

Esta marca o puntos topográfico *Topo Point 41.25* consta de dos elementos una etiqueta de vinilo y una grapa estriada de nylon. La etiqueta se fabrica en vinilo y las hay de diversos colores, permite su escritura con lápiz, bolígrafo o rotulador (indicar que el uso del rotulador puede decolorar o correrse la tinta por lo que no es el método más apropiado). Es posible la impresión del vinilo en impresoras laser por su cara mate sin brillo, aunque no es permanente a los roces

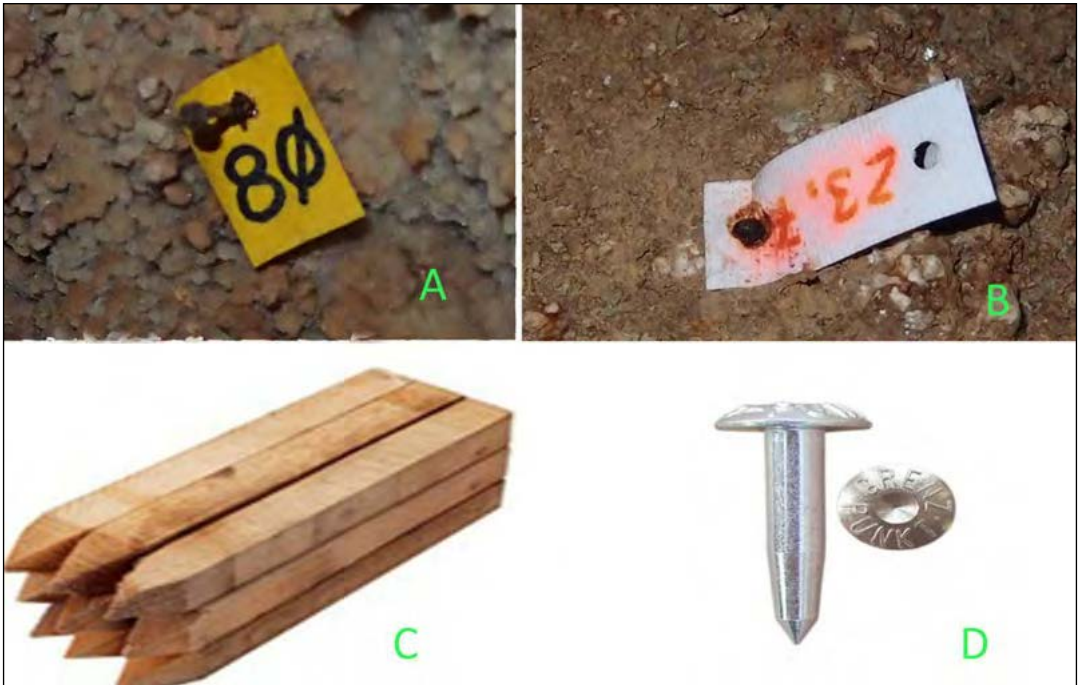


Figura 1. A y B son puntos topográficos convencionales usados en espeleología. Las figuras C y D son marcas para topografía profesional.

si es estable siempre que no se manipule permitiendo incluir datos sobre el punto topográfico (figura 4). La grapa estriada de nylon tiene unas medidas de 12,5 mm largo por 4,9 mm de diámetro y cabeza de 11,1 mm de diámetro, (figura 2 A).

La instalación es sencilla se realiza un pequeño agujero de 4 mm de diámetro y 12 mm de profundidad por medio de taladro o buril a mano, y se introduce la etiqueta de vinilo en la grapa de nylon y está en el agujero presionándola, adquiriendo la suficiente presión para que no se



Figura 2. A: grapa estriada de 12,5mm. B: topo Point 41.25, etiqueta en vinilo para punto topográfico con datos, 40 mm de diámetro. C: topo Trans, grapa estriada de 21 mm de longitud para punto de transición.

dependa (figura 3). Generalmente se suelen colocar en zonas de paredes o suelos de roca, si el punto a colocar se realiza en suelos de arcillas o muy blandos utilizamos una varilla de PVC hueca con agujero de 5 mm de diámetro y varios centímetros de largo para insertarlo en suelos arcillosos, pueden ser válidas las varillas de balizamiento de recorridos interiores (Ayuso y Calaforra, 2017).

La escritura se realiza a mano por medio de "lápiz o bolígrafo" recomendable o si se conocen mas datos con impresora láser, el uso de rotuladores está descartado, pues la tinta se pierde o diluye con el tiempo por lo que no es recomendable (figura 1 B).

Nuevo punto topográfico de transición *Topo Trans*

Si bien la utilización de los puntos o estaciones topográficas *Topo Point 41.25* nos permiten incorporar información en cavidades, no es conveniente recargar la cavidad de estas marcas, es recomendable un uso moderado y en puntos críticos de información necesaria. Con ello contribuiremos a no alterar ni insertar demasiados elementos externos y visibles en la cavidad. Para sustituir al *Topo Point 41.25* y permitir la continuidad de diversos puntos o estaciones topográficas, y que en un momento dado nos puedan ayudar a localizar la red de puntos e identificar en que punto nos encontramos, utilizaremos solo el punto o grapa estriada de distinto tamaño y color, como punto de transición *Topo Trans* (figura 2 C).

El nuevo punto de transición *Topo Trans*, consiste en una grapa estriada de nylon de color blanco-marfil con unas medidas de 21 mm de longitud por 6 mm de ancho y 18 mm de diámetro de cabeza, (figura 2 C). Esta nueva grapa, mayor que la utilizada para la sujeción de las etiquetas anteriores y al ser de color marfil u otro claro y tener una cabeza más ancha, nos va a permitir escribir el numero de punto o estación topográfica correspondiente. Este punto al ser de menor diámetro que la etiqueta *Topo Point 41.25*, si podemos ir colocándola más asiduamente por la cavidad nos permitirá reconocer el número de punto en un momento dado con mayor discreción.



Figura 3. Instalación del punto o marca topográfica *Topo Point 41.25*.

La instalación es igual que en el punto anterior, pero unos milímetros más anchos de agujero, 5 mm y más profundo, 20 mm. Es totalmente reversible y no incorpora elementos metálicos contaminantes.

Información en puntos o estaciones topográficas

Una cuestión importante cuando se realiza una topografía es la información que se incluye. Esta suele ir en el plano final o dibujo, si bien requiere de un trabajo exclusivo para ella y que en este caso no trataremos. Si vamos a tratar la información que podemos dejar en la cavidad y que posteriormente utilizaremos de nuevo o será para uso de otros equipos o investigadores, pensamos que no está lo suficientemente valorada y es conocido por muchos el problema que se plantea cuando queremos ubicarnos en la cavidad y no están numerados los puntos topográficos, o conocer la cota, la profundidad u otros datos básicos que ayudarían a nuestro trabajo o investigación.

La información en el interior de las cavidades debería ser tratada igual que la topografía como un elemento esencial de la exploración y toma de datos, pues con ello se ayudará en posteriores trabajos o investigaciones.

Pero ¿Qué información incluir?, este puede ser un tema amplio y muy diverso, para simplificar la hemos dividido en dos partes: la primera información básica fija y que podamos incluir en el punto de topografía o etiqueta *Topo Point 41.25*, y una segunda es la utilización de etiquetas con tecnología NFC que nos va permitir ampliar la información y que tratamos ampliamente en el apartado siguiente:

Información inicial de referencia; esta información en los puntos o estaciones topográficas es la que nos va permitir identificar el punto topográfico y se suele marcar al realizar la topografía. Se pone a mano y en ella lo mas habitual es marcar el "numero de punto topográfico". Este se puede realizar tanto en la etiqueta *Topo Point 41.25* como en el punto de transición *Topo Trans*.

Información fija ampliada de estación topográfica; las etiquetas *Topo Point 41.25* nos permiten añadir mas información, incluso pasarla por una impresora láser, por su cara menos brillante, colocándola en una hoja A4 con un adhesivo tipo lápiz sólido, y podremos escribir varias líneas de texto (figura 4). Esta información puede ser importante para las labores de los investigadores y otros trabajos o exploraciones y es conveniente sólo utilizarlo en puntos muy concretos, salas, cruces, bocas de pozos, etc., sin llegar a llenar la cavidad de estas marcas, un ejemplo de información (figura 4).

Puntos Información Técnica para cavidades PIT_NFC con tecnología NFC

Es obvio que la información técnica en una cavidad facilita enormemente la labor de los investigadores e, incluso, la continuidad de posteriores trabajos de topografía y exploración, con la inserción de datos en las etiquetas o puntos de topografía *Topo Point 41.25* y *Topo Trans*, si bien, esta información es limitada a unos pocos caracteres y fija, es decir, que no se puede volver a escribir salvo que coloquemos una etiqueta nueva.

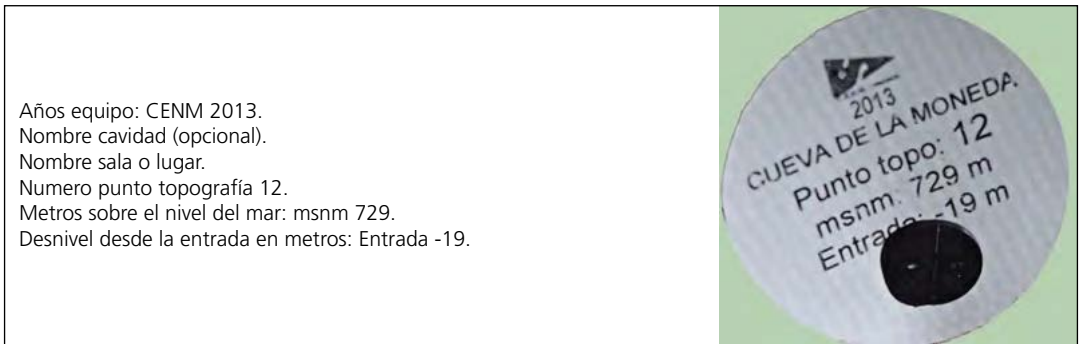


Figura 4. Información en Topo Point 41.25.

Para la ampliación de información, así como el acceso a ella, existen en el mercado un amplio abanico de productos, como pudieran ser los códigos QR con acceso a web. Esta opción no viable en el interior de las cavidades que tratamos, al no llegar la señal de los teléfonos, red wifi, la instalación de repetidores wifi y crear una red de datos interior, es muy complejo, tiene costes muy elevados y el uso de elementos con contenidos metálicos susceptibles de óxidos y complejos de mantener. La opción wifi solo se da en algunas cavidades turísticas con una infraestructura creada para tal fin y con objetivos diferentes a lo que nos interesa. La opción que se plantea es un equipo que no contenga materiales metálicos externos, no lleve baterías, tenga resistencia al agua y humedad, no sea necesario ningún tipo de mantenimiento y sea fácil de adquirir e instalar; estos requisitos los cumplen las tarjetas o colgantes NFC.

El mercado es fácil encontrar tarjetas o etiquetas con tecnología NFC, siglas en inglés de *Near Field Communication* (comunicación de campo cercano pasivas), con estos requisitos de resistencia a la humedad y condiciones adversas. Esta tecnología no precisa de elementos de mantenimiento externos como puede ser una batería ya que la energía es proporcionada por el propio terminal de lectura o escritura, son capaces de almacenar desde 132 caracteres, hasta 2 k de caracteres los de última generación, son resistentes a la humedad y el agua al estar recubiertos con una capa de PVC resistencia IP68 y son fáciles de adquirir e instalar (figura 5 A).

Esta capacidad nos permite incluir información relevante sobre el punto o estación topográfica que puede ser consultada por otros investigadores y espeleólogos a través de un terminal NFC que suelen llevar, cada vez más, los dispositivos telefónicos.

La tecnología NFC

La tecnología NFC permite interacciones bidireccionales simples y seguras entre dispositivos electrónicos, usada principalmente para realizar transacciones sin contacto, acceder a contenido digital y conectar dispositivos electrónicos con un solo toque. NFC complementa las tecnologías inalámbricas populares, como *Bluetooth*, al tener que aproximar los dispositivos a una distancia inferior a 10 cm., es más segura que otras tecnologías inalámbricas Bluetooth, wifi que pueden ser interceptadas por otros dispositivos ajenos.

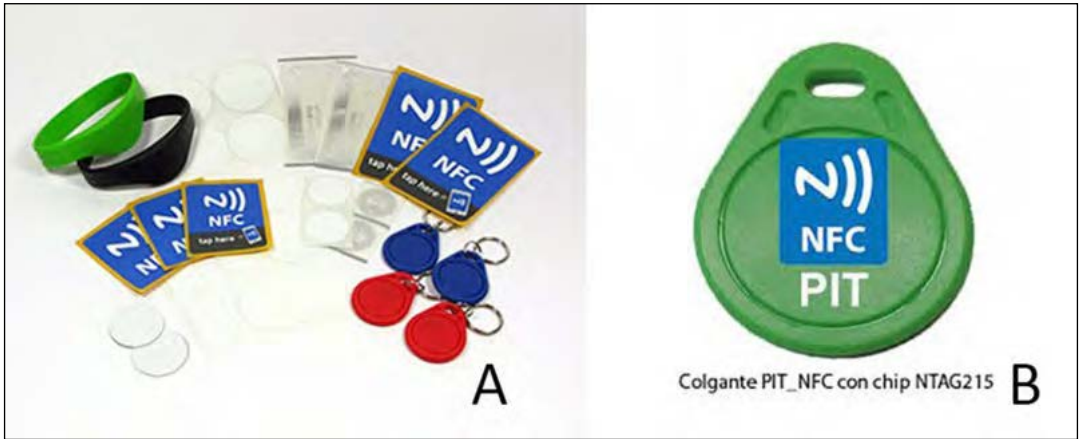


Figura 5. A: etiquetas y colgantes NFC. B: colgante PIT_NFC con chip NTAG215 usado para cavidades.

NFC también permite que los dispositivos compartan información a una distancia inferior a 10 cm. Los usuarios pueden compartir tarjetas de visita, realizar transacciones, acceder a información desde un póster inteligente, proporcionar credenciales para sistemas de control de acceso con un simple toque, o acceder a bloques de textos como el caso que nos ocupa de las cavidades. Permite un intercambio simple de datos entre otras cosas.

Los estándares de NFC cubren protocolos de comunicación y formatos de intercambio de datos, y están basados en ISO 14443 (RDFI, *radio-frequency identification*). Los estándares incluyen ISO/IEC 18092 y los definidos por el Foro NFC en NFC (Foro, 2017), fundado en 2004 por Nokia, Philips y Sony y que hoy suma más de 170 miembros (NFC, 2017).

Características de la tecnología NFC

El intercambio entre dispositivos de tipo bidireccional que permite la tecnología NFC puede ser de dos tipos entre dispositivos, activos o pasivos (figura 6). Esta característica hace que un dispositivo activo (un terminal de teléfono) emita una señal que proporciona información o datos y a su vez la energía necesaria para activar y guardar esa información en un dispositivo pasivo (tarjetas o etiquetas NFC) (figura 6 A), por lo que estas últimas no precisan de energía permanente si no que esta es proporcionada en el momento de la escritura o lectura. Esta cualidad permite crear chips extremadamente pequeños e insertarlos en tarjetas de PVC tipo visita o en colgantes de pocos centímetros totalmente sellados.

Otra de las características es que permite almacenar órdenes para los dispositivos o textos planos hasta un máximo de 2 k de caracteres, con lo que podemos introducir textos y datos que nos interesen, también cuentan algunos modelos con sistema de contador de lecturas y bloqueo con contraseña. Los modelos de tarjetas o colgantes NFC es amplio y diversos siendo un mercado en alza y muy variado, ver tabla y (figura 5 A) estos se pueden agrupar en tipos de 2 categorías por sus características y usos:



Figura 6. Sistema de envío de datos y energía. A: dispositivos activo-pasivo; el dispositivo activo envía energía y datos al dispositivo pasivo (etiqueta o colgante). B: dispositivos activo-activo; los dos dispositivos tienen capacidad de enviar energía y datos.

1) categoría tarjetas NFC, clase Mifare en sus variantes; Mifare Clásica (o 1k), Mifare Ultralight y Mifare Desfire, cumplen la norma ISO/IEC 14443, son las más vendidas y utilizadas. Sin embargo, no son compatibles con algunos terminales móviles y no cumplen las especificaciones NFC Forum.

2) categoría tarjetas NFC, clase NTAG (NTAG20x y NTAG21x) son de última generación, norma ISO/IEC 14443A 2-3 y son las de mayor compatibilidad con todos los terminales y dispositivos, las hay en varias capacidades y funciones.

Tablas de etiquetas NFC

	NTAG213	NTAG215	NTAG216
Memoria disponible	144 bytes	504 bytes	888 bytes
Longitud de la URL	132 caracteres	492 caracteres	854 caracteres
Longitud del texto	130 caracteres	490 caracteres	852 caracteres
Por qué elegirlo	El chip NFC más versátil y difuso, adecuado para cualquier tipo de uso.	Buena memoria y bajo coste. Sustituto ideal para NTAG216.	El chip más avanzado y con más capacidad. Ideal para tarjetas de visita V-Card o para usos que requieren mucha memoria.
Compatibilidad universal	Sí	Sí	Sí
Bloqueo con contraseña	Sí	Sí	Sí
Contador de escaneados	Sí	Sí	Sí

Tabla 1. Características técnicas de las etiquetas NFC de la serie NTAG.

	Etiqueta Mifare 1k	Etiqueta Mifare 4k	Etiqueta Mifare Ultralight
Memoria total	1 kb (1024 bytes)	4 kb (4048 bytes)	64 bytes
Memoria disponible	716 bytes	3440 bytes	46 bytes
Longitud de la URL	256 caracteres	2000 caracteres	41 caracteres
Longitud del texto	709 líneas	3000 líneas	39 líneas
Por qué elegirlo	Necesita el protocolo Mifare; necesita encriptación; para usos que requieren mucha memoria.	Necesita el protocolo Mifare; necesita encriptación; para usos que requieren mucha memoria.	Para cualquier uso; especialmente recomendado para las empresas de máquetin de NFC.
Encriptación	Sí	Sí	No
Número de serie	Sí	Sí	Sí
Compatibilidad universal	No	No	Puede requerir formateo

Tabla 2. Características técnicas de otros tipos de etiquetas NFC.

NFC para uso en cavidades NTAG2015

Para el uso en espeleología nuestro equipo se ha seleccionado las de clase NTAG, tipo NTAG215 por ser compatibles con todos los dispositivos, permiten escrituras de hasta 490 caracteres que incluyen contador de escaneados, bloqueo por contraseña y se pueden adquirir por precios muy asequibles, aunque el mercado es amplio y variado, permitiendo elegir entre una amplia gama de tarjetas o etiquetas y que hemos denominado PIT_NFC (Punto de Información Técnica), (figura 5 B).

Uso de la tecnología NFC

Las tarjetas o etiquetas NFC permiten diversas configuraciones de funciones, pagos, accesos, activación de funciones en dispositivos, identificación, Url, textos planos, etc. para el uso en cavidades se utiliza la capacidad de almacenar textos planos que como se ha indicado está limitado al tipo de tarjeta que utilizemos, si bien el modelo NTAG215 permite hasta 490 caracteres suficientes para la información que se quiere dar, no admiten archivos de imágenes, documentos o videos de momento.

Para la grabación de datos en las tarjetas o etiquetas NFC es necesario utilizar un dispositivo con tecnología NFC que suelen llevar la mayoría de los dispositivos móviles de última generación, si bien para los que no lo llevan existe una micro SD de Toshiba clase 10 ISO/IEC 18092 (Toshiba 2015), que se puede insertar en los dispositivos que no tengan la tecnología NFC.

Para la grabación de datos se pueden utilizar diversas APP nuestro equipo ha utilizado NFC Tools, TagWrite, siendo esta ultima muy efectiva y rápida para la grabación de datos y activación del contador de escaneados y bloqueo.

Para la lectura de datos, hay numerosas aplicaciones (APPS), la citadas anteriormente para grabar

también se pueden utilizar para lecturas, aunque algunas APP no limitan las líneas de texto. Nuestro equipo ha diseñado una APP específica para las etiquetas NFC en cavidades que permite la lectura completa del texto grabado PIT_NFC de descarga gratuita en <https://play.google.com> (figura 7).



Figura 7. PIT_NFC app diseñada para lectura de etiquetas NFC en cavidades.

Datos incluir en los PIT_NFC

La capacidad de las tarjetas NFC de poder grabar textos planos y nos permite incluir datos más amplios, y a su vez actualizar o modificar tantas veces como se quiera. Una cuestión importante es que tipo de datos incluimos en la etiqueta PIT_NFC. Para ello, proponemos un texto corto, claro y eficaz, que pueda ser utilizado por investigadores, exploradores o para la continuación de la exploración de trabajos. El criterio puede ser muy variado e importante, por lo que nuestro equipo ha empezado a implantar en cavidades colgantes PIT_NFC con estos datos (figura 8):

1. Punto topográfico.
2. Nombre de la sala o lugar.
3. Desnivel desde entrada + cota sobre el nivel de mar.
4. Clima, temperatura, humedad, CO2, fecha toma datos.
5. Características de la zona, morfologías, etc.
6. Espeleotemas.
7. Datos de autor y fecha.

Se puede incluir otros datos como advertencias de protección o cuidado, de información de pozos, etc. Las posibilidades pueden ser muy amplias.

Conclusiones

La utilización de nuevos materiales con nuevas tecnologías como es la NFC existentes en el mercado, y aplicado a las cavidades supone un cambio positivo y nuevo para el desarrollo de topografías e información en cavidades. La información que podemos incluir en las cavidades abre nuevas posibilidades con la utilización de diversos equipos y materiales más sostenibles y menos contaminantes que las utilizadas habitualmente, etiquetas de vinilo o puntos de transición entre otros, son las nuevas posibilidades para incluir las marcas precisas en las cavidades.

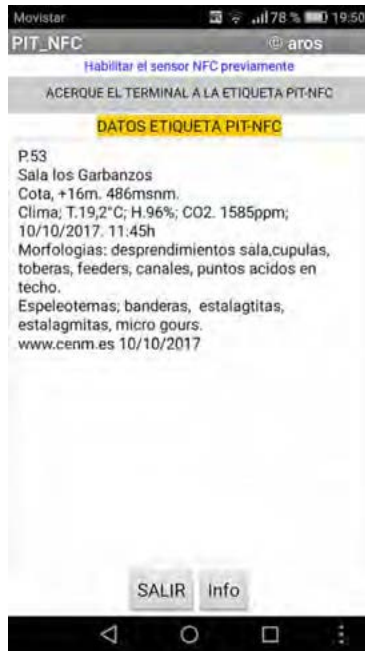


Figura 8. Pantalla de dispositivo, lectura de un colgante NFC en cavidad.

El empleo de las nuevas tarjetas o colgantes PIT_NFC nos ofrecen nuevas y amplias posibilidades aplicadas a las cuevas. La información puede ser reescrita cuantas veces necesitemos, un nuevo concepto de información técnica en el interior de las cuevas sin equipos adicionales ni costosas infraestructuras pueden permitir ofrecer una nueva perspectiva de la información técnica necesaria para espeleólogos, investigadores o visitantes. En definitiva, un nuevo concepto de cuevas con información, son las cuevas inteligentes.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento al Ayuntamiento de Calasparra y a la empresa Qalat gestora de la cueva del Puerto por su amabilidad en la instalación y pruebas del sistema PIT_NFC en la cueva del Puerto de Calasparra, Murcia. A la Federación de Espeleología de la Región de Murcia por su apoyo y patrocinio y a la empresa RODCLE. Más información en el sitio www.cenm.es

Referencias

- Ayuso I. y Calaforra J.M. 2017. *Balizamiento de bajo impacto en cavidades con actividad espeleológica*. VI Congreso Español sobre cuevas turísticas, ACTE. Nerja, Málaga 2016 <https://goo.gl/7pCiIM>
- NFC Forum. 2017. Enlace digital <https://goo.gl/1oFSyJ>
- A. Ros. y Llamusí, J.L. 2013a. *Nuevas aportaciones sobre los puntos topográficos en cavidades*. Edición digital CENM-naturaleza <https://goo.gl/TaUyKl>

A. Ros, *et al.*, 2018. Punto de Información Técnica PIT_NFC con tecnología NFC aplicado en cavidades y nuevas marcas para la topografía.

A. Ros. y Llamusí, J.L. 2013b. *New Point System for Espeleología Surveying* . Edición digital CENM-naturaleza. <https://goo.gl/itt8zW>

Rodcle, distribuidor de los puntos Topo Point 41.25 www.rodcle.com

Toshiba. 2015, *Tarjeta micro SD NFC SDHC CARD* de Toshiba en versiones 8-16-32 GB clase 10 ISO/IEC 18092 enlace características en <https://goo.gl/M1nwp9>

NFC, 2017. Near field communication. Enlace digital <https://goo.gl/fWWJuB>

Visita virtual a la cueva de las Güixas

Y. Palomo Arrabal

Directora de la Cueva de las Güixas, Turismo Villanúa S.L.U. Camino de la Fuente 1, 22870 Villanúa (Huesca) cuevas@villanua.net

RESUMEN

La cueva de las Güixas se encuentra en Villanúa, población del pirineo Aragonés situada a 953 m s.r.m. a los pies del macizo de Colarada, en el Valle del Aragón. Para llegar a la entrada es necesario recorrer un tramo del camino de Santiago "Summus Portus" romano, por lo que no es accesible para personas con discapacidad motora, además al tratarse de una cueva activa, por la que circula un río subterráneo, cuando hay fuertes tormentas o en épocas de deshielo el agua llega a inundar el recorrido turístico impidiendo realizar la visita. Para dar acogida a turistas que por uno u otro motivo no pueden realizar la visita contamos con el Centro de Interpretación de la cueva de las Güixas (CIN Subterránea). Tanto en la visita a la cueva de las Güixas como el Centro de Interpretación los guías son una parte fundamental ya que acompañan, interpretan e interactúan con los turistas ya sea particular o grupo escolar haciendo de la visita una experiencia inolvidable. Queremos hacer una pequeña demostración de la misma mediante una visita virtual, desde el inicio en la Oficina de Turismo, Centro de Interpretación, hasta la "chaminera" de la cueva, el lugar más mágico, donde cuentan las leyendas que se reunían las brujas de los alrededores en noches de luna llena con el fin de permanecer siempre bellas y jóvenes.

Palabras clave: cuevas turísticas, Güixas, leyendas, turismo, Villanúa.

Virtual visit to the Güixas cave

ABSTRACT

The Güixas cave is located in Villanúa, population of the Aragonese Pyrenees located at 953 m a.s.l. at the foot of the Colarada mountain, in the Aragón Valley. To get to the entrance, it is necessary to travel a stretch of the Roman road "Santiago Summus Portus", which is not accessible for people with motor disabilities, as it is an active cave, through which an underground river circulates, when there are strong storms or in times of thaw the water floods the tourist route preventing the visit. To welcome tourists who for one reason or another cannot make the visit we have the Interpretation Center Güixas Cave (CIN Underground). Both in the visit to the cave of the Güixas and the Interpretation Center the guides are a fundamental part since they accompany, interpret and interact with the tourists, whether it is a particular or a school group, making the visit an unforgettable experience. We want to make a small demonstration of it through a virtual tour, from the start at the Tourist Office, Interpretation Center, to the "chaminera" of the cave, the most magical place, where the legends that the witches gather of the surroundings on full moon nights in order to always remain.

Keywords: show caves, Güixas, legends, tourism, Villanúa.

Introducción: el centro de interpretación

La cueva de las Güixas se encuentra en Villanúa, población del pirineo Aragonés situada a 953 m s.n.m. de altitud a los pies del macizo de Collarada, en el Valle del Aragón. Está habilitada para su visita aunque es inaccesible para personas con movilidad reducida o discapacidad motora

ya que para llegar a la entrada de la cavidad es necesario recorrer un tramo del camino de Santiago "Summus Portus" romano. Se trata de una cueva activa por la que circula un río subterráneo y cuando hay fuertes tormentas o en épocas de deshielo el agua llega a inundar el recorrido turístico impidiendo realizar la visita. Para dar acogida a los visitantes que por uno u otro motivo no pueden realizar la visita contamos con el Centro de Interpretación de la cueva de las Güixas (CIN Subterránea) perfectamente adaptado para personas con movilidad reducida, y con amplios recursos para diferentes perfiles de visitantes, particulares o grupos escolares (figura 1).

El centro de interpretación Subterránea se inauguró en junio del 2009. Fue construido dentro del proyecto europeo "Impulsados", promovido por la Comarca de la Jacetania y la mancomunidad del Valle del Aspe francés.

Con un gran presupuesto (que será acertado después), sufragado el 65% con capital europeo a través de los fondos del programa Interreg.

La Comarca dispone de la mayoría de los recursos (72,50% del total, mientras que el lado francés cuenta con un 27,50%). El programa se inicia en enero de 2008 y finaliza en septiembre del 2011, coincidiendo con el final de la gestión de la cueva de las Güixas por parte de la empresa Sargantana.

El objetivo principal del programa, es crear un proyecto serio e interesante para poder ofrecer al visitante una mejor atención empleando para ello una red transfronteriza que una museos, centros de interpretación y oficinas de turismo de la Jacetania y el Valle del Aspe.



Figura 1. Centro de Interpretación de la cueva de las Güixas.

Un año después de la inauguración del centro de interpretación, debido a las necesidades que surgen al recibir a gran cantidad de personas para visitar la cueva de las Güixas e informarse de otras actividades que ofrece Turismo Villanúa, se acomoda un espacio dentro del Centro de Interpretación, que funciona como Oficina de Turismo y Tienda con productos de *merchandising* de marca propia. A partir de ese momento, pasa a ser una herramienta turística de gran utilidad y perfecta para sustituir las visitas a la gruta, cuando está inundada o para personas o grupos que por algún tipo de discapacidad no pueden acceder a la cueva de las Güixas.

Descripción del centro de interpretación

El centro de interpretación de la cueva de las Güixas está ubicado en un edificio construido en piedra, ubicado entre el río Aragón y el Camino de Santiago a los pies del macizo de Collarada. Cuenta con dos plantas rectangulares. Nada más entrar, en el suelo de la planta superior se puede observar un mosaico que expone los lugares más emblemáticos e interesantes de Villanúa y, en las paredes, se muestran paneles informativos sobre la evolución y costumbres de la población. Seguidamente, frente a la entrada, está el punto de información y venta. A continuación, hay una zona de exposición y la sala "Collarada" donde podemos ver una maqueta del macizo de Collarada y un vídeo explicativo que nos relata cómo se formó y los secretos que guarda en su interior. Finalmente, una mesa hexagonal con información de las actividades más importantes de Aragón y del Valle del Aspe (figura 2).

Para acceder a la planta inferior descendemos por un pasillo que simula el paisaje de nuestro



Figura 2. Interior: primera planta del centro de Interpretación. Foto 360° de Sergio Laburu.



Figura 3. Interior: segunda planta del centro de Interpretación ("Subterranea"). Foto 360° de Sergio Laburu.



Figura 4. Interior: segunda planta (Sala Rhinolophus). Foto 360° de Sergio Laburu.

entorno con su flora y fauna más significativa y el subsuelo con paneles explicativos de los animales que habitan bajo nuestros pies.

Al llegar esta planta, tenemos una sala multiusos con una capacidad de unas 50 plazas preparada para acoger cursos, conferencias, presentaciones, reuniones e incluso en invierno sesiones de cine. A su izquierda podemos acceder a "Subterránea" una réplica de la cueva de las Güixas, donde al entrar se va activando un sistema de iluminación que nos conduce a los puntos donde una voz en "off" de un hombre de la prehistoria nos relata cómo vivió en la cueva, nos muestra los restos hallados en su interior y las diferentes especies de murciélagos que todavía hoy en día la habitan (figura 3).

Una vez finalizada la visita de la réplica de la cueva en la sala "Subterránea" llegamos a la sala "Rhinolophus" en donde tenemos una información más detallada de los quirópteros que la habitan y acabamos realizando una visita virtual a la cueva de las Güixas a través de las pantallas con imágenes navegables y puntos calientes (figura 4).

Conclusiones

La cueva de las Güixas es una cueva activa, cuando hay fuertes tormentas o en épocas de deshielo no podemos realizar la visita ya que circula un río por el interior de la cueva. El acceso a la misma es por un tramo del "Summus Portus" romano no accesible para personas con discapacidad motora.

El centro de interpretación (CIN) Subterránea, es una herramienta perfecta para las personas que no pueden o no quieren acceder a la cueva. Pero para los grupos escolares y de adultos no ha sido un buen sustitutivo de la visita, hasta que hemos incorporado nuestra guía acompañando e interactuando con los grupos, dándole un valor añadido al centro y cubriendo las expectativas de los mismos, tal y como nos demuestran las estadísticas registradas (figura 5).

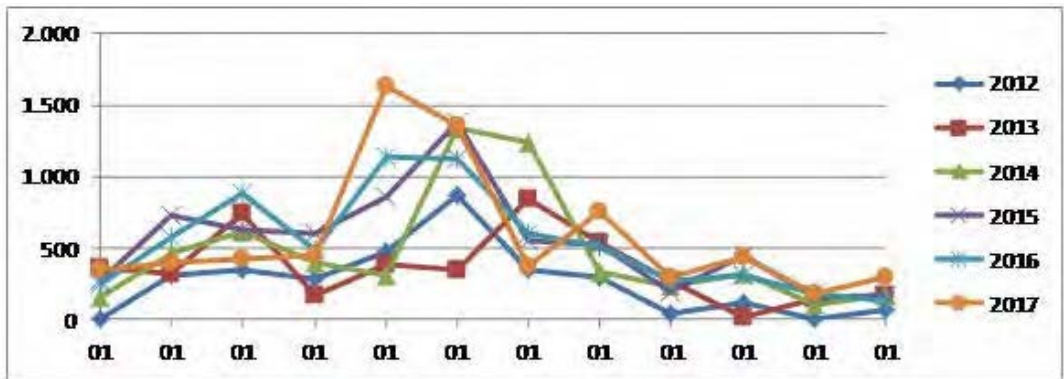


Figura 5. Evolución de las visitas de los grupos de visitantes a la cueva de las Güixas y al CIN del 2012 al 2017.

Y. Palomo Arrabal, 2018. Visita virtual a la cueva de las Güixas.

Referencias

Bru, L. 2006. *Brujas en el Pirineo Fantástico*, 126.

Dueso, J. 2015. *Leyendas de Brujas en el Pirineo Fantástico*, 182.