



Número Especial Geoarqueología

REVISTA DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

Volumen 38 Número 2, Diciembre 2025

ISSN 0214-2708

Editor Especial

Jesús F. Jordá Pardo

Universidad Nacional de Educación a Distancia

Editora Principal

María José Domínguez Cuesta

Universidad de Oviedo



Revista de la SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

Revista semestral editada por la Sociedad Geológica de España

<http://www.sociedadgeologica.org>

ISSN: 0214-2708 (versión impresa)

ISSN: 2255-1379 (Internet)

Depósito legal: S.421-2012

Es una revista que recoge los artículos originales e inéditos enviados para su publicación a la Sociedad Geológica de España y seleccionados por el Comité Editorial, con el asesoramiento del Comité Científico y especialistas en la materia. También se recogen las réplicas realizadas después de la publicación de un artículo. La Sociedad Geológica de España no se hace responsable de las opiniones vertidas por las personas autoras de los artículos firmados. La propiedad intelectual atribuye a los/las autores/as la plena disposición y explotación de la obra creada, de acuerdo con las leyes vigentes. La Revista no puede ser reproducida, almacenada o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio sin la autorización previa y escrita de la Sociedad Geológica de España. Su reproducción para fines docentes, de investigación o uso personal no requiere autorización previa.

EDITORIA PRINCIPAL / EDITOR-IN-CHIEF

María José Domínguez Cuesta

Universidad de Oviedo, Dpto. de Geología

C/ Jesúz Arias de Velasco s/n, 33005 Oviedo (España)

Tel: +34 985-109 546; e-mail: dominguezmaria@uniovi.es

EDITOR ESPECIAL / SPECIAL EDITOR

Jesús F. Jordá Pardo

Universidad Nacional de Educación a Distancia

Dpto. de Prehistoria y Arqueología

Senda del Rey, 7, 28040 Madrid (España)

Tel: +34 913 988 950; e-mail: jjorda@geo.uned.es

EDITORES ADJUNTOS / ASSOCIATE EDITORS

Concha Jiménez De Cisneros Vencelá

Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC)

Avda. de las Palmeras 4, 18100 Armilla, Granada (España)

+34 958 230 000; email: concepcion.cisneros@csic.es

Károly Hidas

Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)

Unidad de Granada

Urb. Alcázar del Genil, 4-Edif. Zulema, Bajo, 18006 Granada (España)

Tel: +34 958 691 032; e-mail: k.hidas@igme.es

Juan Antonio Morales González

Universidad de Huelva, Dpto. de Ciencias de la Tierra

Facultad de Ciencias Experimentales

Campus del Carmen, Avda. 3 de marzo s/n, 21007 Huelva (España)

Tel: +34 959 219 815; e-mail: jmorales@dgeo.uhu.es

SEDE EDITORIAL / EDITORIAL OFFICE

Sociedad Geológica de España:

Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca,

Plaza de la Merced s/n, 37008 Salamanca, España.

<http://www.sociedadgeologica.org>

COMITÉ CIENTÍFICO / SCIENTIFIC COMMITTEE

Alberto Pérez-López, Universidad de Granada (Spain)

Andrés Folguera, Universidad de Buenos Aires (Argentina)

Belén Oliva Urcia, Universidad Autónoma de Madrid (Spain)

Brendan Murphy, St. Francis Xavier University (Canada)

David Gómez Gras, Universidad Autónoma de Barcelona (Spain)

Graciela Delvene Ibarrola, Instituto Geológico y Minero de España (Spain)

Jorge Rabassa, Centro Austral de Investigaciones Científicas (Argentina)

José Antonio Ortega Becerril, Universidad Autónoma de Madrid (Spain)

José Brilha, Universidade do Minho (Portugal)

José Miguel Molina Cámara, Universidad de Jaén (Spain)

Juana Vegas Salamanca, Instituto Geológico y Minero de España (Spain)

Julia Cuevas Urionabarrenechea, Universidad del País Vasco (Spain)

Laura Domingo Martínez, Instituto de Geociencias (CSIC),

Universidad Complutense de Madrid (Spain)

Luis Vitor Duarte, Universidade de Coimbra (Portugal)

María Luisa Calvache Quesada, Universidad de Granada (Spain)

Mercedes Ferrer Gijón, Instituto Geológico y Minero de España (Spain)

Nieves María López González, Instituto Español de Oceanografía (Spain)

Pablo G. Silva Barroso, Universidad de Salamanca (Spain)

Stephen Johnston, University of Alberta (Canada)

Teresa Román Berdiel, Universidad de Zaragoza (Spain)

Imagen de portada:

Panorámica aérea del sector principal de la mina de oro romana de Las Médulas (febrero de 2022), incluida en la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO en 1997 como un paisaje cultural.

Foto cedida por: Grupo de Investigación EST-AP, Instituto de Historia, CSIC.

REVISTA DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA



Vol. 38 (2) (2025)

Revista de la Sociedad Geológica de España 38 (2)

Número Especial dedicado a la Geoarqueología

EDITORIAL

La Geoarqueología es una disciplina científica cuyo objeto de estudio es el análisis y la interpretación de las relaciones existentes entre el medio natural y las comunidades humanas que se plasman en el registro arqueológico, considerando este como el resultado de la acción conjunta de procesos naturales y culturales en contextos más o menos antropizados (Schiffer, 1987; Borja Barrera, 2016; Jordá Pardo y Borja Barrera, 2018). Así, la Geoarqueología se ocupa del estudio integral de los medios antropizados, en especial de las formaciones superficiales antrópicas (Borja Barrera, 1993, 2014), utilizando para ello una metodología propia (Goldberg y Macphail, 2006; Jordá Pardo *et al.*, 2012; Borja Barrera, 2016) que le permite desarrollar modelos explicativos que sirven, tanto para la identificación e interpretación de los procesos que han acontecido en el pasado, como para la localización de emplazamientos arqueológicos ocultos. Desarrollada a partir de los últimos cincuenta años (ver entre otros: Brothwell y Higgs, 1980; Butzer, 1989; Miskovski, 2002), se nutre de conceptos, métodos y técnicas utilizados por numerosas ciencias empíricas, tanto naturales como sociales, en especial de la Geología y la Geografía física, que le permiten definir una metodología adecuada para llevar a cabo la investigación de su objeto de estudio. El ámbito cronológico de su actuación se extiende desde la aparición del género *Homo* y los primeros instrumentos, hace 2,2 millones de años hasta los tiempos actuales, incluyendo la totalidad del Cuaternario. Su desarrollo temporal abarca desde marcos temporales sincrónicos hasta diacrónicos y su aplicación territorial comprende desde escalas espaciales de detalle hasta regionales.

Algunas de las principales líneas de investigación geoarqueológica que se llevan a cabo actualmente se concretan en los siguientes aspectos (Jordá Pardo, 1993):

- Reconstrucción e interpretación paleoclimática, paleoambiental y paleogeográfica de registros arqueológicos pleistocenos y holocenos a partir de estudios geomorfológicos, estratigráficos, sedimentológicos, edafológicos, micromorfológicos y cronológicos llevados a cabo en diferentes sistemas morfogenéticos exógenos (kárstico, fluvial, gravedad-vertiente, lacustre, palustre, litoral, volcánico, etc.) o endógenos (sísmicos, volcánicos), con objeto de determinar la formación de los sitios arqueológicos.
- Análisis e interpretación de sedimentos fuertemente antropizados en contexto rural, como son, por ejemplo, los depósitos localizados en abrigos rocosos utilizados como corrales ganaderos durante épocas prehistóricas, o los depósitos y formas ligados a explotaciones mineras antiguas.
- Análisis e interpretación de la evolución de los medios fuertemente antropizados y de las aglomeraciones urbanas, ya sean grandes ciudades o poblaciones de menor tamaño, dentro de la denominada Geoarqueología urbana.
- Reconstrucción e interpretación de los procesos de transformación y destrucción del registro arqueológico, en relación con la prospección arqueológica superficial, asociada tanto a proyectos de investigación programados como a actuaciones de preservación del patrimonio arqueológico, histórico y etnográfico relacionadas con proyectos urbanísticos y de ingeniería civil, industrial y agrícola.

También se abordan desde la Geoarqueología aspectos de índole arqueométrica, como la datación del registro arqueológico y sus componentes mediante métodos de cuantificación, entre ellos los isotópicos, la prospección geofísica para la identificación e interpretación de yacimientos arqueológicos enterrados, el estudio e identificación de sustancias minerales y materias primas líticas y la localización de las fuentes de aprovisionamiento de estos recursos geológicos utilizados por las poblaciones humanas del pasado.

Así, en este marco disciplinar y en el seno de la Sociedad Geológica de España, la Comisión de Geoarqueología surgió con el compromiso de sus miembros y coordinadores de proporcionar una visión integradora de la historia natural y la humana, de las Ciencias de la Tierra y la Historia. Su objetivo principal es dar a conocer las últimas investigaciones en esta disciplina que involucra a diferentes especialidades íntimamente relacionadas con la Geología y la Arqueología. En este sentido, durante el X Congreso Geológico de España celebrado en Vitoria/Gasteiz en julio de 2022 se organizó una sesión científica dedicada a la Geoarqueología, coordinada por Josep M. Parés, Mathieu Duval, Jesús F. Jordá Pardo, Javier Fernández Lozano y Brais Currás Refojos, en la que se presentaron quince comunicaciones relativas a métodos geofísicos y geocronológicos, formación de yacimientos, materias primas líticas y minería prehistórica, cuyos resúmenes se publicaron en el volumen 18 de *Geo-Temas* (Errandonea *et al.*, 2021). Posteriormente, durante el XI Congreso Geológico de España celebrado en Ávila en julio de 2024, la Comisión de Geoarqueología de la SGE organizó una sesión científica dedicada a esta disciplina, coordinada por Jesús F. Jordá Pardo, Eduardo González Clavijo y Óscar Pazos, en la que se presentaron veinticuatro comunicaciones centradas en aspectos teóricos, formación del registro arqueológico, dataciones geocronológicas, prospección geofísica, geoquímica ambiental, identificación de materias primas líticas y minería prehistórica e histórica, cuyos resúmenes aparecieron en el volumen 20 de *Geo-Temas* (Ruiz Constán *et al.*, 2024).

El éxito de participación en la sesión llevó a sus coordinadores a proponer a la Junta de Gobierno de la SGE y a su Comité Editorial la publicación de un Número Especial de la Revista de la Sociedad Geológica de España (RSGE), propuesta que fue aceptada con el compromiso de que ese Número Especial formara parte del segundo número del volumen 38 correspondiente a diciembre de 2025. El *call for papers* se lanzó en octubre de 2024 y se recibieron ocho manuscritos que, tras el proceso de revisión se redujeron a cinco contribuciones, que son las que figuran en este Número Especial de la RSGE dedicado a la Geoarqueología.

El Número Especial comienza con el trabajo de M^a Teresa de Tena Rey y colaboradores en el que abordan el estudio geoarqueológico de la dinámica de vertiente en el poblado de la Segunda Edad del Hierro de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres), situado en la penillanura cacereña. A partir de las observaciones realizadas en el campo y la obtención de una serie de perfiles mediante tomografías eléctricas, determinan que en la vertiente oriental del poblado se han producido sucesivas etapas de erosión e inestabilidad gravitacional por procesos naturales que se han visto agravadas por procesos antrópicos derivados de la actividad agrícola secular una vez abandonado el poblado.

Continua el número con el trabajo de Carlos Camuñas Palencia y su equipo centrado en el estudio del condicionamiento geológico del asentamiento visigodo de Los Hitos (Arisgotas, Toledo). El yacimiento se localiza en la cuenca hidrográfica del río Tajo, en un punto con una cierta diversidad litológica que permitió a sus pobladores disponer de una amplia gama de materias primas líticas para la construcción. A la vez, desde el punto de vista hidrogeológico su emplazamiento ofrecía, por un lado, buenas posibilidades para la captación y consumo de agua, mientras que, por otro, generaba riesgo por inundaciones.

El tercer trabajo, realizado por Roberto Matías Rodríguez, analiza con detalle los sistemas de molienda del cuarzo aurífero en las labores mineras romanas del noroeste de la península ibérica. El autor realiza un completo catálogo de los molinos de impacto múltiple, de impacto individual y rotativos recuperados en esa región aurífera, a la vez que determina la litología y procedencia de los mismos. Si bien, por lo general, proceden del entorno de la labor minera, en ocasiones son de zonas distantes.

La cuarta contribución es de Rodrigo Andrés Bercianos y Javier Fernández-Lozano y se centra en el estudio de una serie de nuevas evidencias de actividad minera aurífera antigua en la sierra de la Culebra (Zamora). Estas evidencias se localizan en las localidades de Villanueva de Valrojo y de Riofrío de Aliste y se manifiestan por la presencia de zanjas-canal, zanjonas y pequeñas cortas de arrastre destinadas al lavado de los depósitos aluviales y coluviales con objeto de extraer el oro que contenían.

Por último, el quinto trabajo corre a cargo de Jesús F. Jordá Pardo y David Álvarez Alonso y su equipo de colaboradores. En él se ofrece un estudio geoarqueológico del yacimiento aziliense de la cueva de Los Azules (Cangas de Onís, Asturias), en el que los autores abordan la descripción litoestratigráfica de una de las secciones de las antiguas excavaciones, el análisis sedimentológico y edafológico de las muestras obtenidas de cada una de las capas que aparecen en esa sección y el análisis cronoestratigráfico de la secuencia a partir de las dataciones radiocarbónicas antiguas y las obtenidas recientemente. Todo ello permite identificar los procesos geológicos que dieron lugar a este registro estratigráfico depositado al final del Pleistoceno superior.

El resultado es un conjunto de cinco trabajos que tratan algunas de las líneas de investigación geoarqueológica que se siguen actualmente como son los estudios sobre la evolución y el condicionamiento geológicos de los asentamientos protohistóricos e históricos, la minería aurífera de época antigua y la formación y cronología de los registros arqueosedimentarios kársticos del Pleistoceno. En definitiva, cinco trabajos de literatura geoarqueológica que ofrecen una visión diversa de las investigaciones que actualmente se llevan a cabo en nuestro país en el ámbito de la Geoarqueología, una disciplina emergente que se encuentra a caballo entre las Ciencias de la Tierra y la Historia.

Desde estas líneas, como editor invitado de este Número Especial y presidente de la Comisión de Geoarqueología, quiero expresar mi agradecimiento a la Sociedad Geológica de España y a su Comité Editorial por la oportunidad que ofrecieron a los participantes en la sesión de Geoarqueología del XI Congreso Geológico de España para publicar en la *Revista de la Sociedad Geológica de España* los resultados de nuestras investigaciones geoarqueológicas, a los revisores de los manuscritos cuyas consideraciones han contribuido a su mejora y, muy especialmente, a la Editora Principal de la RSGE, María José Domínguez Cuesta, por su ayuda constante durante todos los momentos del proceso editorial y por sus acertados y constructivos comentarios enfocados a la obtención de unas publicaciones de calidad.

Referencias

- Borja Barrera, F., 1993. Formaciones Superficiales Antrópicas. Aportación al estudio del proceso holoceno de antropización de los sistemas naturales. *Arqueología Espacial*, 16-17: 29-39.
- Borja Barrera, F., 2014. Sevilla (1500 a.C.-1500 d.C.). Estudio de geoarqueología urbana. In: Beltrán, J. and Rodríguez, O. (Eds.), *Sevilla Arqueológica. La ciudad en época protohistórica, antigua y andalusí*. Sevilla, 274-303.
- Borja, F., 2016. Open discussion: Geoarchaeology as Geoarchaeology. Newsletter, IAG Working Group on Geoarchaeology, 17: 7-11.

- Brothwell, D., Higgs, E., 1980. Ciencia en Arqueología. Fondo de Cultura Económica, México, D.F., 808 p.
- Butzer, K.W., 1989. Arqueología - una ecología del hombre: Método y teoría para un enfoque contextual. Ediciones Bellaterra, Barcelona (1^a edición Cambridge University Press, 1982), 415 p.
- Errandonea Martín, J., Gárate Olave, I., García de Mandinabeitia, S., Sarrionaindia Eguidazu, F. (Eds.), 2021. X Congreso Geológico de España 5-7 julio 2021 Vitoria-Gasteiz. Geo-Temas, 18.
- Goldberg, P., Macphail, R. I., 2006. Practical and theoretical Geoarchaeology, Oxford, 464 p. <https://doi.org/10.1002/9781118688182>
- Jordá Pardo, J. F., 1993. La Geoarqueología en España hoy. Trabalhos de Antropología e Etnología, 34 (3-4): 465-478.
- Jordá Pardo, J.F., Borja Barrera, F., 2018. Prólogo. En: Geoarqueología, entre las Ciencias de la Tierra y la Historia. Geoarchaeology, between Earth Sciences and History (Jordá Pardo, J.F., Borja Barrera, F., Eds.), Boletín Geológico y Minero, 129 (1/2): 5-11. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.129.1.015>
- Jordá Pardo, J. F., Mingo Álvarez, A., Quesada López, J. M., García-Entero, V., 2012. Métodos y técnicas aplicados al estudio de la cultura material (I). En: Métodos y Técnicas de Investigación Histórica I (Peréz Agorreta, M.J., Ed.). UNED, Madrid, 329-382.
- Miskovski, J.C. (Ed.), 2002. Géologie de la Préhistoire, méthodes, techniques, applications. Association pour l'étude de l'environnement géologique de la Préhistoire, Géopré, Presses universitaires de Perpignan, Paris, 1519 p.
- Ruiz Constán, A., Marín Lechado, C, Pedrera Parias, A. (Eds.), 2024. XI Congreso Geológico de España 2-5 julio 2024 Ávila. Geo-Temas, 20.
- Schiffer, M.B. (1987). Formation Processes of the Archaeological Record. University of New Mexico Press, Albuquerque, 418 p.

Madrid, 3 de noviembre de 2025.

Jesús F. Jordá Pardo

Editor Especial del Número Especial de Geoarqueología de la RSCE



DINÁMICA GEOARQUEOLÓGICA DE LA VERTIENTE ORIENTAL DEL RECINTO AMURALLADO DEL YACIMIENTO DE VILLASVIEJAS DEL TAMUJA (BOTIJA, CÁCERES, ESPAÑA)

Georarchaeological dynamics of the eastern slope of the walled enclosure of the Villasviejas del Tamuja site (Botija, Cáceres, Spain)

M^a Teresa de Tena Rey¹, Carmen Pro Muñoz¹, Victorino Mayoral Herrera² y Elia Quirós³

¹Centro Universitario de Mérida, Universidad de Extremadura, Avda Santa Teresa de Jornet, 38, 06800, Mérida, Badajoz.

mtdetena@unex.es, cpro@unex.es

²Instituto de Arqueología (CSIC-Junta de Extremadura), Plaza de España, 15, 06800, Mérida, Badajoz.

vmayoral@jam.csic.es

³Escuela Politécnica de Cáceres, Universidad de Extremadura, Avda de la Universidad S/N, Norte, 10003 Cáceres.
equiros@unex.es

Resumen: La historia de los procesos geodinámicos que han afectado a los sitios arqueológicos tras el abandono, está ligada a sus posteriores usos y a las características geomorfológicas. Estos condicionantes son, en buena parte, determinantes de los procesos erosión y depósito que se producen en los asentamientos después del abandono. La identificación de esta dinámica es necesaria al condicionar la integridad y detección de los restos arqueológicos. En este trabajo se presenta el estudio llevado a cabo en el castro de la Segunda Edad del Hierro de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres, España) con el fin de valorar los procesos dinámicos y de conservación en la vertiente oriental de este recinto. En la superficie de esta vertiente, es reconocible parte del tramo de la muralla construida con bloques de granito, aunque no es visible el sustrato sobre el que se edifica. Son muy abundantes los bloques deslizados a lo largo de ella. A partir de las observaciones directas en campo y del estudio indirecto mediante tomografía eléctrica a través de diferentes perfiles que han alcanzado distintas profundidades, se ha podido precisar el límite del sustrato de pizarras sobre el que se edificó la muralla y los depósitos que lo recubren. En cuanto a la dinámica geoarqueológica, se ha determinado que la vertiente ha estado afectada por procesos antrópicos y naturales. Las estructuras enterradas detectadas, indican sucesivas etapas de erosión e inestabilidad gravitacional agravadas por el fin de la actividad agrícola instalada en este espacio tras el abandono del castro.

Palabras clave: Geoarqueología, tomografía eléctrica, procesos de laderas, penillanura cacereña, Edad del Hierro.

Abstract: The history of the geodynamic processes that have affected archaeological sites after abandonment is linked to their subsequent uses and the geomorphological characteristic. These conditions are, to a large extent, determinants of the processes of erosion and deposition that occur in settlements after abandonment. The identification of this dynamic is necessary when conditioning the integrity and detection of the archaeological remains. This work presents the study carried out in Second Iron Age hillfort of Villasviejas

del Tamuja (Botija, Cáceres, Spain) in order to assess the dynamic and conservation processes on the eastern slope of this enclosure. On the surface of this slope, part of the section of the wall built with granite blocks is recognizable, although the substrate on which it is built is not visible. The presence of sliding blocks along it is very abundant. Based on direct observations in the field and the indirect study using electrical tomography through different profiles, which have reached different depths, it has been possible to determine the boundary between the slate substrate on which the wall was built and the deposits that cover it. Regarding the geoarchaeological dynamics, it has been determined that the slope has been affected by anthropic and natural processes. The buried structures detected indicate successive stages of erosion and gravitational instability aggravated by the end of the agricultural activity installed in this space after the abandonment of the fort.

Keywords: Geoarchaeology, electrical tomography, slope processes, peneplain of Cáceres, Second Iron Age.

De Tena Rey, M.T., Pro Muñoz C., Mayoral Herrera V., Quirós Rosado E., 2025. Dinámica geoarqueológica de la vertiente oriental del recinto amurallado del yacimiento de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres, España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 38 (2) 7-16.

Introducción

El sitio arqueológico de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres, España), es un poblado fortificado de la Edad del Hierro que se localiza en el suroeste de la península ibérica, concretamente en la penillanura entre los ríos Tajo y Guadiana. El asentamiento estuvo ocupado desde principios del siglo IV hasta mediados del siglo I a. C., y consta de dos recintos amurallados (norte y sur) con un total de unas 7 ha de superficie (Fig. 1). Es un importante referente para el estudio de la Segunda Edad del Hierro y el proceso de romanización en el sector occidental de la Meseta peninsular, por ser uno de los enclaves de mayor extensión y monumentalidad en dicho ámbito geográfico, además de uno de los que mayor atención ha recibido en la literatura científica sobre el tema. Así, cuenta con una dilatada actividad de investigación que abarca trabajos de excavación en el interior de sus dos recintos amurallados (Hernández *et al.*, 1989), así como de prospección de su entorno (Hernández y Martín, 2017). Más recientemente se ha abierto una línea de investigación centrada en una lectura extensiva de la organización espacial interna del sitio (Mayoral, 2021) mediante la aplicación de métodos no destructivos.

El análisis combinado de todos estos datos permite vislumbrar una compleja relación entre el recinto defensivo y las actividades que se desarrollaban en su interior. Este sistema ha revelado una larga secuencia de evolución, durante la cual se emplearon diferentes soluciones técnicas y con un grado muy variable de adaptación y modificación de la topografía preexistente. En este sentido, existe una marcada diferencia entre los dos recintos que componen el yacimiento. Aquí nos centraremos en el septentrional, que corresponde a la ocupación inicial del asentamiento hacia principios del siglo IV a.C. Esta zona amurallada se restringe a un recinto de unas 4 ha, que aprovecha un promontorio con vistas al río Tamuja. La escarpada curva del río ofrece en los lados noroeste y norte la protección natu-

ral de paredes verticales de hasta 10 a 15 m de altura. A lo anterior, los primeros habitantes del castro añadieron una muralla defensiva de piedra seca construida con las pizarras del sustrato. La cara externa se inclinó para adaptarse a las laderas, llenando el espacio interior con una mezcla de bloques de pizarra y tierra.

Esta muralla fundacional es aún visible de manera intermitente a lo largo de los lados occidental y septentrional del recinto. En una etapa más reciente, coincidiendo con la construcción del recinto sur, se produce una total remodelación del sistema defensivo, en especial en el lado oriental y meridional (Mayoral, 2021). Se introduce una técnica constructiva completamente diferente (sillarejo con bloques a soga y tizón), basada además en el empleo del granito, material completamente alóctono extraído y transportado desde las canteras localizadas a unos seis kilómetros al noreste del asentamiento (batolito de Plasenzuela).

Pese a la gran envergadura de estas estructuras, el papel que han jugado las diferentes ocupaciones del castro y la dinámica en las vertientes tras su posterior abandono, a mediados del siglo I a. C., complica mucho la identificación tanto de los niveles en los que se apoya la muralla de granito, como de los arrastres y procesos subsiguientes al derrumbe parcial de la misma. Ha influido mucho en este sentido la biografía del sitio a partir del momento en que se inició la explotación agrícola de los terrenos que ocupaba. A fin de aprovechar la riqueza orgánica del suelo favorecida por la prolongada ocupación humana en el lugar, se construyó un complejo entramado de cercados y bancales para el cultivo de cereales y leguminosas en un régimen de secano. Estas estructuras modificaron la topografía del sitio arqueológico, con grandes aportes de tierra que llenaron los fosos y nivelaron el terreno. Carecemos de documentación que permita atestiguar en qué momento se inició esa actividad, que formaría parte de la economía tradicional del cercano pueblo de Botija. Sí que sabemos que este sistema de aprovechamiento fue progresivamente abandonado a partir de los años 60 del pasado siglo. La

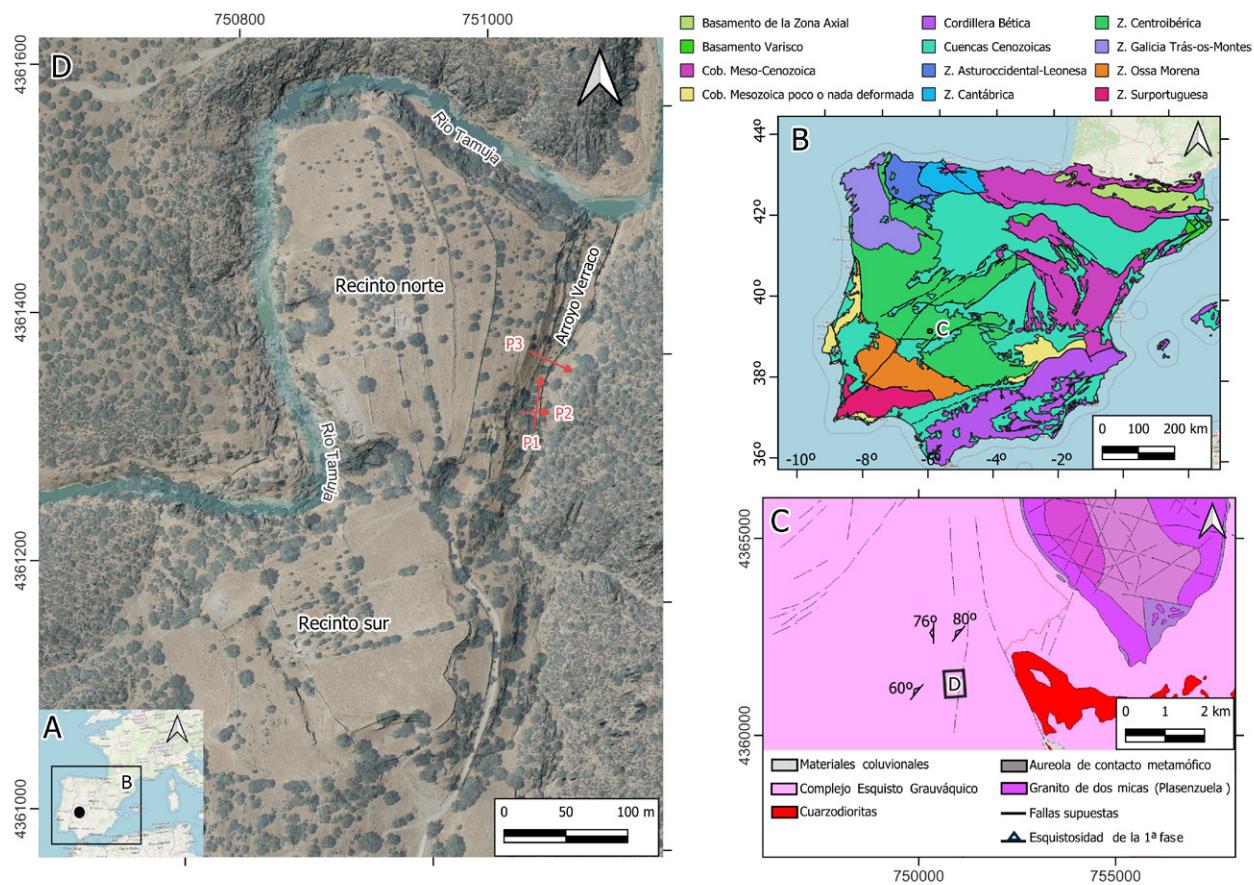


Fig. 1.- Localización y esquema geológico del área de estudio. A. Mapa base y datos del OpenStreetMap y Fundación OpenStreetMap (CC-BY-SA) © B. Grandes regiones geológicas de la península ibérica y Baleares. Escala: 1:5000000. Coordenadas marco: EPSG4326-WGS84. C. Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (Hojas 705 y 730). Fuente: IGME (Instituto Geológico y Minero de España) Escala: 1:110000. Sistema de coordenadas: ETRS89/UTM huso 29. D. Mapa Base Ortofoto PNOA máxima actualidad. Fuente: IGN (Instituto Geográfico Nacional).

ruina de estas estructuras supuso la reactivación de los procesos erosivos, sobre todo en las laderas con pendientes más acusadas como es el caso de la zona objeto del presente estudio.

El conocimiento de la evolución geomorfológica y sucesivas transformaciones de los sitios arqueológicos es importante ante la amenaza que representan estos procesos geodinámicos en su perdurabilidad y es necesario en la toma de medidas para su conservación. Los estudios con diferentes métodos y técnicas, relativos a cómo se ve afectado el patrimonio arqueológico por la evolución de esta dinámica, tanto natural como antrópica en diferentes contextos (Vicko, 2004; Bermúdez, 2010; Micle, 2014; Gafurov *et al.*, 2019; Covátaru *et al.*, 2022; Lebrun *et al.*, 2023), y el riesgo que representa (Jiménez-Sánchez y Ballesteros, 2017; Kincey *et al.*, 2017), proporcionan una visión de los sitios y su entorno que ayuda a la comprensión del impacto tras el abandono.

El objetivo del presente trabajo es estudiar en detalle la ladera oriental del recinto amurallado de Villasviejas del Tamuja, para determinar la configuración del sustrato geológico, estimar los depósitos que lo recubren y detectar el registro arqueológico que permita valorar cómo ha sido la dinámica en este espacio.

Se pretende que este estudio contribuya al conocimiento del emplazamiento y evolución de la muralla, así como del riesgo que presenta la acción erosiva y dinámica gravitacional para la conservación de los yacimientos arqueológicos.

Marco geológico y geomorfológico

El área de estudio se localiza en la provincia de Cáceres (España), a unos 25 km al sureste de la capital y en el término municipal de Botija. El entorno se caracteriza por un dominio de la dehesa con matorral y pastizal, y una dedicación predominantemente ganadera. En este sentido el sitio arqueológico representa una singularidad en el paisaje, pues históricamente ha sido un espacio de dedicación agrícola hasta el abandono de los campos de labor durante las últimas décadas (Mayoral *et al.*, 2019). Desde el punto de vista geológico, a escala regional el emplazamiento de Villasviejas se encuadra en la Zona Centroibérica del Macizo Ibérico donde las series del Precámbrico Superior-Cámbrico Inferior ocupan extensos afloramientos constituidas fundamentalmente por pizarras y grauvacas, pertenecientes al Complejo Esquisto Grauváquico (CEG) (Carrington da Costa, 1950) (Fig. 1). El CEG ha sido di-

vidido en diferentes unidades litoestratigráficas correspondiendo el área de estudio al AloGrupo Domo Extremeño (Álvarez Nava *et al.*, 1988). Estas series de gran monotonía litológica están caracterizadas por un metamorfismo regional de bajo grado y se encuentran afectadas por diferentes fases de deformación acompañadas de plutonismo al que se liga el cercano batolito de Plasenzuela (Rodríguez Alonso *et al.*, 2004; Pereira *et al.*, 2018) originado en la fase Varisca. La primera fase del plegamiento hercínico dio origen a una serie de pliegues de escala métrica, generándose una esquistosidad de fractura S1 muy homogénea y penetrativa con direcciones N-S o N 30° buzando hacia el oeste y con ángulos próximos a la vertical en la zona, mientras que la segunda fase originó un conjunto de grandes estructuras, de escala kilométrica, donde se incluyen el gran anticlinorio centroextremeño. Como consecuencia de esta Orogenia Hercínica, la región emergida y organizada en grandes estructuras afectadas por fracturas y pliegues sufre una intensa erosión que abarcaría desde el final del Carbonífero, hasta el Paleoceno. Con la Orogenia Alpina a principios del Terciario se reactivan las fracturas existentes tras el importante periodo de erosión que tuvo lugar en el área, originándose la fosa del Tajo.

La morfología actual del área se originó definitivamente durante el Holoceno (Gómez Amelia, 1985), dominando una extensa llanura peniplanizada de 400 m de altitud media que está siendo degradada por la red hidrográfica actual fuertemente encajada, situándose el yacimiento de Villasviejas, en la cuenca del río Tamuja incluido en la red del río Almonte, afluente del Tajo. La presencia en el área de fracturación con predominio de la de dirección NE-SO, que produce lineaciones de rotura y disgregación de la roca favorables para el encajamiento, ha sido un factor determinante tanto en la organización como en el trazado de la red fluvial (Garrote *et al.*, 2002; Garzón *et al.*, 2012; Whittaker *et al.*, 2007) y en la posterior evolución de los accidentes geográficos.

El yacimiento de Villasviejas se asienta en un promontorio constituido por rocas metasedimentarias del CEG, fundamentalmente pizarras. Los trabajos de prospección mediante tomografía eléctrica realizados previamente en el emplazamiento han permitido deducir que, por debajo de estas pizarras y en la base del asentamiento, existiría una posible intrusión granítica (De Tena *et al.*, 2020). Este promontorio se encuentra delimitado por el río Tamuja en su vertiente occidental y el arroyo Verraco en la oriental. Las marcadas alineaciones de geometrías rectas con dirección NNE-SSO, claramente identificadas en el modelo digital del terreno generado para el área investigada, sugieren que este arroyo discurre a lo largo de una falla deducida.

En un análisis más detallado del relieve del recinto norte, puede verificarse una clara diferenciación entre las vertientes este y oeste que lo delimitan. La vertiente occidental, conformada por pizarras con orientación N-S y buzamiento próximo a la vertical en el borde norte y de 60° O en el sur, es más escarpada, reconociéndose en algunos puntos la muralla de lajas de pizarras correspondiente a los primeros habitantes del castro adaptada a esta disposición.

Por lo que respecta a la ladera oriental, el límite lo

marca el arroyo del Verraco con un patrón rectilíneo posiblemente de tipo tectónico, conformando una vertiente con una topografía menos abrupta. En esta vertiente no ha sido posible analizar las orientaciones de las pizarras sobre las que se apoyaría la muralla al no observarse afloramientos del sustrato geológico siendo uno de los objetivos de este trabajo, determinar la configuración geológica de esta vertiente. Los recubrimientos de derrubios tapizan la superficie con importantes acumulaciones en la base. En esta ladera es reconocible en superficie parte del tramo de la muralla construida con bloques de granito (Fig. 2A), y son abundantes los bloques deslizados a lo largo de ella (Fig. 2B) como consecuencia del desplome de esta edificación. La generación de una extensa trama de parcelas agrícolas debido a la intervención humana habría modificado fuertemente la topografía de esta vertiente.

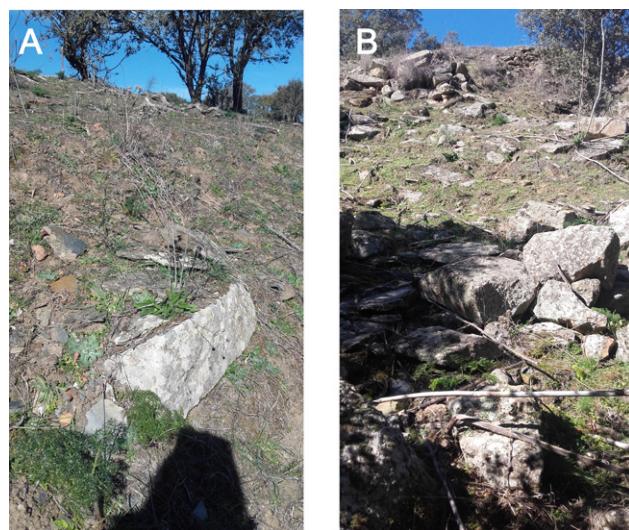


Fig. 2.- A. Restos visibles de la muralla de granitos. B. Bloques de granito deslizados a lo largo de la ladera.

Metodología

La metodología ha supuesto el desarrollo de trabajo de campo para abordar el reconocimiento de los materiales aflorantes en el entorno del yacimiento, por un lado, y el examen de las características de los depósitos que cubren la vertiente, por otro. De manera indirecta, se ha recurrido al método de tomografía eléctrica que resulta muy adecuado en la exploración geoarqueológica (Rey *et al.*, 2010; Papadopoulos *et al.*, 2014), al facilitar la identificación del sustrato y proporcionar información de las discontinuidades del subsuelo. Se realizaron tres perfiles en el primer tramo del arroyo y ladera, para estimar la potencia del depósito, establecer niveles e interpretar su disposición. El equipo empleado fue un ABEM Terrameter LS (Fig. 3A), realizán-

	Distancia entre electrodos (m)	Longitud (m)	Profundidad (m)	Error/nº de iteraciones
P1	1	40	8	0,9/8
P2	0,5	20	4	1,8/7
P3	1	40	8	1,9/7

Tabla 1.- Características de los perfiles de tomografía eléctrica.

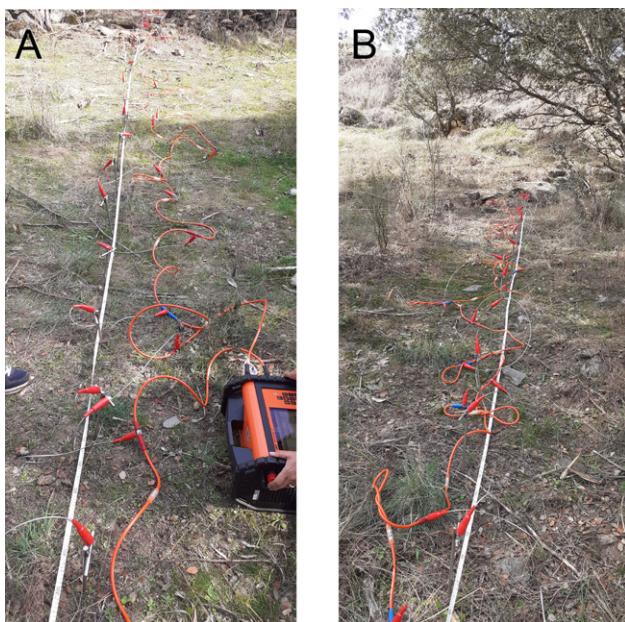


Fig. 3.- A. Equipo de tomografía eléctrica empleado. B. Imagen del perfil P1. Ver situación en figuras 1 y 4.

dose el procesado de los datos con el programa de inversión Res2dinv de Geotomo Software. En los tres perfiles realizados, se han empleado dos cables con 21 electrodos cada uno, adquiriendo los datos mediante la configuración “*multi gradient array*”. En la Tabla 1 se muestra para cada perfil: distancia entre electrodos, longitud, profundidad máxima alcanzada y el error con el número de iteraciones para alcanzar la solución en el proceso de inversión numérica. Todos los perfiles han sido georreferenciados mediante observaciones GPS con correcciones RTK procedentes de la Red Extremeña de Posicionamiento. El Sistema de Proyección empleado ha sido el UTM Huso 29N, datum ETRS 89.

La posición de los perfiles se eligió con el objetivo de obtener información del talud y de los materiales acumulados en su base. El primer perfil P1, con una longitud de 40 m, se realizó paralelo al cauce del arroyo del Verraco, en los depósitos de la terraza artificial inferior creada en el borde del arroyo y limitada por una cerca de pizarras (Fig. 3B). La separación entre electrodos ha sido de 1 m, alcanzando una profundidad de investigación de 8 m. El perfil P2 se realizó perpendicular al perfil P1 con una longitud de 20 m y una profundidad de investigación de 4 m al estar separados los electros 0,5 m. Se inició en la parte media baja de la ladera, muy próximo a un punto donde es visible un tramo de muralla con bloques de granito de aproximadamente 3 m de longitud (Fig. 2A), finalizando en el cauce del arroyo, donde se observó un mal contacto de los electrodos debido a las condiciones del suelo. El perfil P3, con una longitud de 40 m y separación entre electrodos de 1 m, alcanzó una profundidad de investigación de 8 m. Se inició en la parte superior de la ladera y finalizó en el margen derecho del arroyo, atravesando el cauce y una cerca de piedra situada en su borde inferior izquierdo. La situación de los tres perfiles se muestra en la Figura 4.

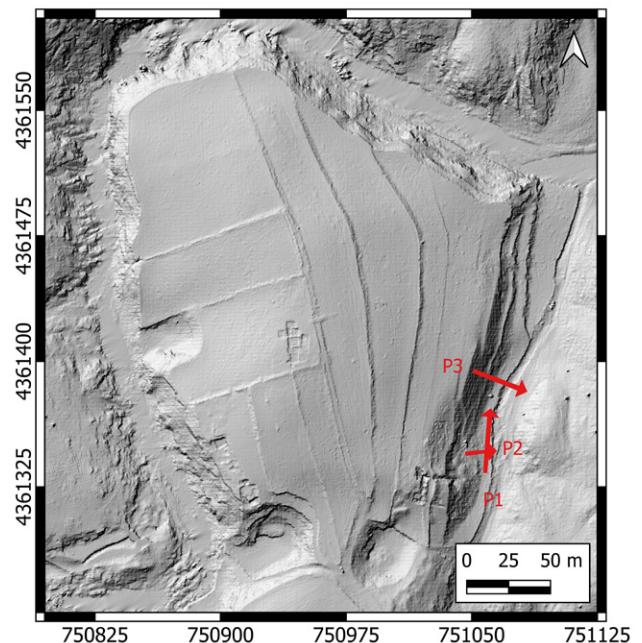


Fig. 4.- Localización de los perfiles de tomografía eléctrica sobre imagen LiDAR (sistema de referencia ETRS89 y proyección UTM-29N). Las flechas apuntan al final de cada perfil.

Resultados y discusión

Los resultados del estudio de campo revelan que no aparecen afloramientos del sustrato de pizarra en la ladera estudiada, en cambio sí abundan los bloques de granito deslizados, procedentes del desplome de la muralla edificada en su parte superior (Fig. 2B). Toda la ladera se halla cubierta de depósitos de derrubios con un espesor variable llegando hasta los 3 m. Estos depósitos de ladera se componen de materiales arenosos y arcillosos con algunos cantos de pizarras y restos cerámicos arrastrados de niveles

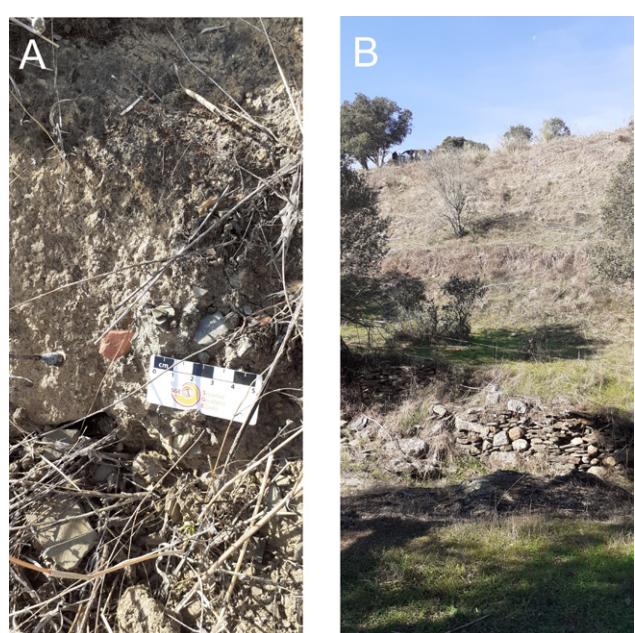


Fig. 5.- A Depósitos de ladera. B Cercas de piedras edificadas a lo largo de la ladera delimitando pequeños huertos.

superiores desmantelados (Fig. 5A). La base de la ladera está intensamente antropizada, localizándose cerca de piedras cercanas al cauce y a media ladera que han actuado como diques de contención, creándose pequeñas terrazas con considerables acumulaciones de derrubios (Fig. 5B).

En cuanto a los perfiles de tomografía eléctrica llevados a cabo, se ha obtenido la distribución de la resistividad para cada uno de ellos con un error inferior al 2%. En la Figura 6 se muestra la distribución de resistividad para cada perfil empleando una escala común, con el fin de analizar y comparar no sólo las principales anomalías, sino también los distintos niveles que configuran la vertiente.

En los tres perfiles, se identifica un primer nivel, con resistividades entre 600 y 700 Ωm que se interpreta como derrubios de ladera, en el que pueden distinguirse diferentes elementos constructivos que se corresponden con las anomalías obtenidas. Por debajo de este nivel, marcado con trazo discontinuo, se ha identificado el sustrato de pizarras

a diferentes profundidades y con valores de resistividad en torno a los 340 Ωm , los mismos que los obtenidos en los perfiles realizados en el interior del recinto en anteriores campañas de estudio (Mayoral *et al.*, 2019; De Tena *et al.*, 2020; Pro *et al.*, 2020).

En particular, en el perfil P1 (Fig. 7) puede observarse un nivel superior que se corresponde con coluviones donde se engloban diferentes anomalías, probablemente correspondientes a una construcción/cerca que ha podido quedar recubierta por la acumulación de materiales de ladera, poniendo de manifiesto la importante dinámica reciente en esta vertiente. Los diferentes valores de resistividad de las anomalías detectadas en él (A1, A2, y A3), coincidirían con los distintos estados de alteración de los tramos de construcción sepultados. La potencia de este nivel es de 2,5 m y estaría separado del nivel inferior, correspondiente al sustrato de pizarras, por una superficie horizontal neta y aplanada, claramente antrópica.

En el perfil P2 (Fig. 8), el nivel de depósitos engloba la anomalía B1, localizada entre 4 m y 8 m desde el origen del perfil y a una profundidad entre 1 m y 3 m, presentando unos valores de resistividad muy elevados atribuibles a un importante derrumbe de bloques pertenecientes a la muralla. La anomalía B2, se correspondería con un elemento constructivo coincidente con el localizado en el perfil P1 como se muestra en la Figura 9A señalado con un círculo, verificando la fiabilidad de esta anomalía. En cuanto a la anomalía vertical entre B1 y B2 (Fig. 8) al no haberse alcanzado la profundidad suficiente, no podemos asegurar si guarda relación con la presencia de grietas en el sustrato o bien se trata de un artificio introducido por el proceso matemático de inversión. Por debajo de este nivel, los valores de resistividad se corresponden con el sustrato de pizarras. La parte final del perfil, situada en el borde del arroyo, no puede interpretarse al fallar los electrodos debido a un mal contacto con el suelo.

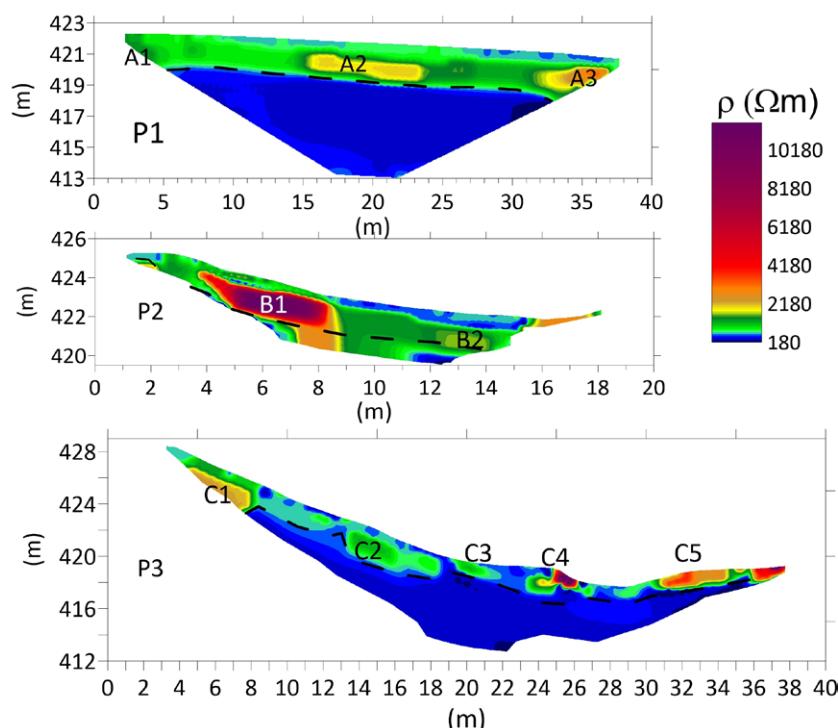


Fig. 6.- Distribución de resistividad para los perfiles P1, P2 y P3. Ver situación en la figura 4. La leyenda es común a los 3 perfiles.

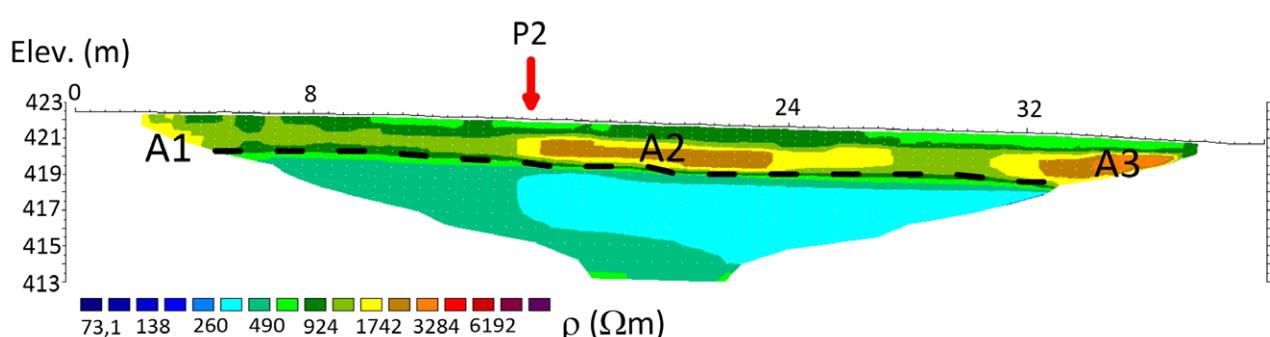


Fig. 7.- Resultados de la inversión para el perfil P1. La flecha roja indica el punto de corte con el perfil P2.

Elev. (m)

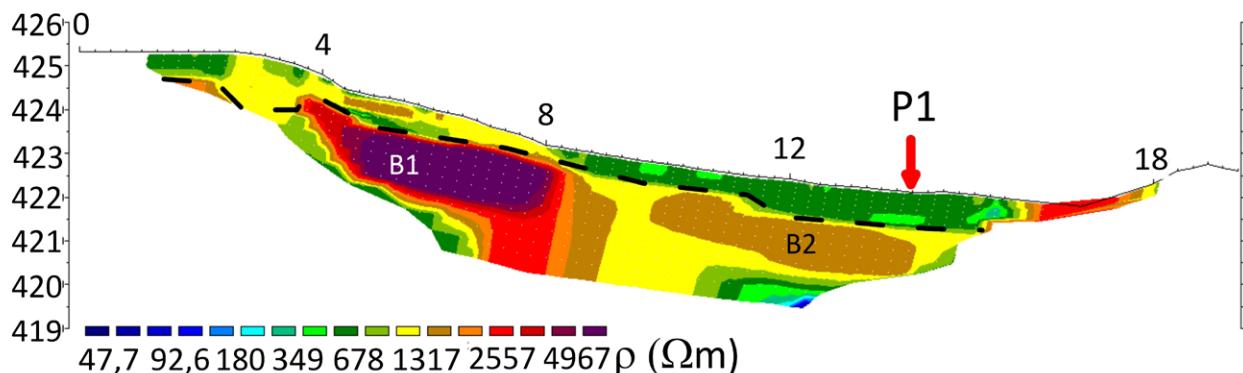


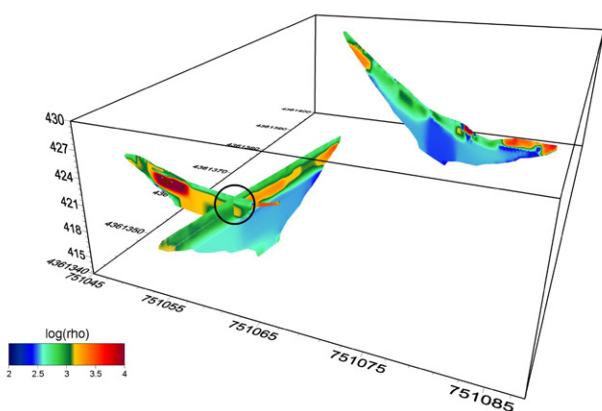
Fig. 8.- Resultados de la inversión para el perfil P2. La flecha roja indica el punto de corte con el perfil P1.

En cuanto al perfil P3 (Fig. 10), el primer nivel presenta un espesor variable con un máximo de 3 m, correspondiendo la parte inicial a depósitos de ladera y a aluviales en su parte inferior. Por lo que se refiere a las anomalías presentes en este nivel, los valores de resistividad obtenidos se corresponden con bloques graníticos. La primera anomalía localizada entre los 4 y 8 m (C1), se interpreta como restos de una estructura muraria situada a una cota coincidente con la del lienzo próximo visible y, por tanto, podría verificarse la continuidad de esta estructura, que contaría con una anchura de 4 m. A partir de los 12 m desde el origen del perfil, las diferentes anomalías determinadas corresponderían a bloques graníticos provenientes de la zona superior de la muralla basculados ladera abajo, como los que abundan en superficie, pero cubiertos hasta 3 m de depósitos de gravedad cuya interpretación se detalla en la Figura 11. Por debajo de este nivel aparece el sustrato de pizarras.

Los diferentes niveles geoeléctricos detectados permiten establecer el contacto geológico entre el sustrato de pizarras y los depósitos de ladera (Fig. 9B), así como la estructura geológica en la que se reconocen los elementos

arqueológicos correspondientes a la muralla y bloques desplazados con diferentes posiciones (Fig. 11). La intervención humana ha modificado la configuración natural del terreno. Para empezar, la propia construcción del recinto amurallado generó un enorme “contenedor” que retuvo los depósitos de ladera producidos durante más de 400 años de ocupación continua. El derrumbe de grandes tramos de las murallas tras el abandono del asentamiento a mediados del siglo I a.C. habría reactivado los procesos de inestabilidad y erosión. Esta dinámica se habría visto fuertemente modificada a partir de la Edad Media, con la generación de una extensa red de parcelas agrícolas creadas tras la repoblación cristiana que permitirían regularizar la circulación superficial reduciendo las acciones erosivas y la inestabilidad por sobresaturación. En términos generales, este entramado de cercados se superpone y coincide en gran medida con el perímetro de las murallas. Sin embargo, en muchos puntos estas paredes se extienden más allá del recinto defensivo, colmatando y ocultando el trazado original e incluso llenando por completo en algunos tramos los fosos y nivelando el talud original.

A



B

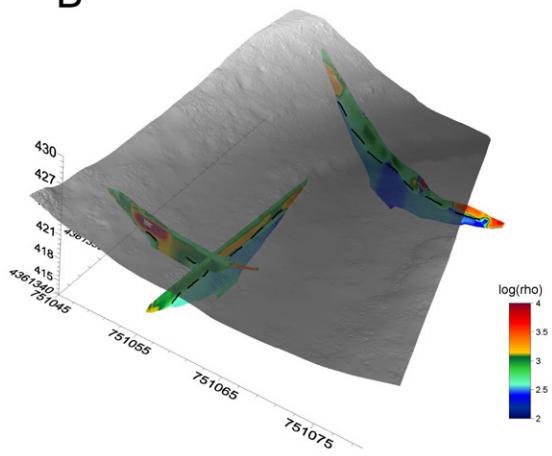


Fig. 9.- A. Representación 3D del resultado de inversión de los tres perfiles de tomografía eléctrica. B. Interpretación geológica de los tres perfiles a partir de la distribución de resistividades.

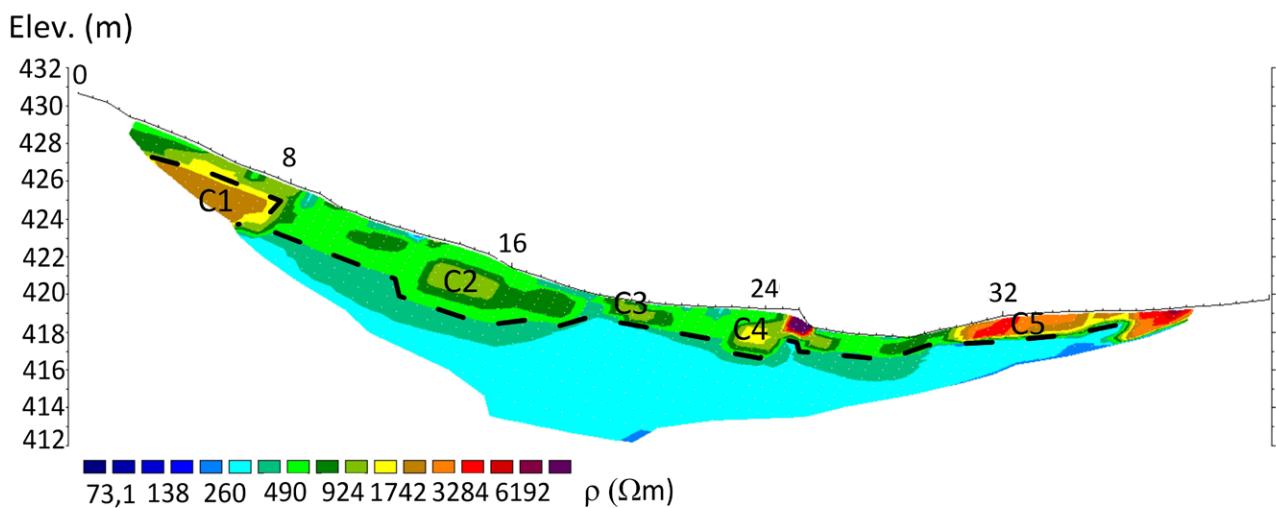


Fig. 10.- Resultado de la inversión para el perfil P3.

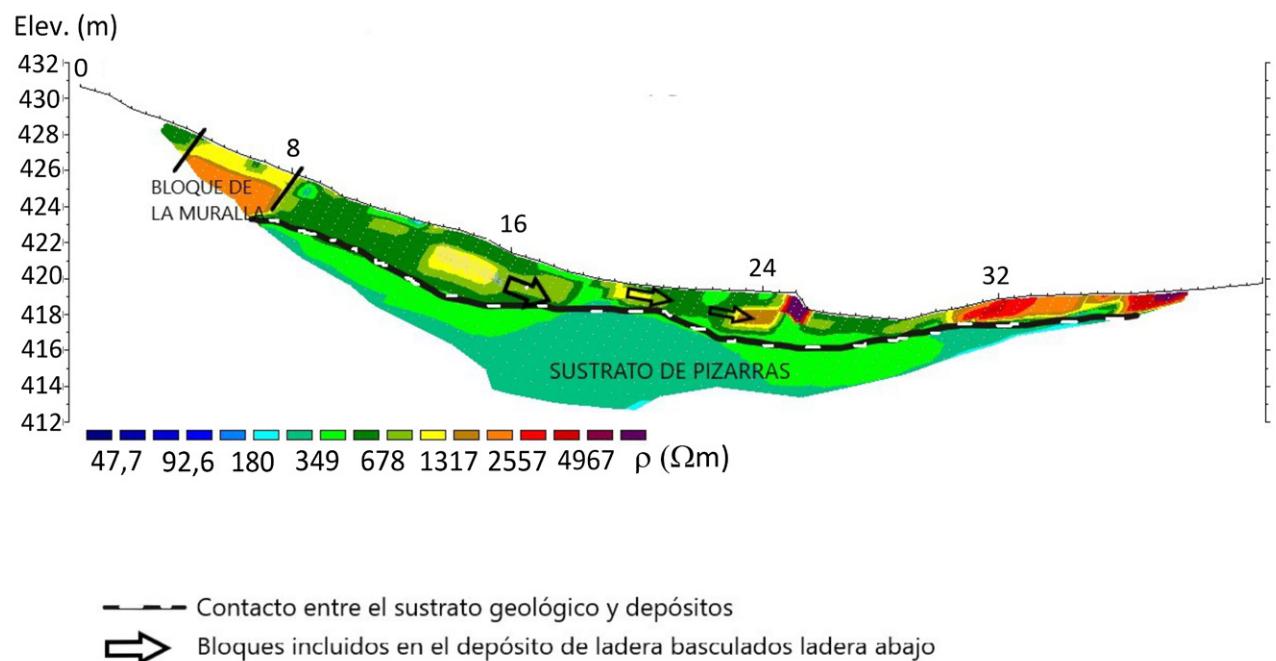


Fig. 11.- Interpretación geológica y arqueológica del perfil P3.

La potente capa de derrumbios que recubren la ladera, con un espesor de hasta 3 m, es indicadora de la dinámica a la que ha estado sometida y en la que se han visto implicadas construcciones, a tenor de los bloques de materiales detectados englobados en estos depósitos.

Conclusiones

La combinación de exploración directa en campo y tomografía eléctrica ha resultado clave para caracterizar la configuración actual de la ladera oriental del castro de Villasviejas del Tamuja. Estos métodos han permitido avanzar en la comprensión de su evolución a lo largo del tiempo. Los perfiles obtenidos han revelado, tanto la ubicación del sustrato geológico y los niveles de depósitos de ladera que lo recubren, como elementos arqueológicos significati-

vos, aportando una visión integral de la configuración geológica y arqueológica de la zona estudiada.

Asimismo, el estudio ha revelado que la muralla se apoya directamente sobre el sustrato de pizarras y ha permitido identificar distintas fases de procesos gravitatorios y remoción de materiales. Estos hallazgos evidencian la notable inestabilidad que ha afectado a la muralla defensiva, sometida a desprendimientos y deslizamientos de bloques que han complicado su conservación a lo largo del tiempo. Este conocimiento subraya tanto la complejidad como la fragilidad de un entorno sujeto a inestabilidad gravitacional, lo que compromete la preservación a largo plazo.

Los cambios en los usos del suelo han tenido gran influencia en la evolución del área. Así, tras el abandono del asentamiento a mediados del siglo I a. C., el derrumbe de grandes tramos de las murallas habría reactivado los pro-

cesos de inestabilidad. Por otra parte, los cambios en el aprovechamiento agrícola generaron inicialmente un efecto estabilizador con la creación de todo el sistema de parcelas, bancales y caminos de acceso y, posteriormente, la reactivación de los procesos desestabilización y erosión del suelo, con el fin de esta actividad agrícola tradicional. La información generada en este trabajo es fundamental para hacer un seguimiento adecuado con el fin de garantizar la conservación a largo plazo del yacimiento arqueológico.

Agradecimientos y financiación

Este trabajo ha contado con el apoyo económico de los siguientes proyectos de investigación: “Investigación y valorización social del patrimonio arqueológico de la Segunda Edad del Hierro en Extremadura mediante el uso de TIC y métodos no invasivos” (Ref. PRI IB20124), financiado por el Consorcio Regional Junta de Extremadura, y “Las raíces de los fenómenos urbanos en el suroeste de la península ibérica. Caracterización de los asentamientos de la Edad del Hierro mediante métodos no invasivos” (ref. PID2019-104611GB), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España. También queremos expresar nuestro agradecimiento al ayuntamiento de Botija (Cáceres) por su apoyo para el desarrollo de nuestra investigación.

Contribución de autores/as

Elaboración del trabajo, M.T. De Tena y C. Pro.; metodología, M.T. De Tena y C. Pro; obtención de datos, M.T. De Tena y C. Pro; figuras, M.T. De Tena, C. Pro y V. Mayoral; investigación/análisis, M.T. De Tena, C. Pro y V. Mayoral; revisión del manuscrito, M.T. De Tena, C. Pro, V. Mayoral y E. Quirós; coordinación, M.T. De Tena, C. Pro, V. Mayoral; supervisión, M.T. De Tena y C. Pro.; obtención de financiación, M.T. De Tena, C. Pro, V. Mayoral y E. Quirós.

Referencias

- Álvarez Nava, H., García Casquero, J.L., Gil Toja, A., Hernández Urroz, J., Lorenzo Álvarez, S., López Díaz, F., Mira López, M., Monteserín, V., Nozal, F., Pardo, M.V., Picart, J., Robles, R., Santamaría, J., Sole, F.J., 1988. Unidades litoestratigráficas de los materiales Precámbrico-Cárnicos en la mitad suroriental de la Zona Centro-Ibérica. II Congreso Geológico de España, SGE, Granada, 19–22.
- Bermúdez, M., 2010. Dinámicas geomorfológicas de Piedemonte y procesos de transformación de sitios arqueológicos en el Magdalena Medio Caldense. *Antropología social*, 12: 253–271.
- Carrington da Costa, J., 1950. Noticia sobre uma carta geologica do Buçaco, de Nery Delgado. Publicación Especial de la Comision de Servicio Geológico de Portugal, Lisboapp. 1–27.
- Covătaru, C., Stal, C., Florea, M., Oprüş, I., Simion, C., Rădulescu, I., Călin, R., Ignat, T., Ghiță, C., Lazăr, C., 2022. Human Impact Scale on the Preservation of Archaeological Sites from Mostiștea Valley (Romania). *Front. Environ. Sci.* 10:924440. <https://doi:10.3389/fenvs.2022.924440>.
- De Tena, M.T., Pro, C., Charro, C., Salgado, J.A., Mayoral, V., 2020. Geological characterisation of the settlement of Villasviejas del Tamuja (Cáceres, Spain). *Quaternary International* Vol. 566-567: 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.024>
- Gafurov, A., Gainullin, I., Usmanov, B., Khomyakov, P., Kasmov, A., 2019. Impacts of fluvial processes on medieval settlement Lukovskoe (Tatarstan, Russia), *Proc. IAHS* 381: 31–35. <https://doi.org/10.5194/piahs-381-31-2019>
- Garrote, J., Fernández, P., Garzón, G., 2002. Parámetros morfométricos de la red de drenaje y sus implicaciones estructurales en la cuenca del Tajo. En: *Aportaciones a la geomorfología de España en el inicio del Tercer Milenio* (Pérez-González, A., Vegas, J., Machado, M.J., Eds.). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 45-52.
- Garzón, G., Tejero, R.M., Ortega, J., Garrote, J., 2012. Incisión y desarrollo de la red fluvial sobre substrato rocoso. Morfología tectónica en el interfluvio Tajo – Guadiana. En: *Avances de la geomorfología en España, 2010-2012*, (González *et al*, Eds.). PubliCan, Ediciones de la Universidad de Cantabria, Santander, 281-284.
- Gómez Amelia, D. (1985). La penillanura cacereña. Estudio geomorfológico. Universidad de Extremadura, Cáceres, 32 p.
- Hernández, F., Rodríguez, M.D., Sánchez, M.A., 1989. Excavaciones en el Castro de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres). Dirección General de Patrimonio Cultural, Editora Regional de Extremadura. Mérida, 169 p.
- Hernández, F., Martín, A.M., 2017. Las necrópolis de El Romazal y el conjunto arqueológico de Villasviejas del Tamuja (Botija/Plasenzuela, Cáceres). La Ergástula Ediciones. Madrid, 466 p.
- Jiménez-Sánchez, M., Ballesteros, D., 2017. Metodología de evaluación del riesgo geoarqueológico en castros marítimos: El Castiellu (Asturias, España). *Geogaceta* 62: 59-62.
- Kincey, M., Gerrard, C., Warburton, J., 2017. Quantifying erosion of ‘at risk’ archaeological sites using repeat terrestrial laser scanning. *Journal of Archaeological Science: Report*, 12: 405–424. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.02.003>
- Lebrun, J., Bhiry, N., Woollett, J., Sæmundsson, P., 2023. Slope Dynamics in Relation to the Occupation and Abandonment of a Mountain Farm in Þistilfjörður, Northeast Iceland. *Geosciences* (Switzerland), 13(2), 30. <https://doi.org/10.3390/geosciences13020030>
- Miele, D., 2014. Archaeological heritage between natural hazard and anthropic destruction: the negative impact of social non-involvement in the protection of archaeological sites, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 163: 269 – 27. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.316>
- Mayoral, V., Charro, C., Salgado, J.A., Pro, C., De Tena, M.T., Chapa, T., Vallés, J., Terrón, J.M., Quirós, E., 2019. Radiography of an Iron Age hillfort: Non-invasive archaeology in the settlement of Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres). *Trabajos de Prehistoria*, 76: 302–322. <https://doi:10.3989/tp.2019.12239>
- Mayoral, V. (Ed.), 2021. Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres). Desvelamiento del paisaje urbano de un Castro de la Edad del Hierro. Mytra 9, Mérida, Spain, 248 p. <http://hdl.handle.net/10261/259927>
- Papadopoulos, N.G., Sarris A., Parkinson, W.A., Gyucha, A., Yerkes, R.W., Duffy, P.R., Tsourlis, P., 2014. Electrical Resistivity Tomography for the Modelling of Cultural Deposits and Geomorphological Landscapes at Neolithic Sites: A Case Study from Southeastern Hungary. *Archaeol. Prospect.* 21: 169–183. <https://doi:10.1002/arp.1480>
- Pereira, J.M., Castro, A., Fernández, C., Rodríguez, C., 2018. Multiple Paleozoic magmatic orogenic events in the Central

- Extremadura batholith (Iberian Variscan belt, Spain). *Journal of Iberian Geology*, 44: 309-344.
<https://doi.org/10.1007/s41513-018-0063-5>
- Pro, C., Caldeira, B., De Tena, M.T., Charro, C., Oliveira, R.J., Borges, J.F., Mayoral, V., 2020. Exploring the Consistency of Data Collected in Archaeological Geophysics: A Case Study from the Iron Age Hillfort of Villasviejas del Tamuja (Extremadura, Spain). *Remote Sensing*, 12, 1989.
<https://doi:10.3390/rs12121989>
- Rey, J., Martínez, J., Dueñas, J., Campos, D., Arias, F., Benavente, J., 2010. Electrical tomography applied to the survey of the archaeological site of Cástulo (Linares, Jaén). Preliminary results. *Geogaceta*, 48: 219-222.
- Rodríguez Alonso, M.D., Díez Balda, M.A., Perejón, A., Pieren, A., Liñán, E., López Díaz, F., Moreno, F., Gámez Vintaned, J.A., González Lodeiro, F., Martínez Poyatos, D., Vegas, R., 2004. Dominio del Complejo esquisto-grauváquico. Estratigrafía. La secuencia litoestratigráfica del Neoproterozoico-Cámbrico inferior. En: Vera, J.A. (Ed.), *Geología de España*. Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 78-81.
- Whittaker, A.C., Cowie, P., Attal, M., Tucker, G., Roberts, G., 2007. Bedrock channel adjustment to tectonic forcing: Implications for predicting river incision rate. *Geology*, 35: 103-106. <https://doi.org/10.1130/G23106A.1>
- Vicko, J., 2004. Extremely slow slope movements influencing the stability of Spis Castle, UNESCO site *Landslides* 1: 67-71.
<https://doi.org/10.1007/s10346-003-0007-8>

MANUSCRITO RECIBIDO: 19-12-2024

REVISIÓN RECIBIDA: 04-02-2025

ACEPTACIÓN DEL MANUSCRITO REVISADO: 30-04-2025



LA GEOLOGÍA COMO FACTOR CONDICIONANTE EN UN CONJUNTO ARISTOCRÁTICO VISIGODO: LOS HITOS (ARISGOTAS, TOLEDO, ESPAÑA)

Geology as a condiction factor of a Visigothic and aristocratic settlement: Los Hitos (Arisgotas, Toledo, Spain)

Carlos Camuñas Palencia¹, Isabel María Sánchez Ramos², Andrés Díez Herrero¹,
 M^a Ángeles Perucha Atienza¹ y Miguel Ángel Rodríguez-Pascua¹

¹CN IGME-CSIC. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.

c.camunas@igme.es, andres.diez@igme.es, ma.perucha@igme.es, ma.rodriguez@igme.es

² Seminario de Arqueología. Facultad de Humanidades. Universidad Pablo de Olavide. 41013 Sevilla.
imsanram@upo.es

Resumen: Los estudios geológicos realizados en yacimientos arqueológicos aportan una valiosa información que es de gran ayuda para apoyar, confirmar o refutar las interpretaciones arqueológicas planteadas. El entorno geológico del yacimiento arqueológico de Los Hitos (Toledo) se caracteriza por la presencia de materiales carbonatados y metamórficos, intruidos por rocas ígneas plutónicas, y de rocas sedimentarias detríticas que recubren parcialmente todos los anteriores, lo que proporciona en conjunto una alta variedad en la disponibilidad de materiales pétreos de construcción. El estudio de las posibilidades hidrogeológicas de estos materiales, sumado a la existencia de un pozo excavado en el yacimiento, puede dar respuesta a que la ubicación del asentamiento visigodo dependiera en gran medida de la facilidad de captación de agua subterránea que cubriera las necesidades de sus pobladores en cantidad y calidad suficientes. El estudio del registro paleohidrológico del yacimiento puede ayudar a comprender la posible interferencia de las comunidades humanas con las avenidas e inundaciones de los arroyos que circundan Los Hitos, y entender la funcionalidad del dique-mota meridional.

Palabras clave: yacimiento arqueológico, geología, agua subterránea, riesgos geológicos, sierra de Los Yébenes.

Abstract: Geological studies on archaeological sites provide valuable information that is helpful in supporting, confirming or refuting archaeological interpretations. The geological setting of the archaeological site of Los Hitos (Toledo) is characterised by the presence of carbonate and metamorphic materials, intruded by plutonic igneous rocks, and detrital sedimentary rocks that partially cover all of the above, which together provide a high variety in the availability of stone building materials. The study of the hydrogeological possibilities of the materials and the existence of a well excavated at the Los Hitos site, may suggest that the location of the Visigothic settlement depended to a large extent on the availability of groundwater to meet the needs of its inhabitants in sufficient quantity and quality. The study of the palaeohydrological record of the site can help to understand the possible interference of human communities with the flooding from the streams surrounding Los Hitos and to understand the functionality of the southern dyke.

Keywords: archaeological site, geology, groundwater, geological risks, Los Yébenes mountains.

Camuñas, C., Sánchez I., Díez-Herrero, A., Perucha, M.A., Rodríguez-Pascua, M.A., 2025. La geología como factor condicionante en un conjunto aristocrático visigodo: Los Hitos (Arisgotas, Toledo, España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 38 (2), 17-32.

Introducción y Antecedentes

Desde hace décadas, el estudio de los yacimientos arqueológicos se realiza desde un punto de vista multi- e interdisciplinar, involucrando no solo arqueólogos en sus diferentes subdisciplinas, sino antropólogos, biólogos, geólogos, geógrafos, topógrafos, etc. (Renfrew y Bahn, 2022). Estas interacciones disciplinares suelen dar lugar a nuevas vías de investigación que aportan datos relevantes y dibujan enfoques diferentes para las interpretaciones de los yacimientos, las dinámicas culturales y el desarrollo de futuros estudios derivados.

La disponibilidad y acceso a los recursos naturales en general, y en particular a los recursos geológicos (roca soporte de asentamientos y actividades humanas, materiales de construcción, minerales domésticos e industriales, aguas subterráneas para abastecimiento y regadío, relieves protectores de las comunidades, ...), siempre ha sido un factor determinante en el desarrollo cultural de las comunidades humanas desde la Prehistoria hasta la actualidad (Willey y Phillips, 1958; Clarke, 1968; Dartnell, 2019). En particular, el agua es un elemento esencial y resulta una condición indispensable para el emplazamiento, crecimiento y desarrollo de cualquier sociedad a lo largo de la Historia (Argudo García, 2019). La búsqueda de agua, superficial o subterránea, en cantidad y calidad suficientes para su aprovechamiento, es uno de los principales factores a resolver a la hora de decidir la ubicación de un hábitat.

Además, muchos de los procesos y fenómenos que controlan la dinámica terrestre no son lineales y continuos en su intensidad y frecuencia, sino que presentan eventos extremos de mayor magnitud y menor frecuencia, como terremotos, deslizamientos, colapsos, avenidas e inundaciones, que han podido interferir con las actividades humanas a lo largo de la Historia; e incluso haber condicionado la ubicación de los asentamientos, las vías de comunicación, las tipologías constructivas, la implementación de determinadas estructuras o elementos de protección (diques, contrafuertes, ...) y el abandono de todo o parte del asentamiento tras un desastre natural (Díez Herrero *et al.*, 2016).

Por lo tanto, el estudio de los recursos geológicos y los procesos geodinámicos activos en el entorno de yacimientos arqueológicos puede ser de notable interés para la interpretación arqueológica de los mismos (p.e., Díez Herrero *et al.*, 2024) y las aportaciones que los estudios geológicos pueden realizar a las investigaciones históricas en general y a los yacimientos arqueológicos en particular, son de gran ayuda para formular nuevas hipótesis causales, y para confirmar o refutar otras planteadas por equipos multidisciplinares.

El objetivo de este artículo es poner de manifiesto los condicionantes geológicos, como recursos naturales o procesos activos, que pudieron determinar o influir en el establecimiento, elementos constructivos, reformas y abandono de un asentamiento aristocrático visigodo en el centro de la península ibérica: Los Hitos (Arisgotas, Toledo) (Fig. 1). Todo ello a través de una batería de aproximaciones

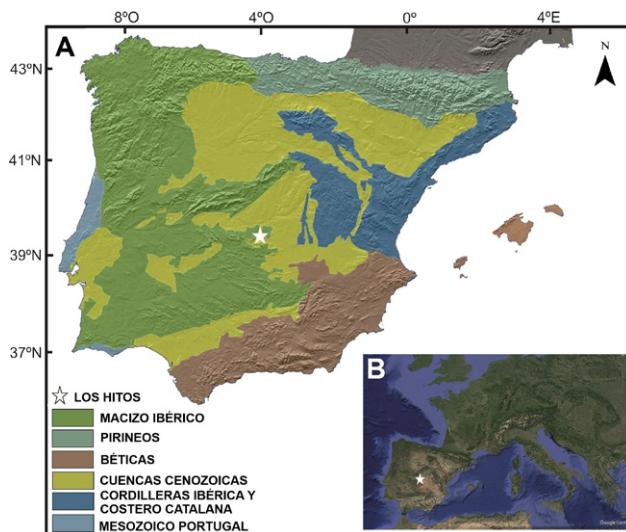


Fig. 1.- Localización del yacimiento de Los Hitos: A. en la península ibérica, con indicación de sus unidades geológicas, B. en Europa (imagen tomada de Google Earth, fecha de las imágenes Landsat/Copernicus 1/1/2021).

metodológicas que combinan petrología, hidrogeología, geomorfología, geología estructural, sedimentología y paleohidrología, aplicadas a los restos arqueológicos, su disposición espacial y temporal, y su entorno inmediato.

El asentamiento visigodo

El yacimiento arqueológico de Los Hitos corresponde a un asentamiento rural visigodo de prestigio que se localizaba próximo a una antigua vía romana que atravesaba el puerto de Marjaliza en la sierra de Matabueyes, entre la confluencia del arroyo homónimo y el de Sierra Gorda. Además de su situación geográfica en el centro peninsular y su conectividad respecto al paso de las grandes vías que comunicaban Toledo con la provincia Bética, otros elementos que debieron determinar el emplazamiento de este complejo rural serían los recursos del entorno natural. En una época de fin del óptimo climático, la apropiación del agua sería vital, y en este sentido se ha documentado un nivel freático bajo el afloramiento kárstico del yacimiento que los propietarios del latifundio visigodo se apropiaron y beneficiaron. La presencia de los dos arroyos, un dique, pero sobre todo la documentación de un pozo en posición central en el conjunto y un sistema de canalizaciones para la gestión del agua confirmarían esta situación (Morín *et al.*, 2022).

En el estado actual del conocimiento arqueológico, el yacimiento de Los Hitos constituye uno de los escasos testimonios monumentales en la península ibérica de los complejos rurales tardoantiguos atestiguados en las fuentes escritas de la época, que frecuentemente aparecen definidos como *villulae*. Asimismo es relevante por la constatación de un modelo arquitectónico específico, edificio residen-

cial con dos alturas, vinculado con la arquitectura de poder en los siglos VI y VII. La construcción del conjunto rural debe enmarcarse en el momento de establecimiento definitivo de la corte visigoda en Toledo, que fue elevada a capital a partir del reinado de Teudis (*circ. 546*) hasta el colapso del estado visigodo a principios del siglo VIII (Barroso *et al.*, 2018). Se trata de un gran latifundio ligado a las élites de Toledo, ordenado arquitectónicamente y espacialmente dentro de un recinto en el que han sido identificados diversos espacios que cumplían funciones de carácter residencial, funerario, de almacenaje y cultural (Fig. 2).

Las primeras excavaciones sistemáticas fueron dirigidas por L. J. Balmaseda entre 1975 y 1982, poniendo al descubierto parte de una construcción de sillares de granito y mampostería (pabellón-panteón) que contenía varias sepulturas privilegiadas. Tras décadas sin que la investigación apenas avanzara en su conocimiento, desde 2014 se retomaron los trabajos arqueológicos en el yacimiento en el marco de un proyecto de investigación interdisciplinaria más amplio sobre el territorio de la *sede regia toletana* (Sánchez y Morín, 2020).

Los espacios primigenios del conjunto, *papilio* y pabellón, ligados a actividades recreativas de las élites visigodas, se emplazaron en la esquina noreste de la terraza

fluvial surgida por la confluencia de los arroyos que vertebran la red hidráulica de esta zona (Fig. 2.A-2.B). Ambos experimentaron una importante transformación a finales de la sexta centuria con la construcción de un perímetro mural torreado que abarcaría el núcleo inicial citado, así como su ampliación con nuevos edificios (Fig. 2.D). El edificio primitivo (pabellón) destinado a residencia estacional se transformó hacia finales del siglo VI para adaptarse a una función funeraria de tipo familiar y/o clientelar dado el carácter privado y restringido de este espacio y la presencia de sepulturas infantiles y adultos de ambos sexos (Sánchez *et al.*, 2024). Paralela a esta redefinición funcional y al sur del pabellón-panteón se construyó una iglesia de nave única, con cabecera rectangular exenta orientada al este, a la que se adosaron dos cámaras simétricas a modo de crucero en las fachadas norte y sur (Fig. 2.C). La iglesia también albergó enterramientos al interior de la nave y en los accesos porticados adosados a la fábrica del edificio. Por sus características arquitectónicas (dimensiones, nave única, accesos restringidos), y estructuras litúrgicas (altar, cancelles), el edificio cumpliría funciones litúrgicas y funerarias para un grupo privilegiado. Los dos *carmina* epigráficos recuperados (epitafios en verso) avalan la fundación de la iglesia y su vinculación con sepulturas de prestigio en los



Fig. 2.- Imagen oblicua del yacimiento de Los Hitos en proceso de excavación (© Proyecto Los Hitos: R. de la Vega, L. Iglesias). A, *papilio*; B, pabellón-panteón; C, iglesia; D, muralla; E, edificio con ambiente en «T» invertida; F, patio interior; G, canalizaciones.

pórticos que se destinaron a mausoleos. Todo ello apunta a que se trata de una iglesia propia o privada que sería fundada por un *potens* ligado al *fundus*.

Entre los espacios localizados en el sector septentrional y en el punto topográfico más elevado del yacimiento, sobresale un edificio en «T» con contrafuertes a los que se acceden desde su fachada norte a través de un pórtico (Fig. 2.E). El edificio en cuestión debe situarse en la segunda fase constructiva del conjunto en época visigoda, a la que también pertenece la muralla y la iglesia, y se adosaba perpendicularmente al lado occidental del pabellón-panteón. No se descarta para este tercer edificio funciones residenciales y representación (*aula?*), dada la organización de los espacios y su traza ortogonal, el cuidado en las técnicas constructivas (mampostería y revestimiento de cal) y el uso de frisos decorados con roleos trabajados en mármol local (Sánchez *et al.*, 2023).

Otras estructuras significativas son las canalizaciones que servían para desaguar las aguas pluviales acumuladas en el espacio superior del conjunto. Un tramo de canalización descendía desde un patio interior situado en la terraza superior donde se sitúa además un pozo (Fig. 2.F), y, atravesando el pórtico de la iglesia, recorre el callejón que la separaba físicamente del pabellón-panteón para salir bajo el portillo oriental al exterior del recinto (Fig. 2.G). Un segundo tramo, más corto, recoge las aguas del lado sur de la iglesia, uniéndose con el anterior en un codo al exterior del conjunto para seguir en línea recta sin llegar al arroyo de la Sierra. Estas canalizaciones, que aprovechaban la pendiente descendente de la topografía para desaguar, están construidas a hueso con mampostería de cuarcitas y granito y cuentan con una cubrición de lajas de esquisto. La necesidad de eliminar las aguas pluviales es evidente y se resuelve de manera eficaz, ya que en el callejón se localizó una rejilla de mármol con tres agujeros para impedir la entrada de residuos sólidos que atascan el sistema. Con la tercera fase de ampliación arquitectónica del conjunto estas canalizaciones quedaron bajo los niveles de ocupación de algunas unidades domésticas, las cuales también incorporaron unos drenajes para eliminar el agua de lluvia que recibían de la muralla y de los almacenes a los que se adosaban (Sánchez *et al.*, 2023).

Climatología e Hidrometeorología

Desde el punto de vista climatológico, por su situación latitudinal ($39,61^{\circ}$ N), el yacimiento arqueológico de Los Hitos se encuentra en la región Templada Boreal del planeta Tierra. Dentro de ella y por su relativa proximidad al mar Mediterráneo, el clima general podría categorizarse como Templado Mediterráneo, próximo a la subregión de clima Templado Oceánico Atlántico que predomina en noroeste de la península ibérica. Sin embargo, al ubicarse en el centro de Iberia (alejado más de 315 km de la costa más próxima, en el golfo de Valencia) y a una altitud media que roza los 800 metros sobre el nivel del mar, el clima Templado Mediterráneo está matizado por un subtipo Continental meseteño e incluso de media montaña (por las cercanas sierras Gorda y de Los Yébenes, 1.127 m s.n.m.).

Por ello, el clima particular de Los Hitos, si bien comparte características con el clima mediterráneo, como el déficit de precipitación en verano, tiene una temperatura media anual y temperaturas medias de los meses invernales sensiblemente más bajas que en zonas costeras mediterráneas, una humedad relativa menor e incluso unas precipitaciones medias anuales inferiores a la media de la península ibérica. Sirva como referente de este clima la estación meteorológica completa automática, relativamente próxima, de Toledo ciudad, que tiene una serie histórica suficientemente larga, y cuyos valores climatológicos medios de la serie más reciente (1982-2010) son (AEMET, 2025a):

T	Temperatura media mensual/anual ($^{\circ}$ C) = 15,8
TM	Media anual de las temperaturas máximas diarias ($^{\circ}$ C) = 22,1
Tm	Media anual de las temperaturas mínimas diarias ($^{\circ}$ C) = 9,5
R	Precipitación anual media (mm) = 342
H	Humedad relativa media (%) = 59
DR	Número medio anual de días de precipitación superior o igual a 1 mm = 53,8
DN	Número medio anual de días de nieve = 1,8
DT	Número medio anual de días de tormenta = 14,3
DF	Número medio anual de días de niebla = 31,8
DH	Número medio anual de días de helada = 35,5
DD	Número medio anual de días despejados = 101,5
I	Número medio anual de horas de sol = 2.922

El mes más cálido es julio ($26,8^{\circ}$ C de temperatura media), seguido de agosto ($26,3^{\circ}$ C); y el mes más frío es enero ($6,4^{\circ}$ C), seguido de diciembre ($7,1^{\circ}$ C). El mes más lluvioso es octubre (48 mm de precipitación media mensual), al que le sigue mayo (44 mm); y los meses menos lluviosos son julio (7 mm) y agosto (9 mm).

En la clasificación climática según Köppen-Geiger (Peel *et al.*, 2007), queda incluido en el grupo Csa: templado (C) de verano seco (s) y cálido (a), Mediterráneo Típico (verano cálido); la temperatura media del mes más cálido supera los 22° C; con lluvias estacionales y temperaturas cálidas en verano. Unos kilómetros hacia el este del yacimiento, en el sector oriental de la provincia de Toledo, el clima pasaría a ser del grupo BSk: seco (B) de estepa (S) y frío (k), Seco Semiárido Frío.

La meteorología de fenómenos hidrometeorológicos extremos se caracteriza por la ocurrencia de dos tipos de eventos:

- Precipitaciones intensas y breves durante tormentas asociadas a núcleos convectivos quasi-estacionarios estivales y otoñales; e incluso a coletazos de situaciones convectivas a mesoscala (tipo dana) del Levante español, como las acontecidas en septiembre de 2021 y 2023.
- Precipitaciones abundantes y prolongadas en el tiempo, asociadas a la circulación zonal O-E (o sus variantes NO-SE y SO-NE) de frentes fríos, cálidos y ocluidos de procedencia atlántica asociados a borrascas y perturbaciones de procedencia extra-tropical, en ocasiones con paso de trenes sucesivos.

Los valores hidrometeorológicos extremos en la estación meteorológica de Toledo Lorenzana (AEMET, 2025b), en la serie 1920-1982, fue una precipitación máxima diaria de 49,5 mm (9 de junio de 1957) y una precipitación máxima mensual de 165,4 mm (diciembre 1958); y en la estación actual de Toledo, serie 1982-2024, fue una precipitación máxima diaria de 90,4 mm (3 de septiembre 2023) y una precipitación máxima mensual de 151,0 mm (octubre de 2008).

No se encuentran eventos significativos históricos de precipitaciones extremas en el entorno de Los Hitos en la base de datos SINOBAS (Sistema de Notificación de Observaciones Atmosféricas Singulares) de la Agencia Estatal de Meteorología; ni efemérides hidrometeorológicas en el entorno de los Montes de Toledo registradas por la AEMET (tan solo una intensidad máxima de precipitación de 135,6 mm/h en San Pablo de los Montes, el 17 de mayo de 2011); pero no por falta de existencia histórica de fenómenos hidrometeorológicos singulares, sino de registro instrumental y documental de los mismos, como lo demuestra la existencia de registros paleohidrológicos de estos eventos extremos (Benito *et al.*, 2003).

Marco geológico

El contexto geológico regional se enmarca en la Zona Centroibérica (Julivert *et al.*, 1972) del Macizo Ibérico, caracterizada por materiales ordovícicos, discordantes sobre

los conjuntos precámbricos; a menor escala aún, el sector de los Montes de Toledo (sierra de Los Yébenes), acoge sucesiones de materiales metamórficos carbonáticos y siliciclásticos de edades Cámbrico-Ordovícico (Fig. 3).

Hacia el norte, estos conjuntos metamórficos son intruidos por rocas ígneas plutónicas de edad Carbonífero superior, que forman el batolito o plutón de Sonseca. Son rocas graníticas, de grano medio, porfidicas, con grandes cristales de feldespato, cuarzo y biotita, que destacan por su disyunción en bolos y por presentar un lajamiento por diaclasado subhorizontal. De forma aislada, al este y noreste del yacimiento, afloran unas calizas del Cámbrico inferior, en contacto con las rocas plutónicas y, por lo tanto, con un metamorfismo de contacto provocado por la intrusión de esta masa granítica. Esta orla de metamorfismo de contacto en ocasiones tiene más de 1 km (Andonaegui, 1992) y ha transformado las calizas originales en skarns o mármoles, borrando las estructuras sedimentarias originales casi en su totalidad. Las rocas calcáreas mantienen siempre un paralelismo y proximidad con las series cuarcíticas del Ordovícico inferior (Vázquez *et al.*, 1991); estas últimas forman una serie de crestas alineadas con dirección E-O, constituidas por bancos cuarcíticos, más resistentes a la erosión que los materiales pizarrosos que los engloban. Producto de la erosión y tapizando el relieve se encuentran los materiales del Plioceno y Pleistoceno, constituidos por conglomerados y gravas silíceas con encostramientos y costras calizas locales, correspondientes al piedemonte de la raña, y a los abanicos y conos aluviales, donde se asienta el yacimien-

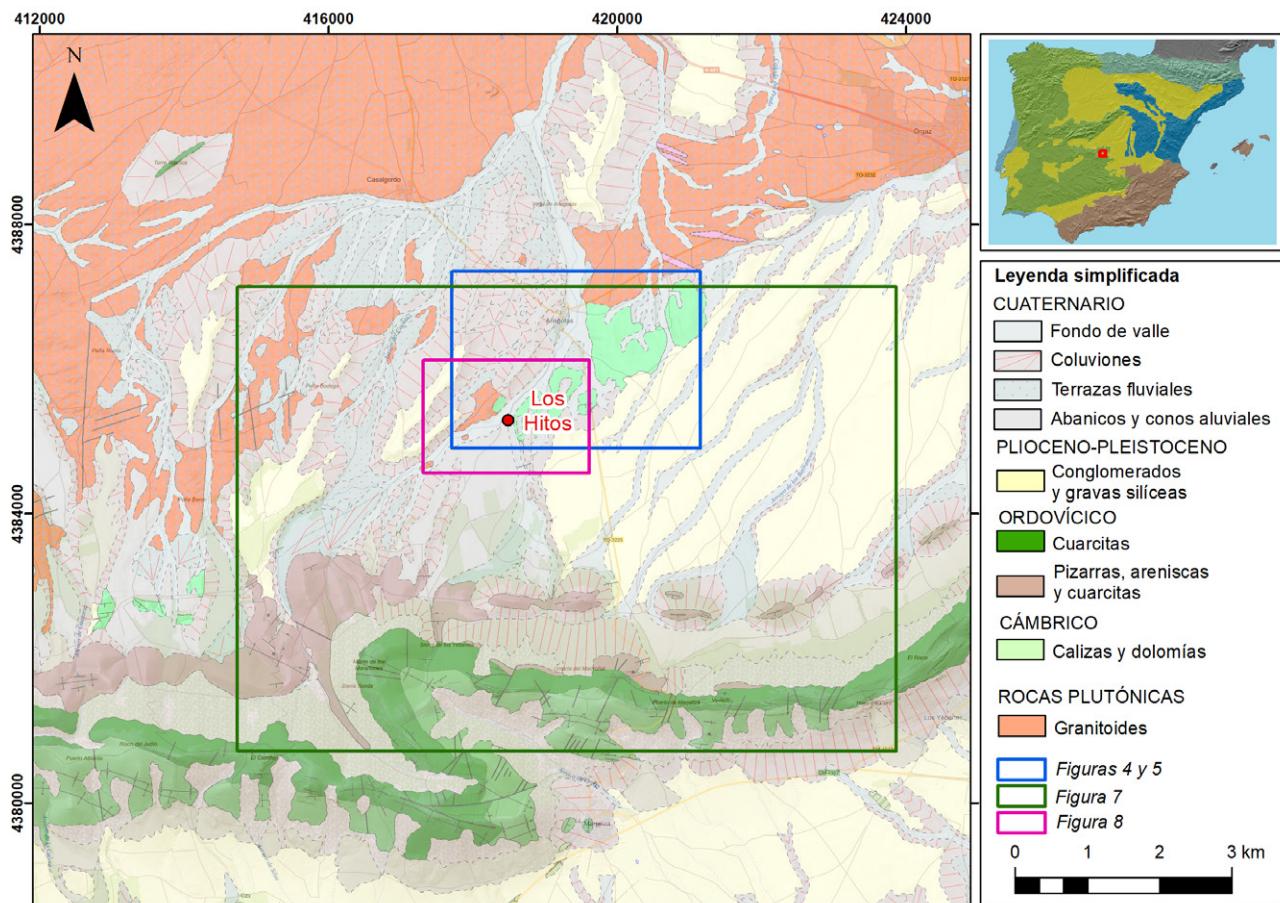


Fig. 3.- Contexto geológico del yacimiento de Los Hitos (Base geológica GEODE, Clariana García *et al.*, 2024).

to. Los materiales más modernos, de edad Holoceno, están constituidos por fangos arenosos y gravas poligénicas de los fondos de valle.

Hidrogeología

El entorno hidrogeológico de Los Hitos se enmarca en la masa de agua subterránea ES030MSBT030.026 de Sonseca, definida en el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo 2023-2027 (BOE, 2023a). Se puede determinar que las características hidrogeológicas de los materiales de la zona no son las más idóneas para definir acuíferos regionales de importancia. De tal manera que, las calizas marmóreas, cuarcitas y pizarras de la sierra de Los Yébenes, dada su propia naturaleza, están consideradas de baja permeabilidad y en cambio, a las calizas cámbicas se les asigna una permeabilidad alta por fracturación y karstificación, pudiendo dar lugar a un acuífero libre, local y aislado.

Las rocas ígneas se caracterizan por tener una porosidad y permeabilidad primaria muy bajas por lo tanto no constituyen acuíferos de importancia y por eso, a escala regional están considerados como impermeables. Pero esta permeabilidad, responsable de almacenar y transmitir el agua subterránea, aumenta al hacerlo su porosidad secundaria, bien por fracturas o bien por procesos de alteración y meteorización. En consecuencia, el *lehm* granítico, que se encuentra a cotas superficiales como producto de alteración del sustrato granítico, debe su permeabilidad a la porosidad intergranular (Sánchez Carretero *et al.*, 2009) y, por lo tanto, se le puede atribuir la condición de acuífero de interés local. El espesor de estos materiales alterados y del acuífero asociado generalmente no es muy elevado, situándose entre 1,5 y 15 m (Davis y De Wiest, 1966), aunque varía en función de la climatología, de las características de la roca madre y de los procesos que hayan actuado en la región.

Las últimas formaciones capaces de almacenar agua subterránea en la zona, son los depósitos detríticos de edad más reciente (Plioceno-Holoceno) constituidos por conglomerados, arenas, limos y arcillas, y dispuestos en abanicos aluviales, conos de deyección y mantos aluviales, ocupando las laderas, el piedemonte de las alineaciones montañosas, así como tapizando el contacto del granito y las calizas cámbicas (Fig. 3). Debido a su porosidad intergranular, estos niveles adquieren gran interés hidrogeológico en el ámbito local, dada su escasa extensión y potencia, con una permeabilidad media a alta (Camuñas *et al.*, 2024).

Pese a las condiciones hidrogeológicas poco favorables a nivel regional que imperan en la zona, a nivel local se pueden diferenciar, por el tipo de materiales, tres acuíferos (de los cuatro definidos en la masa de agua subterránea), que son el *lehm* granítico, las calizas cámbicas y el detrítico cuaternario. Todos ellos se recargan principalmente por el agua de lluvia y su descarga principal se produce hacia los cauces, junto con las extracciones. Por esta razón, existe una gran cantidad de captaciones de agua en forma de pozos, en su mayoría de gran diámetro, variable entre 1,5 y 2,5 m, que alcanzan el nivel freático a una profundidad media inferior a los 6 m. Por esta razón abundan los pozos

denominados ‘de noria’, que son pozos excavados, fácilmente reconocibles en campo al presentar dos pilares de piedra que servían para sostener el eje de la noria.

Piezometría

El reconocimiento hidrogeológico ha derivado en la realización de un inventario de puntos de agua, constituido por 34 pozos que han sido la base del estudio hidrogeológico del yacimiento de Los Hitos (Tabla 1). Consta de 11 pozos que se encuentran sobre el *lehm* granítico, otros 11 pozos que alcanzan las calizas y dolomías del Cámbrico y los 12 puntos de agua restantes, se asientan sobre los niveles cuaternarios (Fig. 4). Dependiendo del material excavado y del método constructivo de cada uno de estos pozos, en alguno de ellos es observable, desde la superficie, las litologías excavadas. Esta observación es posible debido la estabilidad tanto de los granitos como de los niveles carbonatados frente a la excavación. Ahora bien, en otras ocasiones, estos pozos se encuentran revestidos por ladrillería y mampostería para evitar el colapso de las paredes del pozo, sobre todo en los situados sobre sedimentos detríticos, menos cohesivos y de menor competencia.

Se han realizado 2 campañas de campo en las que se tomaron medidas de la profundidad del nivel de agua de cada uno de los pozos (Tabla 1), obteniéndose la cota piezométrica (m s.n.m.) en octubre de 2019 y en enero de 2025. Con estos datos, se ha elaborado un mapa de piezometría (Fig. 5) en el que se representan las líneas isopiezas, de igual cota piezométrica, en cada una de estas campañas.

Con los datos recogidos en la primera campaña de campo, se puede determinar que no se aprecia una piezometría con grandes diferencias entre los pozos que captan agua del acuífero calcáreo frente a los pozos excavados en el *lehm* granítico, lo cual parece indicar que ambos acuíferos pueden estar interconectados por el arroyo de Arisgotas. El sentido del flujo subterráneo local es suroeste-noreste, muy similar a la dirección que tiene dicho arroyo en superficie, desde el yacimiento arqueológico de Los Hitos hasta el núcleo urbano de Arisgotas. Analizando el mapa con mayor detalle, se aprecia que, en los pozos situados sobre materiales carbonatados del Cámbrico, el sentido del flujo subterráneo es suroeste-noroeste (Fig. 5), dirigiéndose hacia el contacto norte con la roca plutónica que aflora al noreste de la citada población.

La segunda campaña de campo, realizada entre finales de diciembre de 2024 y principios de enero de 2025, mantiene el sentido del flujo subterráneo y en líneas generales el nivel piezométrico ha sufrido un ascenso medio de 0,33 m con respecto a la primera campaña. Los pozos del acuífero cuaternario han ascendido entre 0,05 y 1,21 m, los que captan el acuífero Cámbrico, lo han hecho entre 0,05 y 0,87 m y, por último, los pozos excavados en granito, han ascendido entre 0,04 y 0,86 m. Este ascenso del nivel condiciona que las isopiezas de enero de 2025 se sitúen en el mapa más al norte que las isopiezas de octubre de 2019 (Fig. 5). Curiosamente, en los 5 años que separan ambas campañas de campo, los pozos que han experimentado un mayor aumento de nivel de agua son los que se sitúan en el entorno del yacimiento, y los pozos que registran un menor aumento son los que están más alejados del mismo.

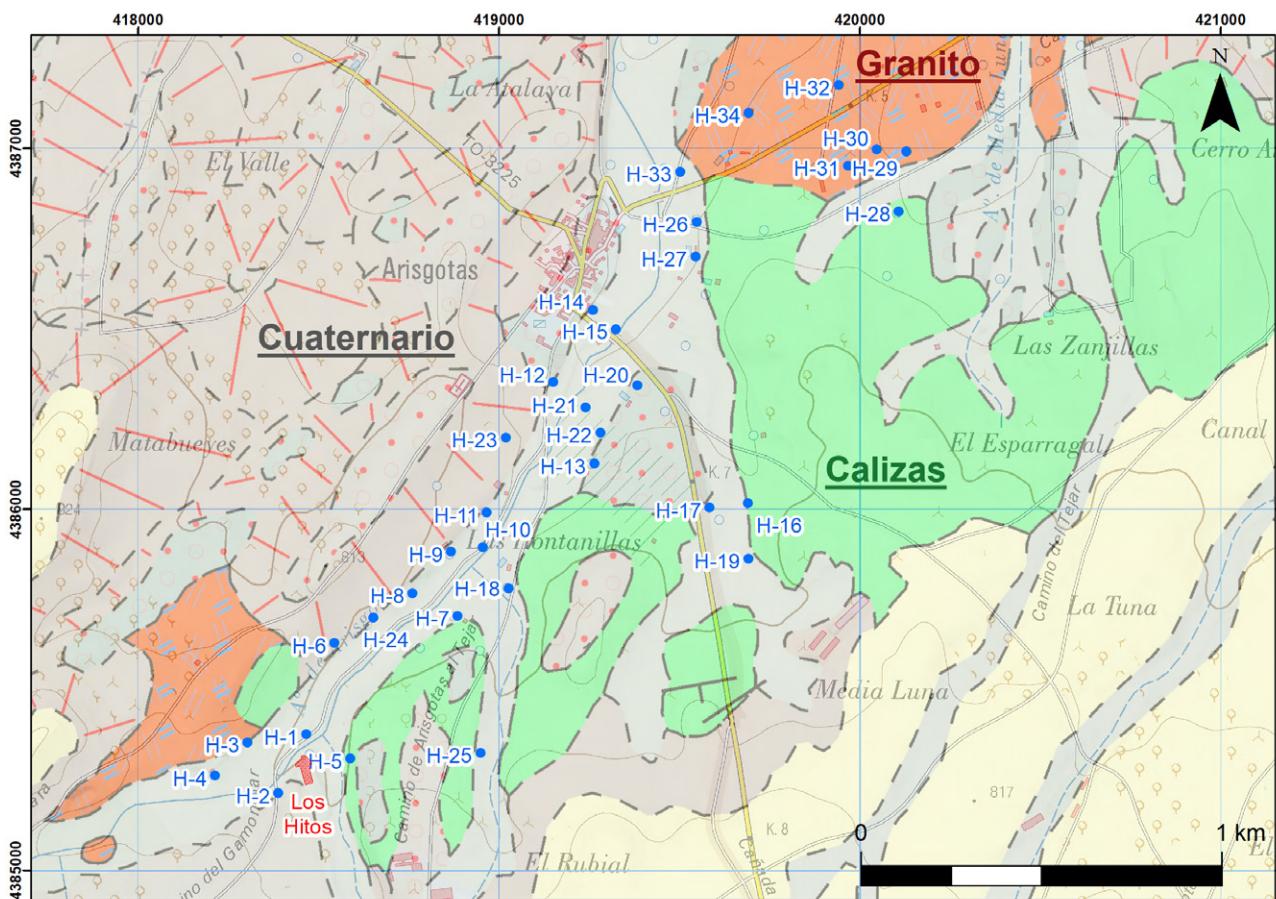


Fig. 4.- Inventario de puntos de agua en el entorno próximo al yacimiento (Base geológica GEODE, Clariana García *et al.*, 2024).

Hidroquímica

Se tomaron medidas *in situ* de la conductividad eléctrica, pH y temperatura en cada uno de los pozos del inventario (Tabla 1). Estos datos no mostraron grandes diferencias entre las aguas de los distintos acuíferos captados, lo cual implica una interconexión entre los mismos. En detalle, se pueden diferenciar valores ligeramente inferiores en el agua almacenada en las calizas cámbicas frente a los datos recogidos en los pozos excavados en el sustrato granítico. Espacialmente, los datos recogidos de conductividad y pH son menores en los puntos cercanos al yacimiento y van aumentando progresivamente en los pozos más alejados al mismo.

Con respecto a los pozos que captan el acuífero del *lehm* granítico, los valores de conductividad eléctrica varían entre 620 y 1.403 µS/cm, con un valor medio de 1.050 µS/cm. Si tenemos en cuenta su ubicación, los pozos más cercanos al yacimiento proporcionaron un valor medio igual a 830 µS/cm, variable entre 620 y 946 µS/cm; en cambio, los puntos más alejados al yacimiento, situados al noreste de la población de Arisgotas, el valor de conductividad eléctrica registra un espectro entre 1.063 y 1.403 µS/cm, con un valor medio de 1.270 µS/cm. Si se analizan los valores de conductividad eléctrica registrados en los pozos que captan el acuífero carbonatado se observa que siguen un patrón similar a los anteriores. Concretamente, este parámetro varía de 725 a 1.163 µS/cm, con una media de 924 µS/cm. Los pozos

más cercanos al yacimiento registran valores entre 725 y 803 µS/cm, con un valor medio de 772 µS/cm; en cambio, los más alejados a los Hitos, facilitan unos valores entre 911 y 1.163 µS/cm, siendo 1.076 µS/cm el valor medio de los mismos. Por último, de los 12 puntos que captan el acuífero detrítico Cuaternario, la horquilla de variación es de 615 a 975 µS/cm, con un valor medio de 784 µS/cm.

De la misma manera, los valores de pH en el agua de los pozos situados sobre el granito varían de 7,93 a 8,45, con un valor medio de 8,18, siendo ligeramente inferior en los pozos cercanos al asentamiento, entre 7,93 y 8,37 (valor medio de 8,09) frente a los pozos más alejados, cuyo espectro varía entre 8,14 y 8,45 (8,26 de valor medio). Los datos que aporta este parámetro en los pozos excavados sobre las calizas y dolomías varía de 7,72 a 8,73, con un valor medio de 8,02. Y, de la misma manera, los más cercanos al yacimiento facilitan unos valores entre 7,72 y 8,22 (7,96 de media) y los más alejados quedan entre 7,82 y 8,73, con un valor medio de 8,07. Por último, el pH tomado en el agua de los pozos sobre aluviales cuaternarios se sitúa entre 7,81 y 8,31, lo que facilita un valor medio de 8,02.

La investigación hidrogeológica en el ámbito de estudio concluye con el análisis hidroquímico. Para ello se recogieron dos muestras representativas de pozos que geográficamente se encuentran en el entorno cercano al yacimiento arqueológico de Los Hitos y se corresponden con los acuíferos locales detectados; la primera de ellas tomada

Nombre	Litología	X	Y	Z	Fecha	Prof. agua (m)	Piezometría	CE µS/cm	pH	T°
H-1	Cuaternario	418.466	4.385.376	793,81	17/10/2019	4,59	789,22	659	8,07	16,1
					27/12/2024	3,38	790,43			
H-2	Plio-Cuaternario	418.389	4.385.213	797,53	17/10/2019	5,02	792,51	657	7,96	15,8
					27/12/2024	4,40	793,13			
H-3	Granito	418.304	4.385.354	797,88	17/10/2019	7,45	790,43	811	8,37	14,7
					27/12/2024	6,59	791,29			
H-4	Granito	418.213	4.385.262	799,59	17/10/2019	4,55	795,04	946	8,05	16,4
					27/12/2024		Vallado			
H-5	Cámbrico Calizas beige	418.588	4.385.309	796,76	17/10/2019	6,65	790,11	725	7,95	17,0
					27/12/2024	5,78	790,98			
H-6	Cuaternario	418.544	4.385.629	794,21	17/10/2019	9,40	784,81	801	8,14	15,7
					27/12/2024		Vallado			
H-7	Cámbrico Calizas beige	418.886	4.385.704	789,86	17/10/2019	5,30	784,56	788	7,72	16,1
					27/12/2024		Cerrado (particular)			
H-8	Granito	418.761	4.385.767	790,41	17/10/2019	5,95	784,46	923	8,08	15,4
					27/12/2024		Tapado			
H-9	Granito	418.867	4.385.882	788,33	17/10/2019	6,56	781,77	851	8,03	15,6
					27/12/2024	6,37	781,96			
H-10	Cuaternario Aluvial	418.955	4.385.894	786,54	17/10/2019	4,02	782,52	740	8,31	15,4
					27/12/2024	3,67	782,87			
H-11	Cuaternario	418.967	4.385.990	785,47	17/10/2019	4,20	781,27	837	7,82	16,7
					27/12/2024	3,89	781,58			
H-12	Cuaternario	419.151	4.386.352	783,23	17/10/2019	5,37	777,86	615	8,08	15,9
					27/12/2024	5,32	777,91			
H-13	Cuaternario	419.265	4.386.126	783,74	17/10/2019	5,17	778,57	937	7,89	16,5
					03/01/2025	4,84	778,90			
H-14	Cuaternario Aluvial	419.260	4.386.552	779,14	17/10/2019	4,05	775,09	711	8,18	16,6
					03/01/2025	3,99	775,15			
H-15	Cuaternario Aluvial	419.325	4.386.498	777,55	17/10/2019	2,68	774,87	975	7,91	17,5
					27/12/2024	2,61	774,94			
H-16	Cámbrico Calizas	419.690	4.386.017	789,66	17/10/2019	5,66	784,00	1.053	8,26	15,3
					03/01/2025	5,59	784,07			
H-17	Cámbrico. Dolomias grises	419.584	4.386.004	791,12	17/10/2019	7,75	783,37	1.091	8,73	14,7
					03/01/2025	7,70	783,42			
H-18	Cámbrico. Dolomias grises	419.027	4.385.781	788,43	17/10/2019	4,65	783,78	803	8,22	14,9
					03/01/2025	4,41	784,02			
H-19	Cámbrico. Dolomias grises	419.691	4.385.863	791,19	18/10/2019	8,00	783,19	1.103	7,91	15,8
					03/01/2025	7,29	783,90			
H-20	Cámbrico. Dolomias grises	419.384	4.386.343	781,43	18/10/2019	3,51	777,92	911	7,85	16,5
					03/01/2025	3,45	777,98			
H-21	Cuaternario Aluvial	419.241	4.386.282	781,09	18/10/2019	2,66	778,43	821	7,81	17,4
					03/01/2025	2,55	778,54			
H-22	Cuaternario	419.282	4.386.212	782,20	18/10/2019	3,84	778,36	833	8,06	16,2
					03/01/2025	3,79	778,41			
H-23	Granito	419.019	4.386.198	787,74	18/10/2019	8,15	779,59	620	7,93	16,0
					03/01/2025	7,98	779,76			
H-24	Cuaternario	418.653	4.385.700	791,77	18/10/2019	7,65	784,12	820	8,01	16,5
					27/12/2024	7,25	784,52			
H-25	Cámbrico Calizas beige	418.949	4.385.325	801,54	18/10/2019	13,20	788,34	-	-	-
					03/01/2025	12,88	788,66			
H-26	Cámbrico	419.548	4.386.795	776,96	18/10/2019	5,10	771,86	1.163	7,96	16,6
					03/01/2025	5,02	771,94			
H-27	Cámbrico	419.545	4.386.700	778,63	18/10/2019	5,60	773,03	1.047	7,82	16,1
					03/01/2025	5,38	773,25			
H-28	Granito	420.108	4.386.825	782,03	18/10/2019	8,34	773,69	1.063	8,14	16,8
					03/01/2025	8,30	773,73			
H-29	Granito	420.129	4.386.990	780,48	18/10/2019	7,65	772,83	2.580	8,34	16,6
					03/01/2025	7,60	772,88			
H-30	Granito	420.047	4.386.997	781,42	18/10/2019	9,00	772,42	1.403	8,27	16,5
					03/01/2025		Vallado			
H-31	Granito	419.967	4.386.951	783,43	18/10/2019	10,70	772,73	1.277	8,14	17,0
					03/01/2025	10,22	773,21			
H-32	Granito	419.941	4.387.174	781,69	18/10/2019	11,61	770,08	1.307	8,21	20,3
					03/01/2025	11,31	770,38			
H-33	Cámbrico	419.502	4.386.934	773,44	18/10/2019	2,90	770,54	1.163	7,98	18,6
					03/01/2025	2,61	770,83			
H-34	Granito	419.692	4.387.097	777,94	18/10/2019	6,46	771,48	1.300	8,45	17,2
					03/01/2025	6,10	771,84			

Tabla 1.- Inventario de puntos de agua.

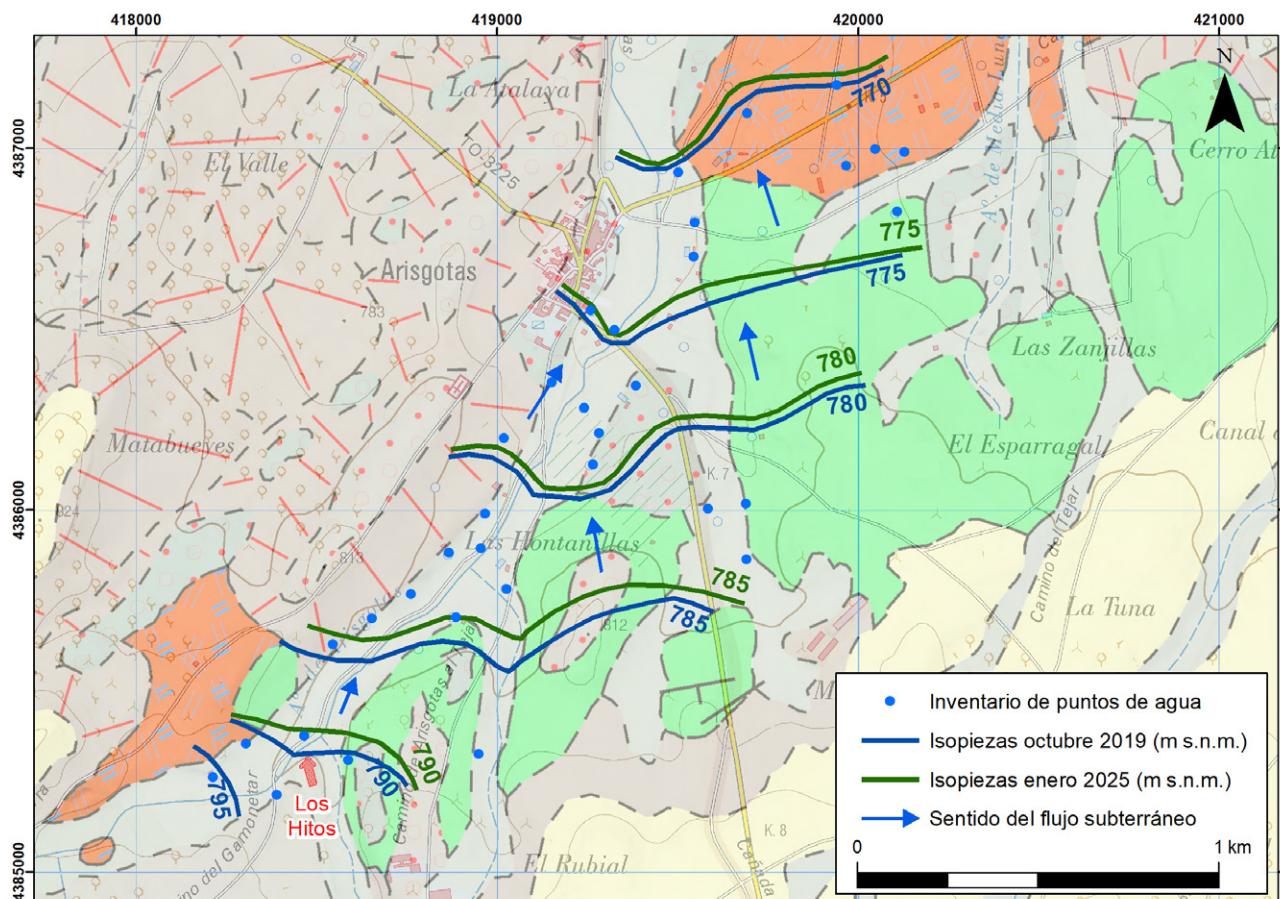


Fig. 5.- Mapa de piezometría de octubre de 2019 y de enero de 2025 (Base geológica GODE, Clariana García *et al.*, 2024).

en un pozo excavado sobre materiales graníticos y la segunda, en un pozo situado sobre sedimentos carbonatados.

Los análisis químicos en laboratorio de los elementos mayoritarios de ambas muestras (Tabla 2) nos indican que tanto la muestra de agua granítica como la muestra del acuífero calizo, presentan una facies bicarbonatada cálcica (Fig. 6). En un diagrama Piper-Hill-Langelier se aprecia la semejanza entre las aguas del acuífero granítico y las aguas del acuífero calizo, lo cual es indicativo de la interconexión entre ambos acuíferos (Fig. 6).

Los resultados de la conductividad obtenida en laboratorio en ambas muestras no aportan valores excesivamente elevados, lo que indica cierto contenido en sales en estas

aguas, con un valor de 808 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la muestra granítica y algo menor, 713 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en la muestra del acuífero calizo. Con respecto al pH obtenido en laboratorio, ambas muestras son ligeramente básicas, con valores de 7,67 y 7,46 respectivamente. Por tanto, a la vista de estos datos el agua del acuífero granítico es dura con una salinidad media y la correspondiente a las calizas del Cámbrico es moderadamente dura y poco salina. Por último, los parámetros analizados y teniendo en cuenta el Real Decreto 2/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE, 2023b), ambas muestras cumplen con dicha normativa y son aptas para su consumo.

Nombre	Litología	Elementos mayoritarios (mg/L)												
		Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	CO ₃	NO ₃	NO ₂	NH ₄	PO ₄	SiO ₂
H-3	Granito	69	2	106	17	98	52	276	0	58	0	0	0,39	35,5
H-5	Calizas cámbicas	57	1	88	16	65	45	263	0	48	0	0	0,13	34,5
Parámetros físico-químicos														
Nombre	Litología	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Oxidabilidad (mg/L)	mg/L	Dureza	TDS	Salinidad			Facies hidroquímica			
H-3	Granito	808	7,67	1,0	334,6	Dura	713,5	Media			Bicarbonatada cálcica			
H-5	Calizas cámbicas	713	7,46	0,9	285,6	Moderadamente dura	617,5	Poco salina			Bicarbonatada cálcica			

Tabla 2.- Resultados de los análisis químicos químicos.

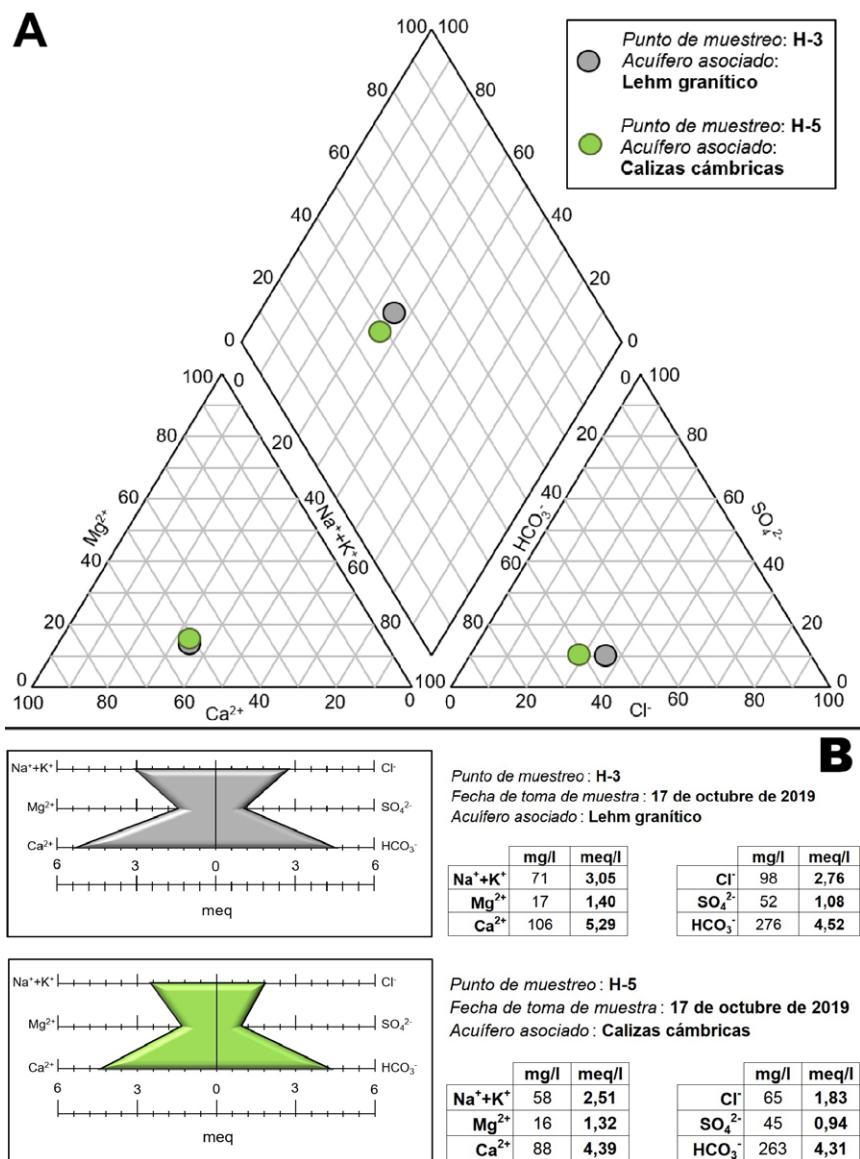


Fig. 6.- A. Diagrama de Piper-Hill-Langelier. B. diagramas de Stiff de las muestras analizadas.

Procesos fluviales activos y riesgo por inundaciones

Desde el punto de vista hidrológico, el yacimiento de Los Hitos se ubica en el centro-meridional de la península ibérica, en la gran cuenca hidrográfica atlántica del río Tajo; y, más concretamente, en la subcuenca de su afluente por la margen izquierda, el arroyo de Valdecaba o de Mochares, que en su cabecera surge de la confluencia de los arroyos Ablates y Guazalete. Dentro de la cuenca de este último arroyo, en detalle, la parte principal del yacimiento se ubica en el interfluvio próximo a la confluencia de los arroyos de Arisgotas (o de la Solanilla) y Sierra Gorda, que nacen en la vertiente septentrional de la sierra Gorda y Umbría del Madronal (sierra de Los Yébenes, Montes de Toledo; Fig. 7).

El régimen hidrológico de estos arroyos es fundamentalmente pluvial, puesto que con una media de apenas dos o tres días de nieve al año, los caudales nivales o nivo-pluviales son escasos; y el caudal base proveniente

de los acuíferos y manantiales de la cuenca es escaso y estacional. Presentan enormes fluctuaciones anuales de caudales entre años húmedos y lluviosos (como el reciente 2020) y ciclos secos (como el reciente entre 2017 y 2019); y variabilidad intraanual, con meses de crecida y avenida (normalmente en invierno y primavera) y otros de estiaje (habitualmente desde julio a octubre). Los caudales superiores se registran tanto en avenidas súbitas y breves, por tormentas o danas estivales y otoñales (septiembre de 2021 y 2023); como en crecidas lentas y prolongadas durante días, por precipitaciones de frentes y borrascas atlánticas. Es el caso de los eventos de crecida acontecidos recientemente en abril de 2020, enero de 2021 o marzo de 2024, que produjeron el desbordamiento de los cauces (canales estrechos incididos unos metros en la llanura aluvial holocena, ocupando los sectores más bajos de los glaciares erosivos en los antiguos abanicados de piedemonte pliocenos y pleistocenos; Fig. 8) e inundaciones de la totalidad del fondo de las vaguadas y terrenos aledaños, incluyendo caminos y veredas (Fig. 9).

No existe un registro documental extenso de estas inundaciones históricas por falta de fuentes documentales próximas a estas comarcas, aunque sí con carácter regional en la cuenca del Tajo (Benito *et al.*, 2003) o para la cercana ciudad de Toledo (Díez-Herrero *et al.*, 2013). Las estimaciones de caudales punta calculadas por métodos hidrometeorológicos de transformación lluvia-escorrentía (Jiménez Álvarez *et al.*, 2013), ofrecen para la cuenca del arroyo Guazalete aguas abajo de Los Hitos, unos caudales punta de 5,3, 9 y 16 m³/s, para períodos de retorno de 25, 100 y 500 años, respectivamente.

Por lo tanto, para reconstruir la posible interferencia entre las inundaciones históricas y los asentamientos humanos en Los Hitos, sólo cabe recurrir a las técnicas paleohidrológicas (Benito y Díez-Herrero, 2015), que utilizan como fuentes de información los registros geológico-sedimentológico (depósitos y marcas de paleoinundaciones) y botánico (dendrogeomorfología y liquenometría). No existe registro de paleoinundaciones publicado en esta cuenca y subcuenca en la base de datos georreferenciada Paleo-Riada (Sandoval *et al.*, 2023). Ante la ausencia de vegetación arbórea en las márgenes de los arroyos con edades que superan el siglo de antigüedad y la imposibilidad de usar

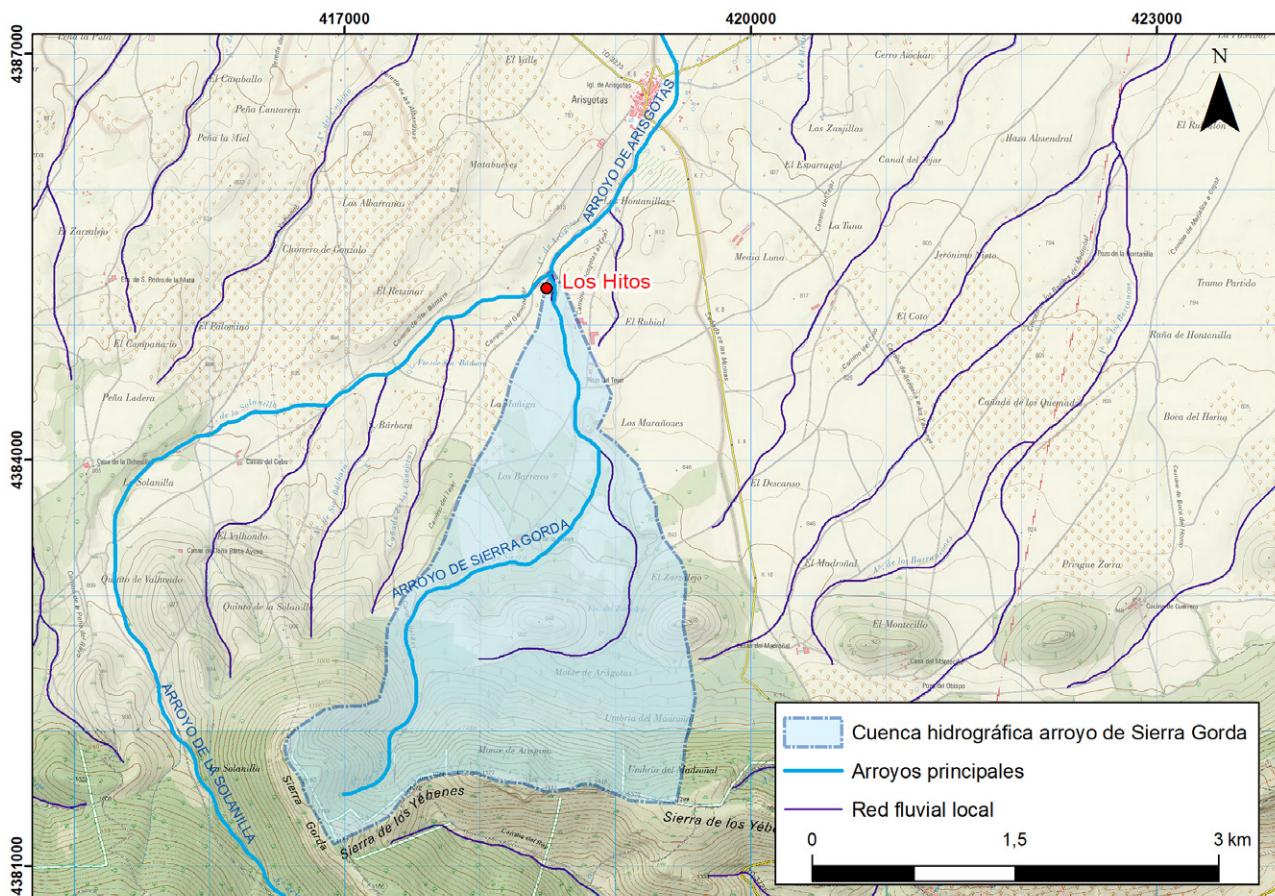


Fig. 7.- Mapa topográfico con los dos arroyos principales de las inmediaciones del yacimiento, el arroyo de la Solanilla o de Arisgotas y el arroyo de Sierra Gorda, y cuenca hidrográfica de este último hasta Los Hitos (Base topográfica IGN).

la liquenometría por la inexistencia de superficies rocosas con líquenes expuestas a las avenidas torrenciales, se han empleado métodos paleohidrológicos sobre el registro geológico-sedimentológico.

La presencia en el sector meridional del yacimiento de Los Hitos de una estructura, aparentemente artificial, en la margen izquierda del arroyo de Sierra Gorda (Fig. 10), con forma semilunar en planta (Figs. 11-12), ha permitido hipotetizar que se trataba de un dique o mota que evitase el desbordamiento del arroyo hacia la orilla izquierda, y con ello evitar la inundación del sector suroriental del asentamiento de Los Hitos.

Al objeto de intentar corroborar o refutar esta hipótesis de trabajo, se diseñó y realizó una calicata en el subsuelo del flanco interno del dique artificial, para caracterizar la secuencia sedimentaria del relleno y estudiar posibles depósitos de paleoinundaciones que fueran previos o posteriores a la construcción del dique, y así determinar su posible finalidad y eficacia.

La columna estratigráfica levantada en el perfil SE de la calicata (Fig. 13), la más completa y representativa de la zanja, presenta un desarrollo de 2,25 m de espesor, con 4 niveles litológicos diferenciados: 1, sustrato monzogranítico con alteración caolinítica en fisuras; 2, *lehm* granítico meteorizado con estructuras verticalizadas; 3, conglomerado granosostenido con imbricaciones de cantos de origen aluvial; 4, conglomerado matriz-sostenido de origen

antrópico (flanco del dique) y dos tongadas de diferente composición granulométrica.

Como se puede apreciar, aparentemente no existen depósitos característicos de eventos de paleoinundaciones intercalados en la secuencia, lo que puede ser indicativo de que el dique se ha mostrado eficaz ante los desbordamientos; o bien que existieron inundaciones, pero sus restos han sido erosionados por posteriores eventos o por la acción antrópica (retirada del tarquín).

Seguimiento arqueosismológico

Aunque la zona donde se ubican Los Hitos no es un área donde haya una sismicidad instrumental importante y donde no hay sismicidad histórica, se ha realizado un seguimiento arqueosismológico durante el proceso de excavación del yacimiento, que es cuando hay más información arqueosismológica disponible y cuando existe el riesgo de que pueda ser “destruida”, por lo que es importante realizar el seguimiento arqueosismológico durante el proceso de excavación arqueológica. Este seguimiento siempre mejora la calidad de la observación y los datos tomados, en coordinación con la arqueología.

La metodología empleada se basa en una identificación de efectos arqueosismológicos de terremotos (EAEs, de su acrónimo en inglés: *Earthquake Archaeological Effects*) que se clasifican y posteriormente se analizan mediante

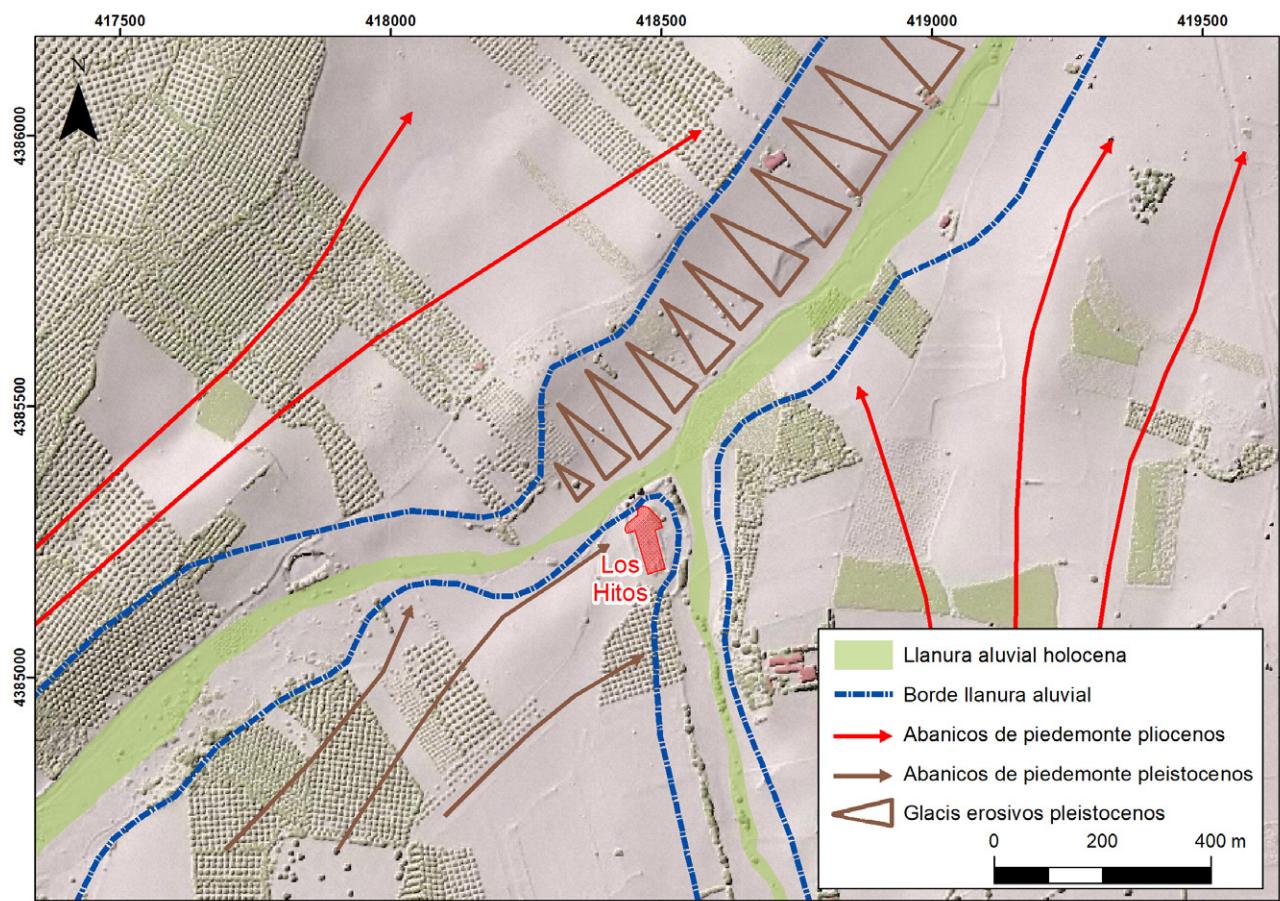


Fig. 8.- Contexto geomorfológico simplificado del yacimiento de Los Hitos sobre un modelo digital de elevaciones sombreado, obtenido a partir de imágenes LiDAR (Base de la imagen: PNOA; IGN).



Fig. 9.- Confluencia de los arroyos de la Sierra Gorda (izquierda) y de la Solanilla o Arisgotas (derecha) en las inmediaciones del yacimiento de Los Hitos (en el interflujo del centro de la foto). Fotografía tomada el 29 de marzo de 2024 durante un evento de crecida por una perturbación atlántica que produjo lluvias intensas y persistentes, inundando el camino de acceso al yacimiento y las fincas colindantes.

técnicas de análisis estructural geológico para poder discriminar si la ruina se produjo por terremoto u otras causas (Rodríguez-Pascua *et al.*, 2011; Giner-Robles *et al.*, 2018).

En Los Hitos los principales EAEs esperables son los

que afectan a las construcciones, pero hasta la fecha no se ha podido identificar ningún EAE que nos pueda llevar a pensar en una ruina y abandono de origen sísmico. Es importante indicar la inexistencia de este tipo de evidencias para que en futuras excavaciones, si son realizadas por otros grupos, sepan que no se han encontrado EAEs en excavaciones pasadas y por tanto no se destruyeron, simplemente es que no se observaron.

Discusión y conclusiones

Las excavaciones arqueológicas han revelado la existencia de un pozo para la extracción de agua subterránea en el yacimiento de Los Hitos (revestido en su interior por bloques de granito rudamente tallados), lo que indicaría que el agua superficial no era suficiente para abastecer al conjunto de la población en alguna de sus etapas históricas. Este hecho implica el conocimiento que existía para la captación de agua subterránea y, por lo tanto, aumenta la probabilidad de que los habitantes se abastecieran de estas aguas, al encontrarse a una profundidad asequible de ser captada mediante los medios técnicos de la época. El yacimiento se encuentra sobre abanicos de piedemonte cuaternarios, constituidos por niveles detríticos, conglomerados y gravas, que tapizan el contacto entre el granito y las calizas del Cámbrico, pero se desconoce con seguridad cuál es la formación acuífera captada con el pozo. Cuando se reali-

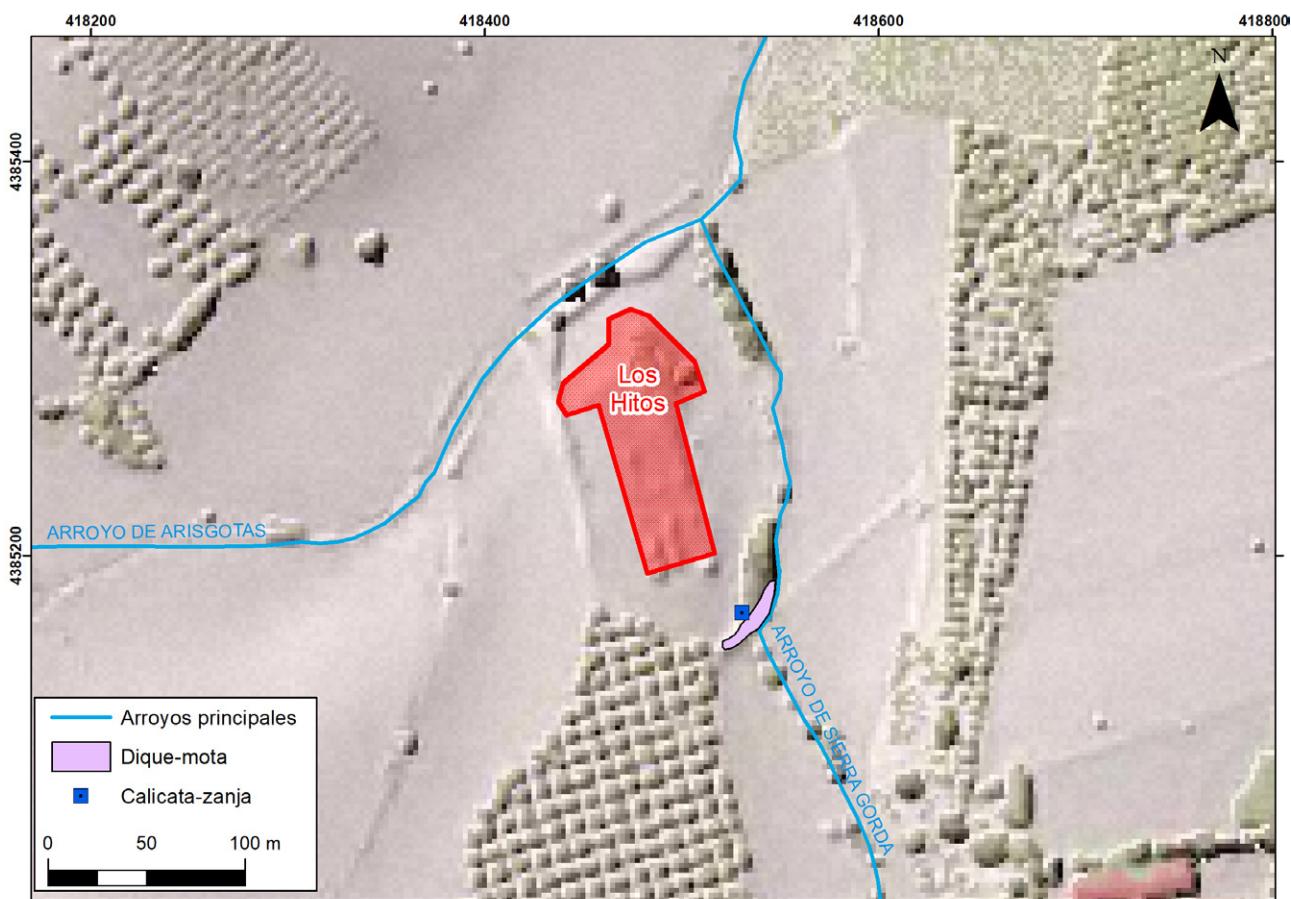


Fig. 10.- Disposición del dique-mota y la calicata-zanja en la margen izquierda del arroyo de Sierra Gorda, sector suroriental del yacimiento de Los Hitos.



Fig. 11.- Vista aérea oblicua del supuesto dique-mota en la margen izquierda del arroyo de Sierra Gorda, visto desde el sector sudeste del yacimiento de Los Hitos.

ce la próxima excavación arqueológica del pozo se aclarará la litología en que fue excavado para la captación del agua subterránea y, por tanto, el acuífero alcanzado, que puede ser de notable interés para su interpretación arqueológica, estableciendo hipótesis que puedan explicar la ubicación y desarrollo histórico del asentamiento en distintas etapas climáticas pretéritas (Periodo Cálido Medieval, Pequeña Edad de Hielo).

Son numerosos los factores que influyen en la elección de la ubicación de un asentamiento (Willey y Phillips, 1958; Clarke, 1968; Dartnell, 2019) como Los Hitos, siendo uno de ellos la facilidad de extracción de agua subterrá-

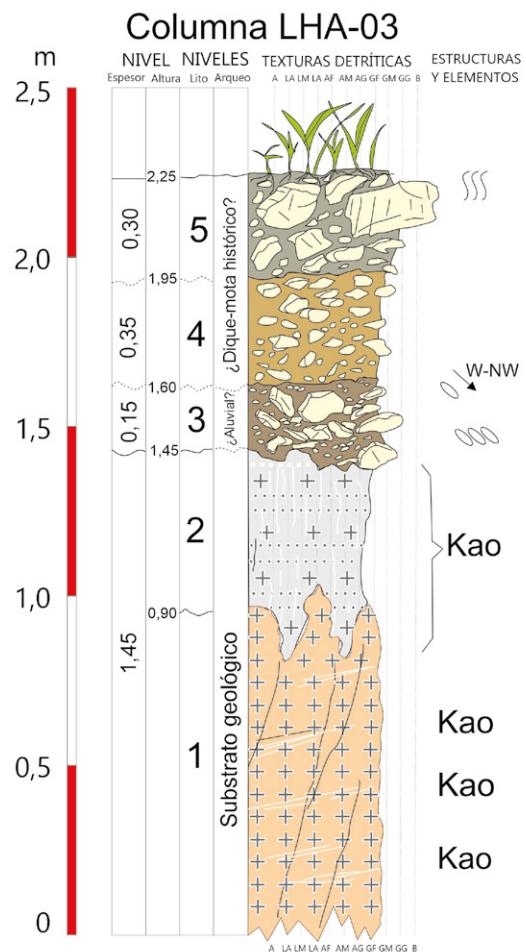


Fig. 12.- Aspecto en campo del supuesto dique-mota visto desde el sur, a orillas del arroyo de Sierra Gorda.

nea en el entorno para el abastecimiento de sus pobladores en cada una de sus etapas. Pero hasta la fecha, no se han encontrado evidencias arqueológicas que indiquen el suministro de agua superficial, tanto de los arroyos que arropan al yacimiento, como desde zonas más alejadas a estos arroyos, como son las cabeceras en las sierras.

El agua es un elemento indispensable para el desarrollo de cualquier civilización (Argudo García, 2019). Por tanto, la búsqueda de agua, superficial o subterránea, en cantidad y calidad suficientes para su aprovechamiento, es uno de los principales factores a resolver a la hora de decidir la

Zanja profunda tras dique-mota Perfil SE (dirección N 32° E)



LEYENDA

Kao Enriquecimiento argílico en kaolinita

+++ Granitoides



Bioturbación

Clastos imbricados



Punto cardinal de inclinación de los clastos

Fig. 13.- Perfil SE de la calicata o zanja profunda del interior hacia el yacimiento; y columna estratigráfica simplificada LHA-03, con la disposición de los niveles litológicos y arqueológicos interpretados.

ubicación de un hábitat. Los primeros pasos conducen en la localización de agua superficial, siguiendo los cursos de los ríos y arroyos en busca del mejor emplazamiento para su evolución social y económica. El yacimiento de Los Hitos reúne esta característica, al encontrarse en una confluencia de dos de estos cursos de agua, los arroyos de Arisgotos y Sierra Gorda, que nacen en la vertiente septentrional de la sierra Gorda y Umbría del Madronal.

Por otro lado, los métodos paleohidrológicos y arqueosismológicos aplicados hasta el momento al yacimiento de Los Hitos no han podido corroborar la existencia de inundaciones ni terremotos históricos que hayan afectado a este asentamiento (Díez Herrero *et al.*, 2016). Sin embargo, la propia inexistencia de estas evidencias ya es un dato de interés arqueológico, al no poder atribuir a catástrofes naturales el abandono de los niveles de ocupación ni las tipologías constructivas; salvo el propio dique-mota, que sí que podría haber sido eficaz en la contención histórica

de las riadas

La aportación de todo este conjunto de datos hidrogeológicos, paleohidrológicos y arqueosismológicos ayuda a la interpretación arqueológica de los yacimientos, ya que pueden apoyar ciertas hipótesis en detrimento de otras, como ya se ha hecho en otros yacimientos arqueológicos (Diez Herrero *et al.*, 2024). Además, todos estos datos aportan un valor añadido al conocimiento del yacimiento y a su divulgación.

Agradecimientos

Los autores agradecen al equipo del yacimiento de Los Hitos, en especial al Dr. Jorge Morín de Pablos, director del proyecto de investigación, por las facilidades otorgadas para la realización de este estudio. Igualmente agradecen a los dos revisores anónimos, al editor invitado del número monográfico y a la editora principal de la revista, sus co-

mentarios y sugerencias, que, sin duda, han enriquecido y mejorado este artículo.

Contribución de autores/as

Arqueología, I. Sánchez; climatología, recursos fluviales y riesgo por inundaciones, A. Díez-Herrero; geología y evidencias arqueosismológicas, M.A. Perucha y M.A. Rodríguez-Pascua, hidrogeología, C. Camuñas; figuras, A. Díez-Herrero y C. Camuñas; revisión del manuscrito, M.A. Perucha, M.A. Rodríguez-Pascua; I. Sánchez, A. Díez-Herrero y C. Camuñas; coordinación y supervisión, C. Camuñas.

Referencias

- AEMET. 2025a. Valores climatológicos de Toledo (11/01/2025). <https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=3260B&k=clm>
- AEMET. 2025b. Valores extremos de la estación meteorológica de Toledo Lorenzana (11/01/2025). https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/efemerides_extremos?w=0&k=clm&l=3259&datos=det
- Andonaegui, P., 1992. Geoquímica y geocronología de los granitoides del sur de Toledo. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 365 p.
- Argudo García, J.J. 2019. La gestión del agua en distintas civilizaciones: de Grecia a la actualidad. Energía & Minas, 15, 60-75.
- Barroso, R., Carrobles J., Morín, J., Sánchez, I., 2018. Toletum. Configuración y evolución urbana de la capital visigoda y su territorio. En: Territorio, topografía y arquitectura de poder durante la Antigüedad Tardía, Mytra 1, (I. Sánchez, P. Mateos, Eds.). IAM, Mérida, 195-236. http://www.iam.csic.es/ficheros/archivos/2018_11/00-primeras.pdf
- Benito, G., Díez-Herrero, A., Fernández de Villalta, M., 2003. Magnitude and Frequency of Flooding in the Tagus Basin (Central Spain) over the Last Millennium. Climatic Change, 58 (1-2): 171-192. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000043334.30365.e0>
- Benito, G., Díez-Herrero, A., 2015. Palaeoflood Hydrology: Reconstructing Rare Events and Extreme Flood Discharges. En: Hydro-Meteorological Hazards, Risks and Disasters (P. Paron, G. Di Baldassarre, Eds.). Elsevier, Amsterdam (Netherlands), 65-104. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394846-5.00003-5>
- BOE, 2023a. Real Decreto 35/2023, de 24 de enero, por el que se aprueba la revisión de los planes hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro. BOE-A-2023-3511. 1806 p. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2023-3511>
- BOE, 2023b. Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro. BOE-A-2023-628. 102 p. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2023-628>
- Camuñas, C., Perucha, M.A., Rodríguez-Pascua, M.A., Sánchez, I., Díez-Herrero, A., 2024. La geología como elemento condicionante e integrador en un yacimiento arqueológico visigodo: Los Hitos (Arisgotas, Toledo, España). XI Congreso Geológico de España, GeoTemas, volumen 20: 426-429. https://sgc.usal.es/archivos/GEO_TEMAS/Geo_temas20.pdf
- Clariana García, M.P., Rubio Pascual, F., Montes Santiago, M.J., González Clavijo, E.J.: Mapa Geológico Digital continuo de España. Zona 1400. Centroibérica, Dominio esquistograuváquico y Cuenca del Guadiana. GEODE. [Consulta 12/2024]. <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/geodezona.aspx?Id=Z1400&language=es>
- Clarke, D.L. 1968. Arqueología Analítica. Edición póstuma (1984), revisada por Bob Chapman. Ediciones Bellaterra, S.A., Barcelona, 470 p.
- Dartnell, L. 2019. Orígenes: cómo la historia de la Tierra determina la historia de la humanidad. Ed. Debate, 400 p.
- Davis, S.N., De Wiest, R.J.M., 1966. Hidrogeology. Traducción al castellano en 1971. Ed. Ariel, Barcelona, 563 p.
- Díez-Herrero, A., Benito, G., Bodoque, J.M., Haddad, B., 2013. Las inundaciones históricas del Tajo en Toledo. En: El río Tajo, lecciones del pasado para un futuro mejor (B. Larraz, A. Cano, coord.). Editorial Ledoria, Las Ventas con Peña Aguilera (Toledo), 185-233.
- Díez-Herrero, A., Tanarro, L.M., Alonso-Álvarez, D., De Andrés-Herrero, M., Rojo Hernández, J. 2016. Condicionantes del medio físico en el poblamiento paleolítico entre los ríos Eresma y Riaza (Segovia). En: Martínez Caballero, S., Cabañero Martín, V.M., Merino Bellido, C. (Eds.), Arqueología en el Valle del Duero. Investigaciones arqueológicas en el Valle del Duero: del Paleolítico a la Edad Media. Editorial Gglyphos Publicaciones, Valladolid, 17-33.
- Díez-Herrero, A., Mateos, R.M., Vázquez-Tarrio, D., López-Marcos, A., Brao-González, F.J. 2024. One catastrophic flood every millennium: Synchronicity of extreme floods and global warm periods in the multi-archive record of the Roman theatre of Guadix (Granada, SE Spain). Global and Planetary Change, 233, 104363, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2024.104363>
- Giner-Robles, J.L., Rodríguez-Pascua, M.A., Silva, P.G., Pérez-López, R., 2018. Efectos sísmicos en yacimientos arqueológicos: catalogación y cuantificación arqueosismológica. Boletín Geológico y Minero, 129 (1/2): 451-467. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.129.1.018>
- Jiménez Álvarez, A., García Montañes, C., Mediero Orduña, L., Incio Caballero, L., Garrote Revilla, J. 2013. Bases metodológicas del mapa de caudales máximos de las cuencas intercomunitarias. Ed. Centro de Publicaciones, Ministerio de Fomento, Madrid, 98 p.
- Julivert, M., Fontboté, J.M., Ribeiro, A., Nabais-Conde, L.E., 1972. Mapa tectónico de la península ibérica y Baleares 1:1.000.000. IGME, Madrid.
- Morín, J., Sánchez, I., González, J.R., 2022. Los Hitos (Arisgotas, Toledo). Nuevos datos para el conocimiento de un asentamiento rural de prestigio de época visigoda en la península ibérica. Revista Pyrena, 53 (1): 217-239. <https://doi.org/10.1344/pyrena2022.vol53num1.10>
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. Hydrol. Earth Syst. Sci., 11: 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Renfrew, C., Bahn, P. 2022. Arqueología. Teorías, métodos y práctica. Ed. Akal, segunda edición en español, revisada y actualizada, D. Govantes (Trad.), Torrejón de Ardoz (Madrid), 652 p.
- Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Silva, P.G., Giner-Robles, J.L., Garduño-Monroy, V.H., Reichert, K., 2011. A

- Comprehensive classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) for Archaeoseismology. *Quaternary International*, 242, 20-30.
- <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.04.044>
- Sánchez, I., Morín, J., 2020. Ecclesiastical landscapes in the Visigoth capital and countryside of Toledo (Spain). En: *The Visigothic Kingdom: The Negotiation of Power in Post-Roman Iberia* (S. Pazram, P. Pach, Eds.). AUP, Amsterdam, 315-336. https://doi.org/10.5117/9789463720632_ch16
- Sánchez, I., Morín, J., Díaz, M.A., 2023. Espacios y usos de un conjunto aristocrático rural de época visigoda. El yacimiento de Los Hitos (Arisgotas). *Madridrer Mitteilungen*, 63 (2022): 420-445. <https://doi.org/10.34780/4q39-4uq3>
- Sánchez, I., Morín, J., González de la Cal, J.R., 2024. El edificio funerario tardoantiguo de Los Hitos en Arisgotas (Toledo, España). Un panteón de época visigoda. En: *Loci Sepulcrales. Places of memory and burial in the Middle Ages. Serie Textes et Etudes du Moyen Âge*, vol. 102 (C. Varela, C. Fernández, J. Inglés, M. Violante, M. Farelo, Eds.). Brepols, Turnhout, 185-225. <https://doi.org/10.1484/M.TEMA-EB.5.136966>
- Sánchez Carretero, R., Contreras López, E., Martín Parra, L.M., Martínez-Salanova, J., Gutiérrez Alonso, G., Barbero, L. y Villaseca, C., 2009. Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 657 (Sonseca). IGME, Madrid.
- Sandoval, K.P., Díez Herrero, A., López Vinielles, J., Mateos, R.M., Benito, G., Ballesteros-Cánovas, J.A., Cervel, S., Hernández Manchado, R., 2023. Análisis preliminar tipológico, temporal y espacial de los registros publicados sobre paleoinundaciones en España. En: *Libro actas de la XVI Reunión Nacional de Geomorfología* (G. Desir, E. Nadal, D. Regües, Eds.). Sociedad Española de Geomorfología, 60-61.
- Vázquez, F., Moreno, F., García de Miguel, J.M., Ruiz, C., Pérez-González, A., 1991. Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 685 (Los Yébenes). IGME, Madrid.
- Willey G., Phillips, P. 1958. *Method and Theory in American Archaeology*. University of Chicago Press, Chicago, 290 p.

MANUSCRITO RECIBIDO: 01-02-2025

REVISIÓN RECIBIDA: 12-03-2025

ACEPTACIÓN DEL MANUSCRITO REVISADO: 29-04-2025



CONTEXTO GEOARQUEOLÓGICO DE LOS SISTEMAS DE MOLIENDA DEL CUARZO AURÍFERO EN LA MINERÍA ROMANA DEL NOROESTE DE IBERIA

Geoarchaeological context of gold quartz milling systems in Roman mining in the Iberian northwest

Roberto Matías Rodríguez

SEDPGYM. Avda Nocedo 3, 3º B, 24007 León
matiasr.roberto@gmail.com

Resumen: La minería aurífera romana del noroeste ibérico se caracteriza por las extensas explotaciones hidráulicas y redes kilométricas de canales dejadas con profusión a lo largo y ancho de este singular territorio. La concentración gravimétrica simple fue el método de trabajo aplicado en la recuperación del oro. Sin embargo, la explotación de los numerosos yacimientos auríferos primarios existentes en este entorno supuso un desafío diferente, ya que el oro debía de ser liberado de la matriz que lo contenía, generalmente cuarzo o rocas silicificadas. Este aspecto ya fue recogido en el texto del naturalista romano Plinio el Viejo (*PLIN.Nat.33.69*), indicando incluso una terminología específica. La molienda era efectuada mecánicamente empleando morteros realizados en materiales rocosos seleccionados por sus características mecánicas, muchos de los cuales procedían del entorno geológico inmediato, si bien, se constata la traslación de algunos materiales desde decenas de kilómetros, incluso cientos, en casos concretos. En este trabajo se ponen de manifiesto por primera vez con una visión de conjunto las características principales de los materiales geológicos utilizados sistemáticamente en la molienda del cuarzo aurífero, estableciendo una relación entre la disponibilidad en el entorno geológico y las explotaciones auríferas romanas, así como los criterios de selección para ser integrados en el proceso de molienda.

Palabras clave: minería oro romana, molinos cuarzo aurífero, noroeste Iberia.

Abstract: Roman gold mining in the Iberian northwest stands out for the footprint resulting from the extensive hydraulic operations and kilometer networks of canals left in profusion throughout the length and breadth of this unique territory. The simple gravimetric concentration was the working method applied in the recovery of gold from these deposits, either in alluvial sediments or in oxidation zones (eluvial) of primary deposits, without the intervention of any other treatment than separation by densities in some washing channels. However, the mining of the numerous existing primary gold deposits in this environment posed a different challenge, since the gold had to be released from the matrix that contained it, generally quartz or silicified rocks, which are characterized by exceptional resistance when crushed to be reduced to powder. This aspect was already included in the text of the Roman naturalist Pliny the Elder (*PLIN.Nat.33.69*), even indicating a specific terminology. The milling was carried out in two different processes in which rock materials selected for their mechanical characteristics, some of which came from the immediate geological environment, although the transfer of some materials from tens of kilometers, even hundreds, in specific cases. In this work they are revealed for the first time with an overview of the main characteristics of the geological materials used systematically in the milling of gold-bearing quartz, establishing a relationship between the availability in the geological

environment and gold mining, as well as the selection criteria to be integrated into the milling process.

Keywords: roman gold mining, gold-bearing quartz mills, Iberian northwest.

Matías, R. 2025. Contexto geoarqueológico de los sistemas de molienda del cuarzo aurífero en la minería romana del noroeste de Iberia. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 38 (2): 33-45.

Introducción

La explotación de los yacimientos auríferos primarios constituye desde el origen de la minería uno de los más importantes desafíos tecnológicos en donde es necesario aplicar unos sistemas de molienda que consumen numerosos recursos debido a la dureza de los materiales y el reducido tamaño del producto a recuperar. Lo que actualmente se realiza con relativa facilidad gracias a sistemas mecánicos que emplean aleaciones metálicas de gran dureza y potentes accionamientos mediante energía eléctrica, hace 2000 años era una ardua y difícil tarea que dependía de la acertada elección de materiales rocosos naturales con los que quebrantar las duras menas para liberar las partículas de oro y proceder a una concentración gravimétrica convencional.

A comienzos de la década del 2000 el concepto arqueológico de las explotaciones auríferas romanas del NO Ibérico en un yacimiento primario se encontraba muy lejos de la realidad. Algunos autores interpretaban las bases de molinos múltiples como elementos de una instalación de lavado por gravedad (Sánchez-Palencia, 1985; 2006). No obstante, el descubrimiento del complejo de minería aurífera romana subterránea de Llamas de Cabrera (2008) y los estudios multidisciplinares realizados en las minas del entorno de Porto (Lima *et al.*, 2010) comenzaron a aportar una visión más adecuada a las evidencias del terreno, donde se ponía de manifiesto el elevado grado de desarrollo alcanzado por los romanos en la explotación de los yacimientos auríferos primarios, definiéndose por vez primera la existencia de trabajos mineros muy estructurados y acordes a las especiales circunstancias geológicas de estos yacimientos (Matías, 2010).

En las dos últimas décadas ha podido determinarse un denominador común en las explotaciones romanas sobre yacimientos auríferos primarios que son los sistemas de molienda del cuarzo aurífero mediante la utilización de lo que más modernamente se llegaría a conocer como “molinos de pilones” o “bocartes” (Fig. 1). En época romana las bases principales de los molinos de cuarzo aurífero fueron materiales rocosos seleccionados por su dureza y resistencia, combinados con molinos rotativos para dar un acabado final que liberase definitivamente las partículas de oro, en donde los materiales eran también cuidadosamente seleccionados, teniendo que ser algunos transportados en ocasiones varios centenares de kilómetros hasta los centros de uso.

Aunque todavía hay importantes cuestiones por dilucidar, como el aprovechamiento metalúrgico de menas primarias con oro no visible, el posible uso del mercurio



Fig. 1.- Base de molino de impacto múltiple reaprovechada en un muro actual. Tresminas, Portugal.

en los procesos de recuperación, etc., en este momento estamos en condiciones de afirmar que, salvo raras excepciones, los romanos acometieron una explotación integral de todos los tipos de yacimientos auríferos, primarios y secundarios, que se encuentran en el NO ibérico (Fig. 2), marcando un antes y un después en la historia de la minería mundial (Matías, 2021). No solo en las técnicas de minería hidráulica llegó a existir una tecnología común y específica según el tipo de depósito a explotar, sino que también en la minería en yacimientos primarios se desarrolló de igual modo una tecnología común y característica, que es el objeto de este trabajo.

Geología de los yacimientos de oro

El oro es probablemente uno de los primeros metales que conoció y utilizó la Humanidad debido a que se encuentra directamente en estado metálico en la naturaleza, a su inalterabilidad y a que posee un atractivo color amarillo. Por su presencia en partículas visibles en los lechos de algunos ríos (“pepititas”), desde el inicio de los tiempos ha llamado poderosamente, sin duda, a la curiosidad humana.

La inalterabilidad del oro frente a los agentes atmosféricos, conservando todo su brillo y lustre, le convirtió históricamente en el “rey de los metales”. De hecho, el “agua regia” (mezcla de ácidos nítrico y clorhídrico 1:3) recibe su nombre por la capacidad de disolver el oro.

Resulta llamativo el contenido en oro del agua marina. Los océanos esconden más de 20.000.000 de toneladas de oro, si bien, para obtener un solo gramo de oro sería necesario procesar 250.000 m³ de agua. Hasta la fecha no se ha

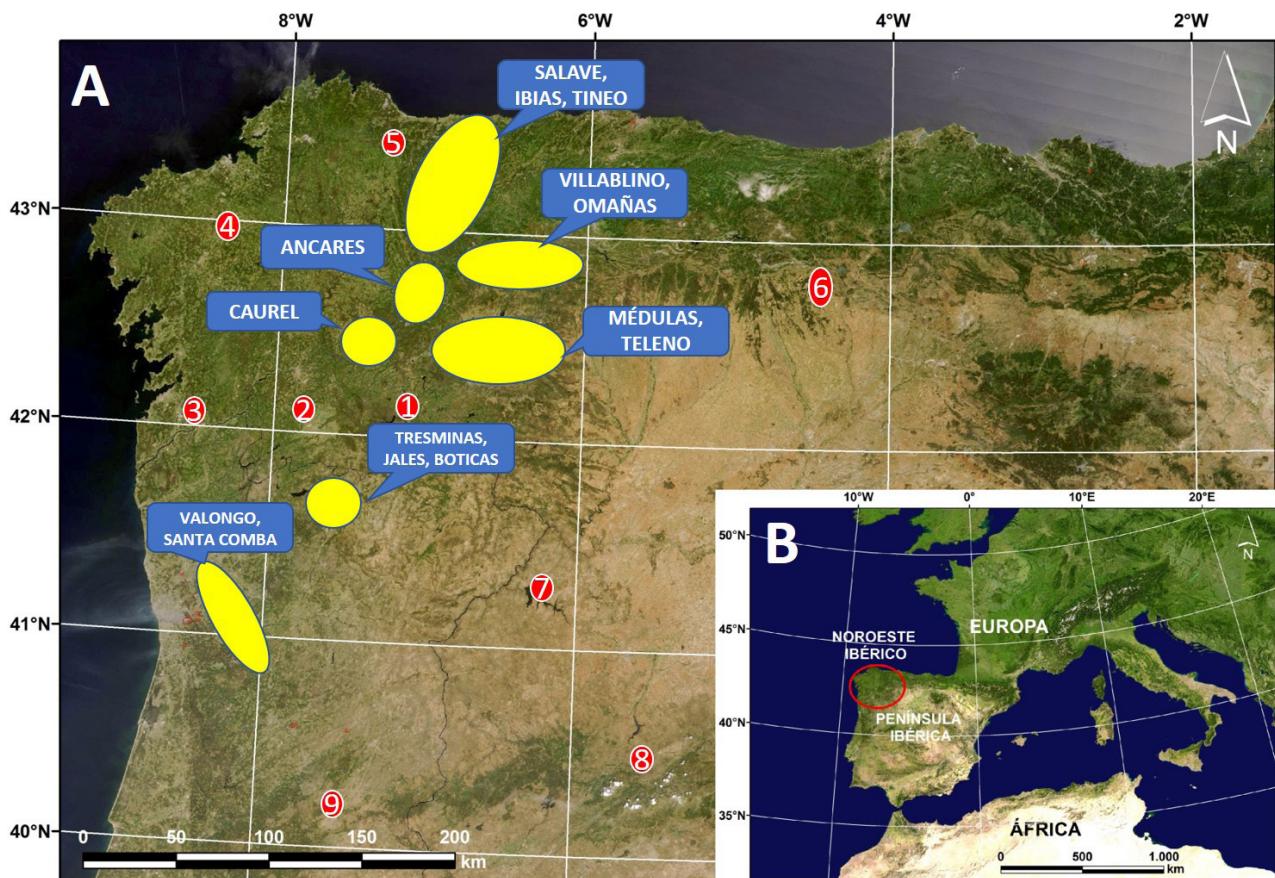


Fig. 2.- A. Localización de las principales zonas de minería aurífera romana del NO ibérico (amarillo) y otros enclaves significativos (rojo): 1. As Borreas de Caldesinhos (Viana do Bolo-Orense), 2. Os Milagros de Monte Medo (Orense), 3. Tomiño (Pontevedra), 4. Corcoesto (A Coruña), 5. A Mariña (Lugo), 6. Velilla del Río Carrión (Palencia), 7. Pino del Oro (Zamora), 8. Las Cavenes (Salamanca), 9. Vila Velha de Rodão (Portugal). B. Localización del área de estudio en el contexto de Europa.

conseguido ningún tratamiento que resulte rentable.

La abundancia media del oro en la corteza terrestre (0,005 ppm) es reducida frente a otros elementos de su mismo grupo como el cobre (50 ppm) o la plata (0,07 ppm) y equiparable a la del platino (0,005 ppm).

Yacimientos primarios

El oro como elemento metálico natural se encuentra en multitud de ambientes geológicos de formación de yacimientos minerales primarios, relacionados principalmente con los ámbitos magmáticos e hidrotermales, asociado a grandes episodios orogénicos. A medida que se profundiza en el conocimiento de los yacimientos primarios de oro aparecen nuevas hipótesis sobre su formación, donde va cobrando especial interés la circulación profunda de fluidos que van drenando el oro de las rocas que atravesan para depositarlo luego en lugares específicos, condicionados estructural y químicamente. La abundancia de ambientes hace difícil una clasificación uniforme, hasta el punto de que cada gran yacimiento podría, por su específica tipología, representar un ambiente único (Krestschmar y McBride, 2016). *Grosso modo*, se podrían establecer dos grandes grupos de yacimientos primarios claramente diferenciados (Ridley, 2013): magmáticos e hidrotermales

Ambos grupos se encuentran íntimamente relacionados con la actividad tectónica y el gradiente geotérmico. Por lo general, el oro se encuentra nativo, pero también es un componente accesorio de muchos yacimientos polimetálicos de los que actualmente se extrae como subproducto. El 50 % de la producción mundial de oro actual procede de conglomerados cementados con cuarzo y otros minerales, de los que el mejor ejemplo son los de Witwatersrand, en Sudáfrica.

Resultan especialmente interesantes las formaciones hidrotermales de oro conocidas como “oro orogénico” (Fig. 3) que alcanzan a suministrar actualmente el 30 % de la producción mundial. Estos yacimientos están relacionados con la circulación de aguas magmáticas y/o meteóricas en zonas de metamorfismo regional de grado medio-bajo, depositándose oro nativo como metal principal, generalmente asociado a As y, eventualmente, Sb (Groves *et al.*, 1998; Large *et al.*, 2011). La plata acompaña con frecuencia también al oro, pero en cantidades sensiblemente inferiores a las que se registran en otros ambientes metalogenéticos. Las presiones de formación de estos depósitos varían desde 1,5 a 5 kbar, lo que representa profundidades de 4 a 15 km en la corteza, si bien, las temperaturas se mueven en un rango de 300°-450°C, inferior a la de los yacimientos magmáticos. Por lo general son depósitos de pequeño tamaño (alrededor de 1Mt de mineral) y dispersos, si bien son susceptibles de explotación minera a pequeña escala.

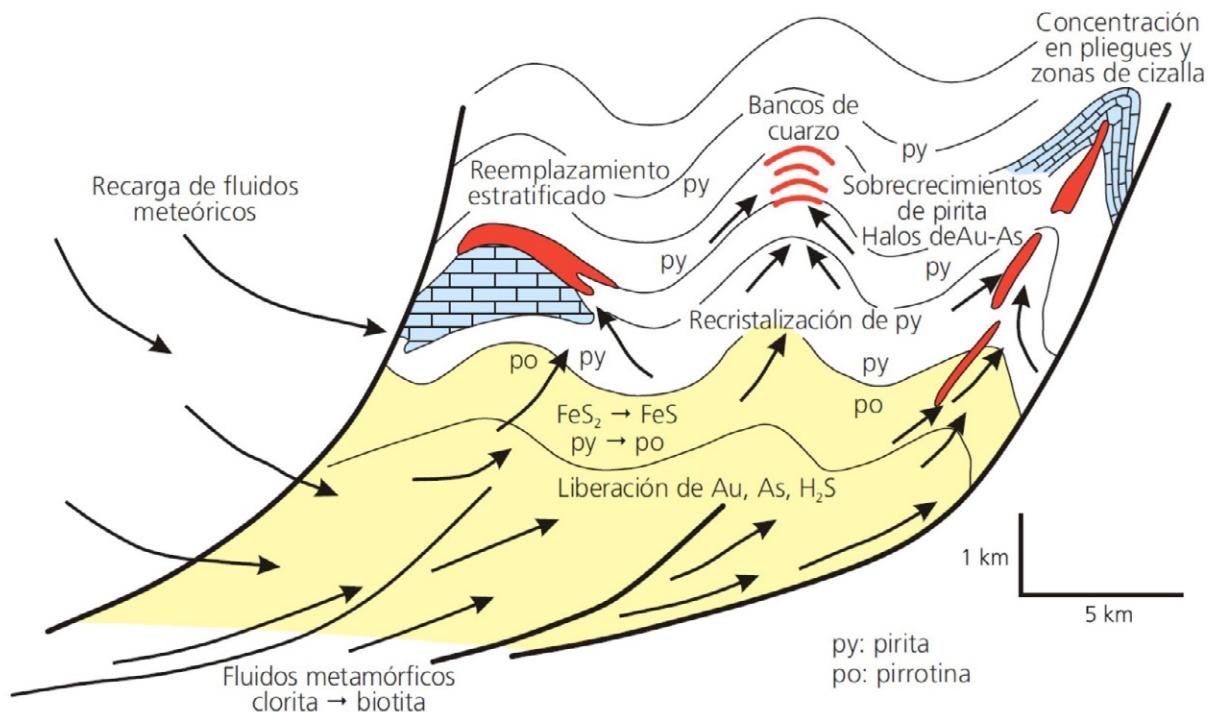


Fig. 3.- Circulación de fluidos en la formación de los yacimientos de “oro orogénico”. Modificado de Large *et al.*, 2011.

Yacimientos secundarios

La meteorización natural de los yacimientos auríferos primarios libera cantidades significativas de oro a lo largo de miles de años, lo que da lugar a que se produzcan en la mayoría de los casos concentraciones de oro apreciables en ambientes geológicos específicos (Fig. 4.), caracterizados en su mayoría por la presencia de partículas visibles de este metal. Estas concentraciones reciben el nombre genérico de “placer”, vocablo de origen hispano, internacionalmente aceptado.

Según su origen, los yacimientos auríferos secundarios (“placeres”) se pueden dividir en los siguientes grupos (Macdonald, 1983): continentales (eluviales, coluviales, aluviales, fluviales, glaciales, desérticos); transición (línea de costa, eólicos, deltaicos); marinos (inmersiones de las líneas de costa).

Los depósitos tipo placer se caracterizan por su extensión horizontal y una marcada irregularidad en las tres direcciones del espacio. Esto es debido al papel fundamental que tienen las direcciones e intensidad del flujo de agua en la concentración de los minerales pesados. En líneas generales, son especialmente interesantes por su riqueza aquellos placeres formados por la removilización de otros preexistentes.

El estudio científico en profundidad de la geología de los placeres aluviales es relativamente reciente y tiene sus inicios fundamentales en las investigaciones realizadas por el geólogo ruso Bilibin, plasmadas en la obra *Fundamentals of Placer Geology* (1937) sobre las experiencias adquiridas en los yacimientos de oro aluviales de la antigua Unión Soviética. Trabajos más recientes han continuado

investigando en el complejo tema de los placeres fluviales (Buiskikh, 2015).

Dentro del NO ibérico predominan los yacimientos variscos primarios mesotermiales de tipo filoniano que por meteorización natural han dado lugar a un amplio abanico de enriquecimientos eluviales y yacimientos secundarios aluviales y fluviales (Fig. 5). La extensión de estos yacimientos secundarios varía desde apenas una hectárea a varios kilómetros cuadrados, con espesores que pueden llegar a alcanzar el centenar de metros, superado en algunos casos, como en Las Médulas.

Los yacimientos primarios filonianos de esta área están en relación con las grandes estructuras tectónicas que son las que han permitido, bien el ascenso y emplazamiento de cuerpos ígneos intrusivos, bien la circulación de fluidos hidrotermales portadores de las mineralizaciones, o ambos factores. Consisten básicamente estos yacimientos en filones de cuarzo de espesor decimétrico con arsenopirita como sulfuro principal. Se trata de yacimientos de “oro orogénico” que presentan un modelo común que engloba todos los yacimientos de filones auríferos mesotermiales del Cinturón Varisco Europeo, basado en el ascenso de fluidos mineralizados de origen profundo a través de importantes estructuras tectónicas y que se mezclan finalmente con otros fluidos de origen superficial durante las etapas tardías de levantamiento y exhumación de la cordillera. Los cambios en las condiciones del medio durante el recorrido ascendente de los fluidos hidrotermales mineralizados provocan una disminución de la solubilidad del oro, lo que ha dado lugar a su deposición.

Los principales tipos de mineralización se encuentran encajados en rocas detríticas de edad Cámbrico inferior y

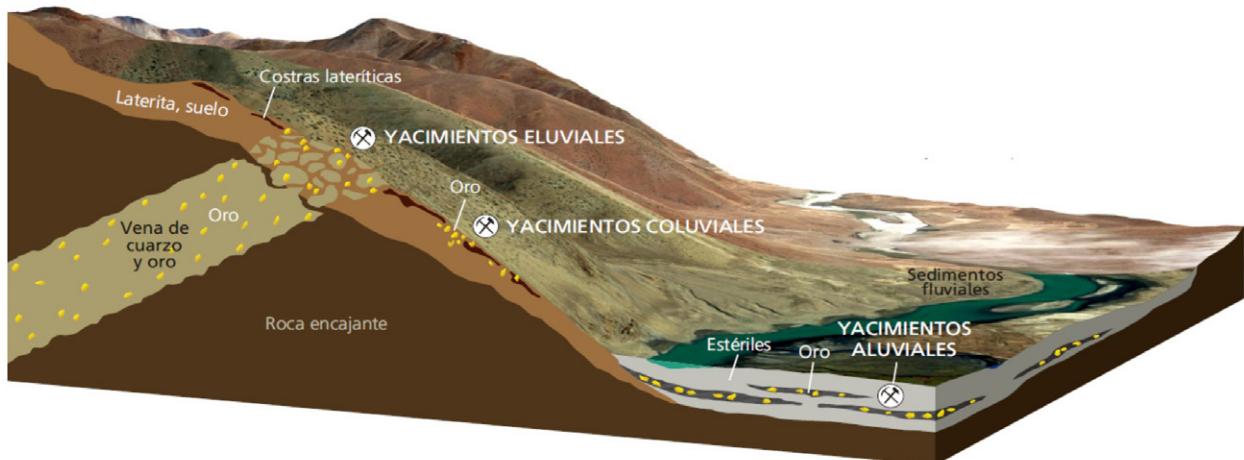


Fig. 4.- Tipologías básicas de los yacimientos de oro primarios (filones de cuarzo) y secundarios. Dibujo: Rodrigo Castaño De Luis.

Silúrico, aunque la mayor concentración de indicios de oro se produce en las cuarcitas y areniscas de la Serie de Los Cabos (Cámbrico medio-Tremadoc)

La explotación de los yacimientos de oro primarios en época romana

A diferencia de otros campos como la arquitectura o la agricultura romanas, no ha llegado hasta nosotros un texto con un tratado que contemple específicamente y con amplitud suficiente las técnicas de trabajo utilizadas en las explotaciones mineras romanas. Sin embargo, el análisis de las evidencias conservadas sobre el terreno nos aporta abundantes y sorprendentes datos sobre el grado de planificación y las distintas soluciones técnicas utilizadas para la explotación masiva y sistemática de los yacimientos de oro durante la época romana.

En la mayoría de las sustancias, un continuado interés a lo largo del tiempo en los yacimientos minerales ha desfigurado o enmascarado por completo los trabajos de minería romana y otros. Sin embargo, para el caso del oro, por las especiales características de su minería, podemos todavía hoy contemplar los restos de las explotaciones mineras prácticamente en el mismo estado en que fueron abandonadas, convirtiéndose así estas en el más fiel testimonio de la ingeniería minera romana. La minería aurífera romana sorprende desde todos los puntos de vista por el extraordinario grado de perfección alcanzado, tanto en la localización de los yacimientos, como en la capacidad de explotarlos.

Se encuentran numerosas referencias documentales en los textos antiguos que citan específicamente las grandes riquezas auríferas del noroeste hispano. Aunque con distintos grados de profundidad y precisión, los escritos de estos autores aportan interesantes datos que ayudan a encuadrar temporal y geográficamente las explotaciones auríferas.

Atendiendo a su amplitud y precisión, desde el punto de vista de la ingeniería de las explotaciones el texto más importante que describe de forma más pormenorizada la minería aurífera romana es el recogido en la obra del naturalista romano Plinio *Naturalis Historia* (PLIN.Nat.33.66-78), sobre la que se ha realizado una completa y revisada

traducción multidisciplinar, que es la utilizado en este trabajo (Pérez y Matías, 2008). Por su cargo como *Procurator* de la Tarraconense en el siglo I, es posible que el propio Plinio llegase a conocer personalmente los grandes trabajos de la minería aurífera romana del NO ibérico. Notablemente asombrado por la magnitud de los trabajos mineros, este autor abordaría desde un punto de vista técnico muchos e interesantes aspectos de las minas de oro (PLIN.Nat.33.68):

68. “*Al oro que se extrae mediante pozos de mina unos lo llaman canalicium, otros canaliense, pues está adherido a los fragmentos de roca marmórea, no de la manera con que brilla el zafiro de Oriente y el de Tebas y otras gemas, sino unido a las partículas de la roca marmórea. Estos filones de los veneros se extienden de acá para allá por los laterales de los pozos, de donde tomó el nombre (sc. canalicium o canaliense), y la roca se sostiene con pilares de madera*”.

Aunque en un orden inferior frente a los grandes trabajos de minería hidráulica sobre yacimientos secundarios, los ingenieros romanos aprovecharon sistemáticamente los yacimientos primarios, a pesar de que generalmente son muy irregulares y de pequeña extensión, presentando casi siempre un desarrollo vertical que complica los trabajos mineros, recurriendo necesariamente a la minería subterránea. En una primera fase, el principal interés de los yacimientos primarios es la zona de oxidación y las acumulaciones eluviales, que pueden ser trabajadas tanto manual como hidráulicamente, siempre en superficie. Cuando la explotación llegaba a la mena primaria inalterada o poco disgregada, los ingenieros romanos se encontraban con la necesidad de una molienda fina del mineral, lo que limitaba mucho la progresión de las labores mineras, que tenían que hacerse generalmente de forma selectiva por minería subterránea para reducir la dilución de la mena.

Esta fue aplicada sólo en aquellos casos donde el número o importancia de los filones de cuarzo aurífero justificaba su utilización, bien por la falta de operatividad de las técnicas hidráulicas utilizadas en las zonas superficiales debido a que alcanzan una roca encajante compacta, que impide su arrastre por el agua, o por la localización muy puntual de las zonas mineralizadas, siempre teniendo en cuenta su progresión en profundidad.

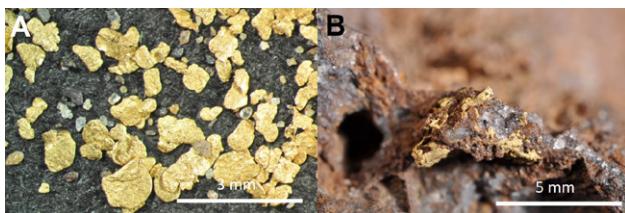


Fig. 5.- Partículas de oro: A. Pepitas de aluviones (río Duerna, León); B. Cuarzo aurífero (Andinuela, León).

Aunque hasta hace pocos años había sido atribuida con cierta frecuencia la finalidad exclusiva de exploración a la existencia de algunas galerías romanas en yacimientos primarios, al nivel de conocimientos actual es muy evidente la amplia utilización de la minería subterránea en la explotación de yacimientos primarios de oro en el noroeste hispano: Jales-Três Minas (Vila Real, Portugal), Valongo-Sierra de Santa Justa (Porto, Portugal), Llamas de Cabrera (León, España), Montealegre (León, España), Pozos (León, España), etc. (Matías, 2010; 2014a; 2014b; 2021)

Como en cualquier otra minería subterránea de la época, el avance de las galerías y la extracción masiva de mineral aurífero se realizaba mediante herramientas metálicas (maza y punterola enmangadas) cuyas huellas pueden claramente apreciarse por todas partes. La morfología de estas huellas sobre la roca pone de manifiesto que se trata de herramientas generalmente muy afiladas y consistentes.

La iluminación se realizaba mediante lámparas de aceite (lucernas) emplazadas en huecos específicos (lucernarios) excavados en las paredes de las galerías y zonas de explotación a medida que avanzaban los trabajos.

En el arranque de las zonas más duras de los filones de cuarzo aurífero resultaba corriente el uso de fuego y agua (*firesetting* en inglés), claramente atestiguado por las características superficies abovedadas que produce su utilización tras resquebrajarse el mineral de cuarzo o la roca dura por la brusca contracción que experimenta al ser enfriado con agua después de haber sido calentado.

Es también habitual en la mayoría de las explotaciones subterráneas de yacimientos primarios la utilización de pozos verticales para la prospección, acceso y ventilación, así como el trazado de galerías de acceso y drenaje en donde resultaban necesarias por la presencia abundante de agua. Los pozos verticales son especialmente abundantes en el entorno de la ciudad portuguesa de Valongo, donde se encuentra el mayor conjunto mundial de minería aurífera romana subterránea (Matías, 2014b).

El emplazamiento de las galerías principales se sitúa preferentemente en los bordes de los cauces de ríos y arroyos para buscar las cotas inferiores de las mineralizaciones (Fig. 6). En estas galerías se evacúan las aguas por gravedad a través de las cunetas excavadas en los laterales. Algunas galerías tienen incluso su entrada cuidadosamente perfilada, siguiendo un modelo que se repite en diferentes lugares del noroeste, como pueden ser Valongo (Portugal), Montealegre (León) o Molinaferrera (León) (Matías, 2021).

Por norma general podemos considerar que en cualquier yacimiento aurífero primario de cierta importancia se produce inicialmente una explotación superficial del

afloramiento de las mineralizaciones que puede ser hidráulica (yacimientos eluviales) o manual (filones escasamente alterados). Una vez agotadas las posibilidades de la explotación a cielo abierto se pasaría a una explotación subterránea en profundidad si la continuidad del yacimiento lo permite. Puede constatarse que para los ingenieros romanos no pasó desapercibido el hecho de que la zona de alteración superficial presenta por lo general contenidos auríferos superiores a los de la mena primaria.

Sin embargo, hasta hace poco tiempo, la existencia de redes hidráulicas en este tipo de yacimientos ha llevado a algunos autores a considerar, sin haber profundizado técnicamente en sus conclusiones, que las escasas evidencias de minería subterránea son únicamente labores de investigación (Luzón *et al.*, 1980); incluso se ha llegado a afirmar que este tipo de explotaciones mineras se interrumpían cuando se alcanzaba la mineralización primaria inalterada (Maya, 1990), o que se trata de labores de rapiña, sin mucha importancia cuantitativa dentro del noroeste hispano (Sánchez-Palencia, 2000).

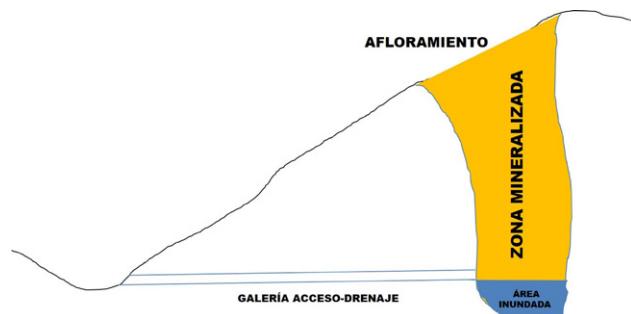


Fig. 6.- Esquema básico de una explotación aurífera romana subterránea.

Sistemas de molienda del cuarzo aurífero

Cuando el material a procesar es la mena primaria en su estado original o escasamente alterada, el oro se encuentra íntimamente ligado al cuarzo o la roca encajante. Es preciso entonces realizar un proceso de molienda que libere las partículas de oro para proceder a su concentración gravimétrica (Fig. 7).

La molienda del cuarzo aurífero en la minería romana tiene ya un amplio precedente documentado en las minas del Egipto faraónico, al menos desde la XII Dinastía (2466-1733 a. C.), recogida en el texto de Diodoro Sículo en el 50 a.C., *Historia* 3, 12-13 (traducción libre sobre la versión inglesa de Del Mar, 1902, pp. 39-43):

“...Los jóvenes que no han alcanzado la pubertad se arrastran a través de los túneles hacia las galerías abiertas en la roca y con gran esfuerzo recogen el mineral para llevarlo de regreso al exterior de la mina al aire libre. Entonces, aquellos hombres de más de 30 años, dividen en porciones la roca extraída por estos jóvenes, colocándola en morteros de piedra golpeándola con mazos de hierro hasta que es reducida a un tamaño menor que las semillas. Las mujeres y los ancianos reciben el polvo de roca de

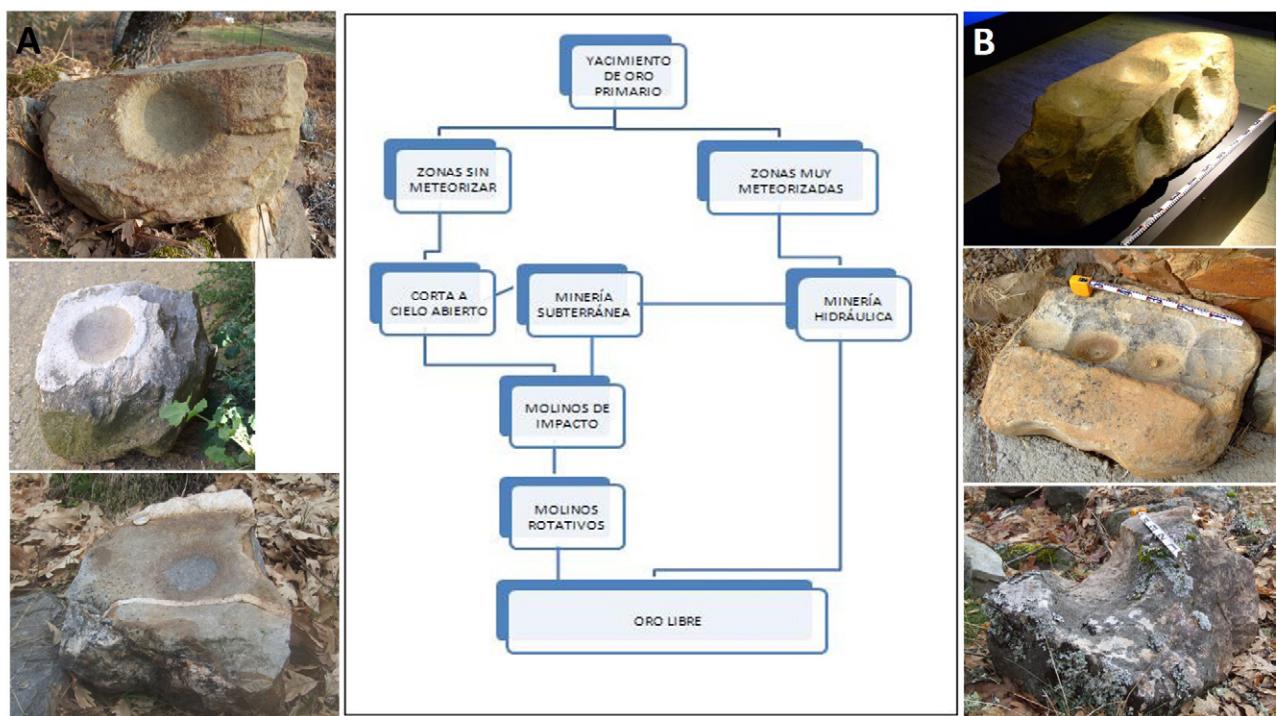


Fig. 7.- Diagrama de la explotación romana de los yacimientos auríferos primarios y diversos ejemplos de bases de molinos de impacto, todos ellos de la provincia de León. A. Molinos individuales, de arriba abajo: Andiñuela, Pozos, Llamas de Cabrera. B. Molinos múltiples, de arriba abajo: Museo de León, Pozos, Andiñuela.

estos hombres, y lo colocan en una serie de molinos. Comenzando con sus manos juntas en grupos de dos o tres, lo muelen hasta que su porción ha sido reducida a la textura de una fina harina...

La fecha del texto de Diodoro se corresponde con el final del período de la minería egipcia propiamente dicha. Resulta sorprendente la meticulosa descripción de todo el proceso de la extracción minera y el tratamiento metalúrgico de la mena. Destacan, por un lado, las apocalípticas condiciones del trabajo en las minas, que contribuirán a la generalización de la “leyenda negra” que persigue a la actividad minera, precisamente desde esa época. Es necesario separar la condición de esclavitud del propio laboreo en las minas, cuyas condiciones de dureza física inherentes al medio en el que se realizan los trabajos poco habían variado desde sus orígenes en la Prehistoria y que, no obstante, perdurarán todavía durante mucho tiempo hasta la progresiva introducción de la maquinaria de accionamiento mecánico en las minas, lo que sólo tendrá lugar a partir del siglo XIX. Por otro lado, destaca asimismo el elevado grado de estructuración de los trabajos y su optimización, no sólo por la selección de las herramientas e individuos físicamente más apropiados para las distintas tareas, sino por la cualificación de estos como resultado de una especialización en las labores.

La introducción en el proceso metalúrgico de las técnicas de trituración, lavado y concentración sistemáticas del cuarzo aurífero denota ya un profundo conocimiento de la distribución del oro en los yacimientos primarios, la mayoría de las veces prácticamente invisible a simple vista por su tamaño o dispersión, lo que obliga a un seguimiento continuo del proceso de extracción para verificar la pre-

sencia del oro en el cuarzo, permitiendo desechar aquellas zonas de menor riqueza dentro del yacimiento, lo que lógicamente redundaría en una notable economía de esfuerzos.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la especialización del utilaje minero que se desprende de este texto, empleando simultáneamente herramientas de piedra y hierro para fines diferenciados, lo que puede ser atribuido a la escasez de este metal para destinarlo a unas aplicaciones en las que los útiles de piedra pueden cumplir todavía perfectamente con algunas de las funciones, como puede ser la trituración primaria del mineral.

Los ingenieros romanos fueron claros herederos de esta tecnología, como se desprende del texto de Plinio (PLIN. Nat.33.69):

69. *“Lo que se ha extraído se tritura, se lava, se tuesta y se muele. A la harina resultante le llaman apiláscede; a la plata que se obtiene por la acción del horno (sc. le llaman) sudor. La impureza que el horno produce en cualquier mena se llama escoria, que en el caso del oro se machaca y se funde de nuevo. Los crisoles se hacen de tasconio, que es una tierra blanca semejante a la arcilla, pues ninguna otra tierra resiste el fuego avivado por una corriente de aire ni la materia ardiente”.*

Aunque el texto de Plinio es muy ilustrativo y se sitúa a una significativa distancia de cualquier otra referencia antigua sobre la minería aurífera romana, este no alcanza la profundidad y precisión que serían deseables, a la vez que las traducciones e interpretaciones realizadas por distintos autores han llevado en algunos casos a visiones notablemente contradictorias sobre un mismo pasaje. De todos modos, desde un punto de vista amplio y objetivo, la magnitud, extensión y complejidad de los restos de minería

romana supera con mucho la descripción de Plinio, como ya apuntaba Domergue (1972-74): “*Malheureusement les sources historiques ne sont pas à la hauteur des vestiges archéologiques*”.

Los diversos reconocimientos de campo realizados en los últimos años para la investigación de las técnicas utilizadas en las distintas explotaciones mineras romanas sobre yacimientos auríferos primarios de la provincia de León y otros lugares del NO Ibérico han puesto de manifiesto la existencia de patrones comunes de explotación minera, así como la presencia sistemática de las bases de los molinos utilizados en el proceso de recuperación del oro del cuarzo aurífero, claramente en relación con técnicas mineras no hidráulicas (Matías, 2010), a veces aplicadas después de estas, como pueden ser los casos de Llamas de Cabrera, Castropodame, Andiñuela, etc. Las bases de molinos pueden ser individuales, es decir, para ser utilizadas por un operario, o múltiples, formando parte de un sistema mecanizado movido hidráulicamente o por la fuerza animal (Fig. 8).

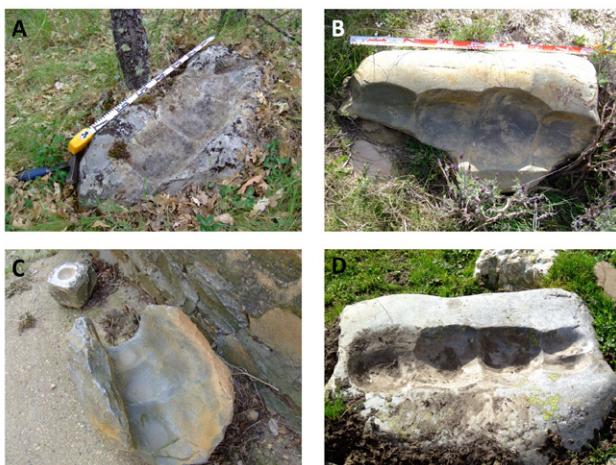


Fig. 8.- Ejemplos de algunas bases de molinos de impacto múltiples de la provincia de León: A. Campo filoniano Lucillo-Villalibre. B. Lagunas de Lacillo (Val de San Lorenzo). C. Pozos. D. Salientes.

Todas las tipologías documentadas en los diferentes yacimientos son comunes, en especial para las bases de molinos de impacto, estando constituidos estos por bloques de piedra muy compacta y resistente, de origen generalmente local o escaso transporte, sistemáticamente aprovechados por todas las caras posibles. El peso de estas piezas oscila entre los 15-35 kg para las bases de molinos individuales y en más de 100 kg para las bases de molinos múltiples. Asimismo, encontramos otro rasgo común que es su emplazamiento en las explotaciones, el cual está en clara relación con los lugares más favorables al transporte del mineral por gravedad, así como el establecimiento de puntos de trabajo estables, próximos a la explotación minera, pero sin interferir en la progresión de esta:

(A) entorno exterior de la entrada de las galerías principales, para las minas subterráneas

(B) parte final de los zanjones y corredores de acceso y drenaje en las cortas a cielo abierto sobre filones.

La explotación ordenada y efectiva de un yacimiento aurífero primario hace necesario establecer unos procesos sistemáticos que garanticen el aprovechamiento adecuado de la mena, donde las pérdidas pueden ser muy importantes debido a la pequeña proporción del metal frente a la ganga que lo contiene. Para el caso de la molienda fina del mineral, los romanos apostaron claramente por la utilización de molinos de impacto, en línea con las técnicas utilizadas ya anteriormente por sus predecesores en otras zonas de la Península Ibérica, Grecia o Egipto (Klemm y Klemm, 2013).

El mineral de cuarzo que conforma en su mayoría los materiales auríferos debe de ser reducido a un polvo fino para liberar las partículas de oro de los demás elementos ajenos, con la finalidad de que luego puedan ser separadas y concentradas por su diferente densidad. Ahora bien, el cuarzo es un material duro y abrasivo, aunque relativamente frágil, que requiere tratamientos específicos, dada su naturaleza. Por ello, debido a su fragilidad, el golpeo mecánico sobre cuerpos de dureza equivalente (para evitar y reducir en lo posible el desgaste prematuro) fue la mejor solución que se podía adoptar al estado de la tecnología y disponibilidad de materiales en época romana.

Los materiales elegidos para la construcción de las bases de los molinos de impacto son en su mayoría de origen local, siempre respetando la adecuación a las exigencias mecánicas de su funcionalidad.

Los tipos principales de materiales encontrados, con algunas de sus ubicaciones, son los siguientes:

- Grandes cantos rodados de cuarcita (Pozos, Val de San Lorenzo, Castropodame, Salientes, Lucillo y Llamas, en León. Salave, Fresneda y Cecos, en Asturias)

- Bloques de cuarcita-arenisca extraída in situ (Llamas de Cabrera, Andiñuela, Lucillo, etc.)

- Bloques de arenisca local (Andiñuela)

- Bloques tallados de granito (Fig. 9) en forma de paralelepípedo (Três Minas, Jales, As Portas)

- Bloques de cuarzo filoniano muy homogéneos (Pozos, Val de San Lorenzo)

La cuarcita de los grandes bloques de cantos rodados es un material idóneo porque presenta ya una adecuada selección natural debido a las abrasivas y duras condiciones



Fig. 9.- Galería do Pilar (Tresminas-Portugal). El pilar ha sido realizado con bases de molinos múltiples de granito.

del transporte fluvial, por lo que es preferible esta opción a cualquier material extraído directamente de los macizos rocosos, sujeto siempre a la presencia de imperfecciones (fisuración) e irregularidades en su composición, que disminuyen notablemente sus cualidades mecánicas. La utilización de otros materiales como el granito depende de la existencia de un emplazamiento próximo y de la adecuada calidad del macizo rocoso, ya que por sus dimensiones suponen un problema de transporte y no está garantizada su durabilidad.

También se ha encontrado en algún caso (Llamas de Cabrera, León y Valongo, Portugal, por ejemplo) la utilización *in situ* como bases de grandes bloques de rocas del entorno inmediato a las explotaciones (Fig. 10). Un caso aparte y excepcional es la proliferación de cazoletas de molienda sobre grandes bloques de granito en las explotaciones de Pino de Oro, en Zamora (Sánchez-Palencia *et al.*, 2014). La tipología anómala de estas singulares instalaciones plantea interesantes cuestiones aún por resolver.



Fig. 10.- Gran bloque de roca arenisca utilizado para la molienda del cuarzo aurífero en Llamas de Cabrera, León.

A pesar de la extraordinaria resistencia de los materiales con los que están elaborados los molinos de impacto, la abrasividad del cuarzo de los filones auríferos termina produciendo en estos un fuerte desgaste sobre las superficies de trabajo, que obliga con el tiempo a su sustitución. En los casos de molinos múltiples elaborados sobre bloques de forma regular, como los de granito de Três Minas, por ejemplo, se aprecia claramente que han sido aprovechadas todas las caras del paralelepípedo hasta un nivel de desgaste determinado, momento a partir del cual se procede a reemplazar la pieza por una nueva. En las bases de molinos individuales se aprecia sistemáticamente la misma operación, utilizando todas las superficies disponibles que permitan un buen apoyo, hasta el agotamiento total de la pieza por desgaste o fatiga del material.

La explicación técnica de este hecho la podemos encontrar fácilmente cuando analizamos la magnitud de las fuerzas aplicadas sobre el mortero y sus efectos sobre el mineral a moler en función de la forma de la cavidad (Fig. 11). Para los molinos de pilones accionados mecánicamente (bases múltiples), la fuerza aplicada es directamente pro-

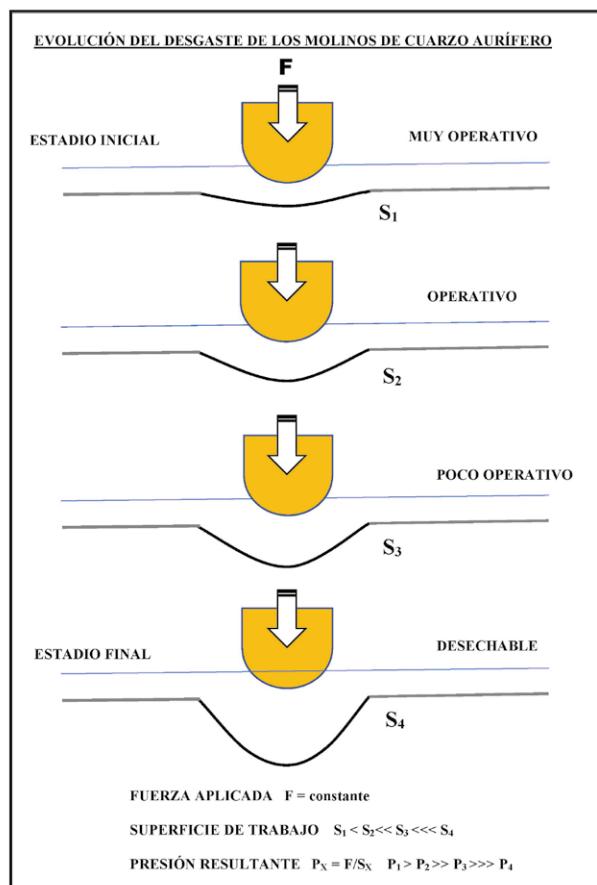


Fig. 11.- Evolución del desgaste de los molinos de cuarzo aurífero (Matías, 2010).

porcional al peso del dispositivo de impacto y su altura de elevación. Para los molinos individuales, accionados manualmente, esta fuerza es función del impulso al que se somete el brazo de impacto. En ambos casos, la fuerza F, aunque de diferente magnitud, puede considerarse constante.

En un principio, con un escaso desgaste o nulo, la superficie de contacto entre el pilón y la base S1 es pequeña, por lo que la fuerza de impacto resultante (presión P) será máxima, quebrando fácilmente el mineral aurífero al superar su resistencia a la compresión simple. A medida que se va desgastando la base y ampliándose la cavidad, aumenta la superficie de contacto, por lo que la fuerza del impacto se reparte sobre una superficie mayor, disipándose más fácilmente y aumentando el tiempo que se necesita (nº de golpes) para reducir el mineral a polvo. Llega un momento en que la superficie es ya tan grande (S4) que el pilón apenas puede ejercer una fuerza suficiente sobre el mineral como para triturarlo adecuadamente con un rendimiento efectivo, ya que serían necesarios muchos más golpes para conseguir el mismo resultado, por lo que es necesario cambiar la base desgastada por una nueva, rotando la pieza o sustituéndola, iniciándose de nuevo el proceso que daría lugar a la formación de otra cavidad por desgaste.

En las bases de molinos múltiples se llega a observar en algunos casos que las cavidades de desgaste no son uniformes, presentando ensanchamientos y diferentes huellas o niveles de actividad, lo que parece deberse a una excentri-

cidad de los pilones, producida artificialmente al desplazar la base, o por el propio desgaste de la maquinaria, en donde los pilones de golpeo están sometidos también a importantes esfuerzos. En el primer caso, esto podría utilizarse para prolongar algo la vida del molino al ofrecer nuevas superficies de trabajo más reducidas que mantengan la fuerza de impacto necesaria para triturar el cuarzo al tamaño requerido. El rápido desgaste de los molinos y la eventual rotura de estos es una de las causas por las que siempre parecen encontrarse un cierto número de ellos, lo que por este motivo no puede ser atribuible en ningún caso a la presencia de un mayor número de elementos (máquinas u operarios) de molienda.

Una vez procesado el material aurífero en los molinos de impacto hasta convertirlo en una fina arena (*apiláscede*) esta se introducía posteriormente en molinos rotativos específicos, capaces de reducirla a polvo. De estos molinos rotativos se ha podido constatar un amplio abanico de materiales con los que se fabrican, todos ellos rocas granudas, también de origen generalmente local, en las que predominan areniscas, conglomerados silíceos fuertemente cementados y granitos (Fig. 12).



Fig. 12.- Fragmentos de molinos rotativos de granito (1) y conglomerado opalino (2) hallados en la localidad de Andiñuela, León.

Hemos encontrado por ahora una singular excepción al origen local de los conglomerados con los que se fabrican algunos molinos rotativos de las minas primarias de la zona de León. Se trata de materiales procedentes de niveles sedimentarios continentales silicificados y cementados por ópalo del SO de la Meseta Norte (Madrigal, 1991) en donde se encuentra un conglomerado característico de cantes redondeados de cuarzo de color blanquecino fuertemente cementado, idóneo para la molienda de materiales duros granulares. Restos de molinos realizados con estos materiales se encuentran en diversas minas de oro romanas de Maragatería, Cabrera y Bierzo, lo que supone un transporte de al menos 100-150 km de distancia.

Distribución geográfica de los hallazgos

Al estado del conocimiento sobre la presencia de bases de molinos de cuarzo aurífero en las minas romanas

son ya numerosos los casos en donde van apareciendo sistemáticamente las evidencias de uso de estos sistemas de molienda. No siempre es fácil su localización, bien porque las condiciones del medio no lo permiten, bien porque han podido ser trasladados de su emplazamiento original para otros usos, en algunos casos como materiales de construcción.

Una distribución actualizada puede encontrarse en la tabla 1, donde se reflejan los tipos de molinos hallados en cada yacimiento primario referenciado. Frente al trabajo inicial de hace más de una década (Matías, 2010), hay interesantes novedades como la localización de molinos múltiples del complejo de minería aurífera romana subterránea de Llamas de Cabrera (León), ubicados en la fragua del pueblo, a 3 km de distancia de las minas. También se han hallado numerosas bases múltiples e individuales en el campo filoniano Lucillo-Villalibre, junto con muestras de oro visible en superficie (Matías y González-Nistal, 2014).

Uno de los hallazgos más sorprendentes corresponde a los realizados recientemente en la mina de los Lagos de Salave (Álvarez *et al.*, 2019; 2020), donde se han localizado decenas de molinos múltiples en la base del acantilado que se abre desde la mina al mar, en la denominada cala del Figo. La acción del oleaje ha desgastado la mayoría de las piezas, pero todavía puede apreciarse perfectamente su funcionalidad. Los materiales con los que están elaborados son grandes cantos rodados de cuarcitas y gabros.

Conclusiones

A raíz de los nuevos hallazgos realizados podemos afirmar ya que existe una estrecha relación entre los yacimientos primarios y los sistemas de molienda del mineral, lo que muestra un claro conocimiento de las menas procesadas, perfilando un modelo de trabajo que se adapta sistemáticamente a ellas en todas y cada una de las diferentes circunstancias geológicas.

La estricta selección de los materiales rocosos empleados para la confección de las bases de molinos, tanto rotativos como de impacto, revela sin ninguna duda el conocimiento de la magnitud del problema a resolver, dada la dureza del cuarzo que contiene las partículas de oro. De no encontrarse los materiales en el entorno local, se ha procedido a su transporte desde las áreas fuente.

La cuestión de la aplicación de los molinos rotativos al procesado del oro, por su semejanza con aquellos de uso doméstico, tiene un claro paralelismo en las minas del Egipto faraónico, si bien no se descarta un posible uso mixto y no sistemático, en función de las necesidades específicas de molienda de la mena a tratar para la completa liberación de las partículas de oro. No obstante, recordamos que Plinio hace la siguiente referencia: *PLIN.Nat.33.69 “Lo que se ha extraído se Tritura, se lava, se tuesta y se muele”*, en la que existen dos procesos diferentes, correspondiendo el segundo a una operación compatible con la utilización de los molinos rotativos, ya que el material ha sido reducido anteriormente a un pequeño tamaño.

El análisis e interpretación técnica de los sistemas de molienda va aclarando diversas cuestiones relativas a su

MINA	Impacto individual	Impacto múltiple						Rotativo*	Referencias
		A	S	T	U	R	I	A	S
Salave	Tres en gabros			Decenas en gabros, cuarcitas y cuarzo				Citados	Villa, 2010; Álvarez <i>et al.</i> , 2019, 2020
Fojo das Freitas	Dos en areniscas		-					-	Hallazgo personal
Fresnedo	-			Uno en cuarcitas				-	Sánchez-Palencia, 1985
Cecos	-			Uno en cuarcitas				-	Sánchez-Palencia, 1985
L E Ó N									
Pozos	Decenas en cuarcitas y areniscas		Cuatro en cuarcitas			Conglomerados opalininos**			Sánchez-Palencia, 1985 Domergue, 1986
Val de San Lorenzo	-		Siete en cuarcitas			Conglomerados opalininos			Domergue, 1987 Matías, 2010
Andiñuela	Decenas en cuarcitas y areniscas		Uno en cuarcitas			Granitos y conglomerados opalininos			Sánchez-Palencia, 1985 Matías, 2010
Castropodame	Decenas en cuarcitas y areniscas		-			Granitos y conglomerados opalininos**			Meléndez, 1993
Llamas de Cabrera	Doce en cuarcitas y areniscas		Uno en cuarcitas			Granitos y conglomerados opalininos			Matías, 2010
Lucillo-Villalibre	Siete en cuarcitas y areniscas		Tres en cuarcitas			-			Matías y González-Nistal, 2014
Las Rubias	Dos en cuarcitas y areniscas		-			-			Domergue, 1986
San Facundo	Uno en areniscas		-			-			Comunicación oral de Juan Carlos Garrido
Salientes	-		Uno en cuarcitas			Tres en granitos			Domergue, 1987 Matías, 2013
O R E N S E									
As Portas	-		Tres en granitos en los muros de la iglesia de San Clodio			-			Hallazgo personal
P O N T E V E D R A									
Burato dos Mouros	Uno en cuarcitas		-			-			Pascual, 2019
S A L A M A N C A									
Pozo Airón	-		Tres en granitos			-			Luis De, 2020
P O R T U G A L									
Tresminas	-		Decenas en granitos			En granitos			Almeida, 1970 Wahl, 1988; 1998
Jales	-		-			En granitos			Almeida, 1970 Braz, 2005
Valongo	Tres en areniscas		Uno en granito			-			Matías <i>et al.</i> , 2014
Banjas	Decenas en cuarcitas y areniscas		-			En granitos y conglomerados			Lima <i>et al.</i> , 2010

Tabla 1. Hallazgos de bases de molinos de cuarzo aurífero del noroeste ibérico.

* Los hallazgos de molinos rotativos suelen ser fragmentos. En muy pocos casos se han encontrado completos, como en Jales, Valongo o Tresminas, Portugal.

** Hallazgos personales sin referencia bibliográfica.

construcción y funcionamiento, en donde se aprecia ya una amplia distribución geográfica por todo el Noroeste Ibérico, siempre en relación con yacimientos primarios y el procesado de las menas obtenidas por medios manuales, bien en superficie, bien en subterráneo, en algunos casos tras la explotación hidráulica superficial de las zonas de alteración.

La utilización excepcional de rocas procedentes de más de un centenar de kilómetros en la confección de molinos rotativos como son los conglomerados opalinos, sorprende y a la vez muestra el establecimiento de relaciones con zonas distantes, ajenas por completo al entorno de los grandes centros de minería aurífera romana, cuyas razones quedan pendientes de determinar.

Aunque el hallazgo de restos de elementos de molienda no se ha verificado todavía en todos los yacimientos primarios trabajados en época romana en el NO Ibérico, es de esperar que su búsqueda sistemática arrojará sin duda unos resultados análogos.

Agradecimientos y financiación

Agradezco a los diferentes autores que, al margen de los textos de sus publicaciones, han contribuido con información personal, como Evaristo Álvarez, Alexandre Lima, Mirian De Cabo y Juan Carlos Garrido, enriqueciendo notablemente este trabajo. Igualmente, agradezco a los revisores su dedicación y criterio.

La presente investigación no ha recibido ayudas específicas provenientes de agencias del sector público, sector comercial o entidades sin ánimo de lucro.

Referencias

- Almeida, F., 1970. Minas de Ouro na Gallaecia Portuguesa. Legio VII Gémima. Cátedra de San Isidoro, León. 287-300.
- Álvarez, E., González Fernández, B., Menéndez Casares, E., 2019. Nuevos datos y reinterpretación de las antiguas labores mineras de Salave (Tapia de Casariego, Asturias). Actas del XVIII Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero, SEDPGYM, 53-64.
- Álvarez, E., González Fernández, B., Menéndez Casares, E., 2020. Morteros mineros antiguos de la Cala del Figo (Salave, Asturias). Nailos: Estudios Interdisciplinares de Arqueología 7: 35-55.
- Braz, C.M., 2005. A exploração mineira romana e a metalurgia do ouro em Portugal. Tesis Doctoral inédita Faculdade de Letras da Universidade do Porto. 2 tomos: 214 + 645 p.
- Buiskikh, A.A., 2015. Placer-forming flows and mudflows as viscous fluids in river valleys. Russian Geology and Geophysics 56 (12): 1749-1756.
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.11.007>.
- Del Mar, A., 1902. A History of the Precious Metals from the Earlier Times to the Present. Cambridge Encyclopedia Company, New York, 489 p.
- Domergue, C., 1986. Dix-huit ans de recherche (1968-1986) dans les mines d'or romaines du nord-ouest de la Péninsule Ibérique. Actas del I Congreso Internacional Astorga Romana, T-II: 7-101.
- Domergue, C., 1987. Catalogue des mines et fonderies antiques de la Péninsule Ibérique. Madrid. Casa de Velázquez, Série Archéologie, 8. 2 Vol: 244 p. + 117 p.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G., Robert, F., 1998. Orogenic Gold Deposits: A proposed classification in the context of their crystal distribution and relationship to other gold deposit types. Elsevier, Ore Geology Reviews, 13: 7-27.
[https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(97\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00012-7)
- Klemm, R., Klemm, D., 2013. Gold and Gold Mining in Ancient Egypt and Nubia. Springer, Berlin, 649 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-22508-6>
- Krestschmar, U., McBride, D., 2016. The Metallogeny of Gold Deposits: a Syngenetic Perspective. Elsevier, Amsterdam, 339 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803222-0.00009-5>
- Large, R.R., Bull, S.W., Maslennikov, V., 2011. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits: Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 106: 331-358.
<https://doi.org/10.2113/econgeo.106.3.331>
- Lima, A., Matías, R., Félix, N., Silva, M.A. 2010. A Mineração Romana de Ouro no Município de Paredes: O exemplo da Serra de Santa Iria e Serra das Banjas. Actas del VI Simposio Internacional sobre la Minería y Metalurgia Antiguas en el Suroeste Europeo. SEDPGYM, 125-142.
- Luis, De, J., 2020. Carazas: Minería aurífera romana en Ciudad Rodrigo. Revista del Centro de Estudios Mirobrigenses, 7: 29-60.
- Luzón, J.M., Sánchez-Palencia, F.J., Acuña, F., 1980. El Caurel. Ministerio de Cultura. Subdirección General de Arqueología. EAE 101. Madrid, 155 p.
- Macdonald, E.H., 1983. Alluvial Mining. Chapman and Hall Ed., London-New York, 508 p.
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-5361-6>
- Madruga, F., 1991. Rocas opalinas del Oeste de España. Aplicación como materiales de construcción y evaluación de su puzolanidad por técnicas conductimétricas. Junta de Castilla y León, Consejería de Fomento. Ed. Ámbito, Valladolid, 94 p.
- Matías, R. 2008: El complejo de minería aurífera romana de Llamas de Cabrera (León). Revista del Instituto de Estudios Bercianos nº 32-33. Peñalba Impresión. Ponferrada-León. pp.17-52
- Matías, R., 2010. Los yacimientos auríferos primarios de la provincia de León (España): técnicas de explotación romana. Actas 1º Congresso Internacional Povoamento e Exploração dos Recursos Mineiros na Europa Atlântica Occidental, Braga, 155-178.
- Matías, R., 2014a. La investigación de la minería aurífera romana en España: planteamientos del pasado y nuevas perspectivas. Atas do Simpósio Internacional Paisagens Mineiras Antigas na Europa Occidental. Boticas, Portugal, 29-64.
- Matías, R., 2014b. La minería del oro en el Imperio Romano y su puesta en valor: contextualización e importancia de la minería aurífera romana del área Valongo-Paredes. Actas del 1º Congresso Mineráçao Romana en Valongo. Valongo, Portugal, 3-39.
- Matías, R., 2013. Minería aurífera romana en el área Salientes-Villablino (León-España). Actas del XIV Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero, Castrillón, Asturias, SEDPGYM, 631-648.
- Matías, R., 2021. La Minería Aurífera Romana del Noroeste Hispano: una visión desde la Ingeniería de Minas actual. Tesis Doctoral. Univ. Politécnica de Madrid, 377 p.
<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.69222>
- Matías, R., González-Nistal, S., 2014. Minería aurífera romana en el campo filoniano Lucillo-Villalibre. Sierra del Teleno (León-España). Actas del XV Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero, Logrosán, Cáceres, 499-

- 518.
- Matías, R., Fonte, J., Lima, A., Monteiro, A., Granda, V., Moutinho, J., Silva, J., Aguiar, P., 2014. Evidencias de minería hidráulica romana en la Sierra de Pias (Valongo, Portugal). Actas del XV Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero, Logrosán, Cáceres, 481-498.
- Maya, J.L., 1990. La explotación minera y la metalurgia romana en Asturias. Historia de Asturias. Oviedo, Vol I, 192-212.
- Meléndez, R., 1993. Historia de la Antigua Real Villa de Castropodame. Peñalba Impresión, Ponferrada, 601 p.
- Pascual, G., 2019. Canales romanos inéditos en la minería aurífera romana del Baixo Miño. Boletín Instituto de Estudios Vigueses, 23, 18: 49-124.
- Pérez, M., Matías, R., 2008. Plinio y la minería aurífera romana: nueva traducción e interpretación de Plin.Nat.33.66-78. Cuadernos de Filología Clásica. Estudios Latinos, 28(1): 43-58.
- Ridley, J., 2013. Ore Deposits Geology. Cambridge University Press, Colorado, 410 p.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139135528>
- Sánchez-Palencia, F.J., 1985. Los morteros de Fresnedo (Allande) y Cecos (Ibias) y los lavaderos de oro romanos en el norte de la Península Ibérica. Zephyrus, 37-38: 349-359.
- Sánchez-Palencia, F.J. (Ed.), 2000. Las Médulas (León). Un paisaje cultural en la “Asturia Augustana”. León: Instituto Leonés de Cultura, 362 p.
<https://doi.org/10.3989/tp.2000.v57.i2.257>
- Sánchez-Palencia, F.J., Beltrán, A., Pecharromán, J.L., Romero, D., Currás, B., 2014. La minería romana de Pino del Oro y su entorno inmediato (Zamora). En: Minería en zonas interfronterizas de Castilla y León y Portugal (Asturias y NE de Lusitania), (F.J. Sánchez-Palencia, Ed.). Junta de Castilla y León, Valladolid, 181-216.
- Sánchez-Palencia, F.J., Orejas, A., Sastre, I., Pérez, L.C., 2006. Las zonas mineras romanas del noroeste peninsular: infraestructura y organización del territorio. Nuevos elementos de Ingeniería Romana. Congreso Europeo las Obras Públicas Romanas. Junta de Castilla y León. Valladolid, 265-285.
- Villa, A., 2010. El oro en la Asturias Antigua: beneficio y manipulación de los metales preciosos en torno al cambio de era. En: Cobre y Oro. Minería y metalurgia en la Asturias antigua y prehistórica (J. Fernández-Tresguerres, Ed.). Real Instituto de Estudios Asturianos, Oviedo, 83-125.
- Wahl, J., 1988. Três Minas. Vorbericht über die archäologischen Ausgrabungen im Bereich des römischen Goldberwerks 1986/87. Deutsches Archäologisches Institut. Madrid. Mardider Mitteilungen 29: 221-244.
- Wahl, J., 1998. Aspectos tecnológicos da industria mineira e metalúrgica romana de Três Minas e Campo de Jales (Concelho de Vila Pouca de Aguiar). Actas do Seminário Museologia e Arqueología Mineiras, Lisboa, IGM, 57-68.

MANUSCRITO RECIBIDO: 13-02-2025

REVISIÓN RECIBIDA: 12-03-2025

ACEPTACIÓN DEL MANUSCRITO REVISADO: 22-08-2025



NUEVAS EVIDENCIAS DE MINERÍA AURÍFERA ANTIGUA EN LA SIERRA DE LA CULEBRA (ZAMORA, ESPAÑA)

New evidences of ancient gold mining in the Sierra de la Culebra (Zamora, Spain)

Rodrigo Andrés-Bercianos¹ y Javier Fernández-Lozano²

¹ Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC), c/ Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid.

r.andres@igme.es

² Escuela Superior y Técnica de Ingenieros de Minas, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n, 24007 León.

jferl@unileon.es

Resumen: El noroeste peninsular se caracteriza por la presencia de numerosos indicios de minería aurífera antigua, localizándose en la zona aurífera de Pino del Oro y en la vertiente sur de la sierra de La Cabrera los principales restos estudiados en la provincia de Zamora. Sin embargo, recientemente se han descrito en la sierra de la Culebra otras labores, localizadas en el entorno de Ferreras de Arriba, documentando en este trabajo nuevos vestigios situados junto a la localidad de Villanueva de Valrojo y en las proximidades del arroyo de Becerril (municipio de Riofrío de Aliste). Para ello, se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis del territorio, considerando aspectos geológicos y de la ingeniería minera, mediante el estudio estratigráfico, la fotointerpretación aérea y el uso de nuevas tecnologías. En estos sectores se constata la realización de zanjas-canal, zanjones y pequeñas cortas de arrastre, con el objetivo de lavar los depósitos de tipo coluvial y aluvial —llegando a alcanzar, incluso, el basamento paleozoico—. Estas labores mineras pudieron llevarse a cabo a partir del trazado de una red hidráulica que, en muchos casos, se abastece de la captación de los arroyos circundantes. Por tanto, se pone de manifiesto la importancia de documentar los restos y extrapolar esta línea de investigación a otros sectores de la sierra de la Culebra, contribuyendo a garantizar la preservación de todo el conjunto y a mejorar el conocimiento de los paisajes culturales asociados a la minería del oro en época antigua.

Palabras clave: minería aurífera antigua, estratigrafía, LiDAR, drones, sierra de la Culebra.

Abstract: The northwestern region of the Iberian Peninsula is known for its significant presence of historical gold mining remnants. In the province of Zamora, research has primarily focused on the remains discovered in the gold-rich area of Pino del Oro and on the southern slopes of the La Cabrera mountain range. However, recent findings have revealed additional mining sites within the Sierra de la Culebra, particularly around Ferreras de Arriba, shedding light on new vestiges situated near the village of Villanueva de Valrojo and in the vicinity of the Becerril stream (municipality of Riofrío de Aliste). To investigate these sites, a comprehensive analysis of the region has been conducted, incorporating geological and mining engineering perspectives. This analysis has involved stratigraphic research, aerial photo-interpretation, and the utilization of cutting-edge technologies. In these areas, evidence of open-cut mining, trenches, and trenches-channel has been confirmed, indicating the purpose of washing the colluvial and alluvial deposits,

even reaching the Paleozoic bedrock in some cases. These mining activities were made possible through the development of a hydraulic network, often supplied by the catchment nearby streams. Therefore, documenting these remnants and expanding research efforts to other areas within the Sierra de la Culebra is crucial. This initiative not only aids in preserving the entire mining complex but also enhances our understanding of the cultural landscapes associated with ancient gold mining practices.

Keywords: ancient gold mining, stratigraphy, LiDAR, UAV, Sierra de la Culebra.

Andrés-Bercianos, R., Fernández-Lozano, J., 2025. Nuevas evidencias de minería aurífera antigua en la sierra de la Culebra (Zamora). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 38 (2): 47-62.

Introducción y objetivos

El oro es un metal que ha despertado interés desde tiempos prehistóricos debido a su color, su escasez y su facilidad para ser trabajado, destacando su uso desde la antigüedad para la acuñación de moneda y en orfebrería (Sánchez-Palencia *et al.*, 2006). En este sentido, en la provincia de Zamora se han descubierto piezas históricas de gran valor fabricadas con este metal, como es el caso de los tesorillos prerromanos de Arrabalde (Perea y Rovira, 1995) o del tesorillo visigodo de Villafáfila (Fernández, 1990). Con respecto a este último, estudios arqueometalúrgicos sugieren que las cruces que lo componen podrían haberse confeccionado con oro de tipo aluvial y no de mina, debido a que se detectó también la presencia de pequeñas concentraciones de estaño, cuyo origen podría estar relacionado con la presencia de casiterita en las arenas ribereñas (Rovira *et al.*, 1990). Además, se señala que las cruces de Villafáfila pudieron haberse confeccionado con oro nativo peninsular, quizás procedente de los placeres leoneses o asturianos (Rovira *et al.*, 1990). No obstante, se ha constatado el beneficio de oro asociado a placeres fluviales de la provincia de Zamora desde época prerromana (Sánchez-Palencia *et al.*, 2018), sugiriendo también un potencial aprovechamiento de los placeres de estaño del suroeste de la provincia (Sánchez-Palencia y García de los Ríos, 2007). En este sentido, Esparza ya planteó en la década de los 80 del siglo XX la posibilidad de que la explotación aurífera romana hubiera estado precedida por un conocimiento del oro por parte de los castreños que habitaban los castros de la Edad del Hierro del noroeste de la provincia de Zamora (Esparza, 1986). Pese a ello, los estudios detallados que abordan el aprovechamiento del oro en época antigua en la provincia de Zamora se limitan principalmente a la zona minera de Pino del Oro (Sánchez-Palencia *et al.*, 2010, 2014, 2018) y a la vertiente sur de la sierra de la Cabrera (Esparza, 1984, 1986; Currás *et al.*, 2014; Fernández-Lozano *et al.*, 2019; Andrés-Bercianos *et al.*, 2019, 2021a, 2021b; Andrés-Bercianos y Fernández-Lozano, 2024). En consecuencia, persiste un importante vacío documental en cuanto a la identificación, el estudio sistemático y la documentación de labores de minería aurífera antigua en otros sectores de la provincia. Un claro ejemplo es la sierra de la Culebra, que es la principal alineación montañosa que vertebría el centro con el noroeste de la provincia de Zamora, la cual presen-

ta elevaciones que, en algunos casos, superan los 1200 m de altitud. En este sentido, fruto de una investigación realizada a partir de las observaciones efectuadas por Esparza (1986) en el entorno del Castro de Ferreras de Arriba, recientemente se han descrito dos sectores con presencia de labores de minería aurífera antigua en la sierra de la Culebra: Valdemanzanal y Valdemolinos (Andrés-Bercianos y Fernández-Lozano, 2025). En concreto, estas labores mineras se caracterizan por la presencia de zanjas-canal con las siguientes características (Andrés-Bercianos y Fernández-Lozano, 2025): i) no discurren de forma perpendicular a las curvas de nivel, salvo en su tramo final, a diferencia de lo que ocurre en procesos naturales (p. ej., escorrentía); ii) presentan un mayor desarrollo en zonas de interflujo; iii) están interconectadas entre sí; y iv) se inician en las zonas topográficamente más elevadas de cada sector. También se ha observado que el inicio de la red hidráulica de abastecimiento pudo estar asociado a pequeños estanques de los que parten los canales, a día de hoy bastante colmatados y afectados por la actividad antrópica reciente, que condujeron el agua hasta las zonas de lavado de los potenciales depósitos auríferos, en las cuales se desarrollaron diversos trabajos hidráulicos de erosión, utilizando técnicas mineras como zanjas en “cola de caballo” (Andrés-Bercianos y Fernández-Lozano, 2025). Asimismo, ha quedado patente sobre el terreno la incisión asociada a los trabajos hidráulicos de erosión, de hasta algo más de 8 m de profundidad y 40 m de anchura en algunos casos, así como la presencia de estériles de tipo minero (Andrés-Bercianos y Fernández-Lozano, 2025). Por tanto, el presente trabajo se plantea con el objetivo de identificar y documentar la existencia de nuevas labores de minería aurífera antigua en otros sectores de la sierra de la Culebra, así como describir los potenciales depósitos auríferos asociados. Por ello, en este estudio se ha continuado con la investigación sistemática en otros sectores colindantes con el área recientemente estudiada —ubicada al norte de Ferreras de Arriba—, situados al norte (Valrojo) y al sur (arroyo de Becerril) de la misma (Fig. 1).

Contexto geológico y metalogenético

Geológicamente, la sierra de la Culebra forma parte del Dominio del Ollo de Sapo (DOS), perteneciente a la Zona Centroibérica (ZCI) del Macizo Ibérico (Julivert *et al.*, 1972; Azor *et al.*, 1992). En concreto, la sucesión es-

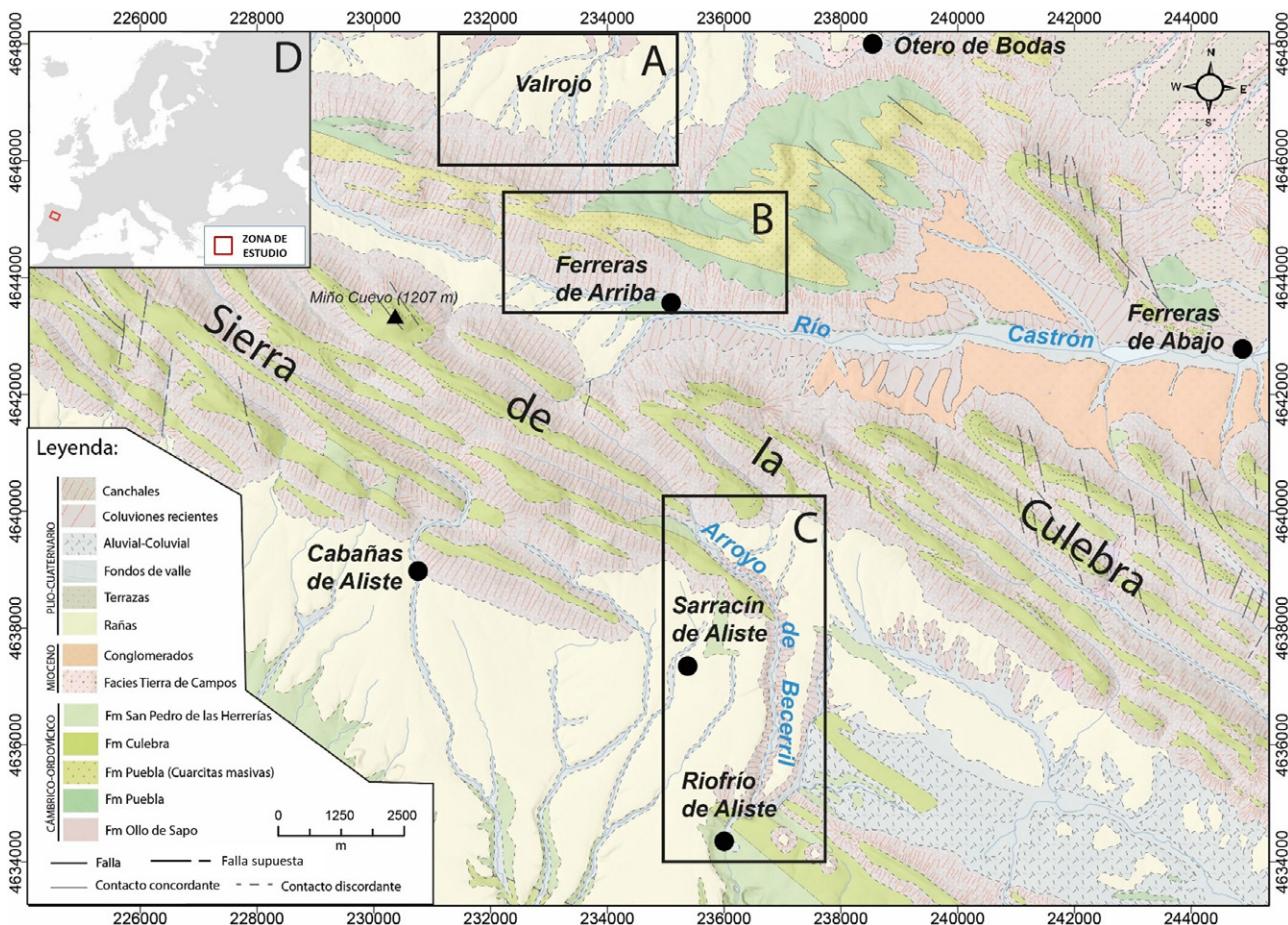


Fig. 1.- Sectores estudiados en esta investigación. A. Valrojo. B. Ferreras de Arriba (recientemente estudiado por Andrés-Bercianos y Fernández-Lozano, 2025). C. Arroyo de Becerril. Base geológica obtenida de la cartografía geológica digital GEODE (2025). D. Mapa de localización de la zona de estudio (noroeste de la Península Ibérica).

tratigráfica en la zona de estudio se inicia con la Fm. Ollo de Sapo, unidad de edad Cámbrico Medio a Ordovícico Inferior constituida en el entorno de Villanueva de Valrojo (flanco S del Antiforme del Ollo de Sapo) por ortogneises glandulares y tobas volcánicas (Díez-Montes, 2006). A techo de la Fm. Ollo de Sapo aflora la Fm. Puebla (Martínez-García, 1973), también denominada Capas de los Montes en el Antiforme del Ollo de Sapo (Díez-Montes, 2006) o Fm. Santa Eufemia en el Sininforme de Alcañices (Vacas y Martínez-Catalán, 1987; González-Clavijo, 1997). Esta formación, de edad Ordovícico Inferior, se caracteriza por la presencia de pizarras y esquistos con intercalaciones de cuarzoarenitas y cuarcitas, definiéndose recientemente como “miembro Litos” al tramo de cuarcitas blancas masivas existente (González-Clavijo *et al.*, 2024). A techo de la Fm. Puebla se dispone una formación constituida fundamentalmente por cuarcitas blancas, de edad Ordovícico Inferior, denominada Fm. Culebra (Martínez-García, 1973), que también es conocida como Cuarrita Armoricana (Barrois, 1882) o Fm. Peña Gorda en el Sininforme de Alcañices (Vacas y Martínez-Catalán, 1987; González-Clavijo, 1997). Finalmente, a techo de la Fm. Culebra aflora la Fm. San Pedro de las Herrerías (Martínez-García, 1973), conocida desde antiguo como Pizarras de Luarca (Barrois, 1882), la cual es equivalente a la Fm. Villaflor en el Sininforme de Alcañices (González-Clavijo,

1997). Esta formación, de edad Ordovícico Medio-Superior, se inicia con niveles alternantes de cuarcitas y pizarras (serie de Transición) que gradualmente pasan a pizarras negras y grises con intercalaciones de cuerpos de areniscas.

Estructuralmente, los materiales Paleozoicos presentes en la sierra de la Culebra se encuentran afectados por la orogenia Hercínica o Varisca, responsable de su plegamiento (González-Clavijo, 1997). Sin embargo, también existió una fracturación tardivarísca, con planos subverticales y direcciones ortogonales a las del plegamiento de la primera fase de deformación varisca (D1), así como movimientos posteriores durante la orogenia Alpina, que configuraron el relieve en sierras y depresiones (Arce *et al.*, 1981; González-Clavijo, 1997). Geomorfológicamente, las cuarcitas de la Fm. Puebla (miembro Litos) y de la Fm. Culebra constituyen las zonas topográficamente más elevadas de la sierra (cuya línea de cumbres sigue una dirección predominante NO-SE), aflorando las litologías pizarrosas en las zonas deprimidas. Discordante sobre esta sucesión paleozoica, se dispone una sucesión cenozoica formada por depósitos pliocuaternarios de tipo raña o cuaternarios coluviales y aluviales, que cubren paleorrelieves y favorecen la incisión de la red fluvial actual (Martín-Serrano, 1988).

Desde un punto de vista metalogenético, la práctica totalidad de los indicios presentes en la sierra de la Culebra corresponden a yacimientos de hierro (Florido *et al.*,

2002). Estas mineralizaciones se sitúan en tramos a techo de la Fm. Culebra (Cuarcita Armoricana) y son de morfología estratiforme, donde el hierro puede llegar a constituir capas masivas con gran continuidad lateral de hasta 1,5 m de potencia (Florido *et al.*, 2002). La mineralización presenta un contenido medio en hierro (Fe_2O_3) del 64,89 %, una estructura bandeadas, una textura granoblástica y la magnetita es el mineral primario principal, cuyos cristales u oolitos están totalmente transformados en hematites, goethita y limonita (Fernández-Fernández *et al.*, 1995). Para su aprovechamiento, se conoce la existencia en la zona de numerosas labores mineras (p. ej., trincheras, calicatas o galerías), estando datadas algunas de ellas en época romana o medieval, gracias a su asociación con numerosos escoriales (Larrazábal, 1995, 1996; Florido *et al.*, 2002). No obstante, el hierro y el oro presentan afinidad geoquímica siderófila (Boyle, 1979), constatándose en áreas circundantes a la sierra de la Culebra la existencia contigua de indicios de ambos elementos (Tornos, 1993; Florido *et al.*, 2002; Fernández-Lozano *et al.*, 2016). En este sentido, dentro del sector noroccidental del Macizo Ibérico, la localización de los principales yacimientos primarios está condicionada por la presencia de estructuras que favorecen la circulación de fluidos hidrotermales (mesotermiales) responsables de los diferentes tipos de mineralización aurífera (Boixet, 2015). Con respecto a los yacimientos de oro primario orogénicos (OGD), definidos por Groves *et al.* (1998), Caldevilla (2023) afirma que en el Sinclinal de Truchas (ZCI) están relacionados con fluidos metamórficos. Estos depósitos consisten en venas de cuarzo que contienen Au y están encajadas en metasedimentos siliciclásticos (principalmente en la Cuarcita Armoricana), pudiendo estar ubicada la fuente de Au, en parte, en las pizarras negras de la Fm. Luarca (Caldevilla, 2023). Por otra parte, para el noroeste de la cuenca del Duero algunos trabajos proponen la presencia de placeres formados a partir de la meteorización del zócalo Paleozoico, fundamentalmente de la Serie de los Cabos de la Zona Asturoccidental-Leonesa (ZAOL) —cuyo equivalente en la ZCI son las Capas de los Montes (Fm. Puebla)— (IGME, 1982). Asimismo, en yacimientos auríferos de tipo secundario se ha planteado la hipótesis de que, en muchos casos, las mayores concentraciones de partículas de oro se sitúan en las proximidades del lecho de roca (*bedrock*) o en la base de las secuencias (IGME, 1982). No obstante, a día de hoy todavía se desconocen las leyes o tenores auríferos asociados a las Unidades Litoestratigráficas (ULE) de la sierra de la Culebra, puesto que, a diferencia de otras zonas del noroeste peninsular, todavía no se ha realizado ningún estudio específico al respecto.

Metodología

Para satisfacer los objetivos de este trabajo, relativos a la identificación y documentación de nuevas labores de minería aurífera antigua en la sierra de la Culebra, se planteó una metodología que combinaba técnicas de campo y de gabinete (Fig. 2). En primer lugar, se efectuó una revisión de antecedentes que incluyó la búsqueda de información en el visor de patrimonio cultural de la Junta de Castilla



Fig. 2.- Diagrama de flujo de la metodología empleada en esta investigación.

y León sobre los asentamientos y lugares de transformación de materias primas presentes en los sectores objeto de estudio, así como sobre su perímetro de protección como yacimientos arqueológicos (JCYL, 2025). A continuación, como punto de partida para la identificación y estudio de formas del relieve antrópicas potencialmente asociadas a la minería, se efectuó un reconocimiento inicial utilizando la primera fotografía aérea histórica existente: la serie A del vuelo americano de 1945-1946 (CNIG, 2025b). No obstante, como base para este trabajo se utilizó la fotografía aérea histórica asociada a la serie B del vuelo americano de 1956-1957 (CNIG, 2025b), dada su excelente resolución. Por otra parte, el uso de datos LiDAR, procedentes de los vuelos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) desarrollado por el Instituto Geográfico Nacional (1^a y 2^a cobertura) (CNIG, 2025c), en la que se procesa y filtra una nube de puntos de 0,5-2 p/m² y precisión 40-20 cm, permitió elaborar un modelo digital del terreno (MDT) con un paso de malla de 1 m. Este MDT, al que se le aplicó un tratamiento con técnicas de mejora de la imagen siguiendo la metodología desarrollada por Fernández-Lozano y Gutiérrez-Alonso (2016) para el estudio de este tipo de restos mineros, complementa la identificación realizada mediante fotografía aérea histórica. Asimismo, en la cartografía elaborada en este trabajo se optó por incluir referencias a los elementos fluviales y de escorrentía superficial y/o a la toponimia presente en minutias cartográficas históricas (CNIG, 2025a), ya que en muchos casos guardan una estrecha relación con la minería aurífera antigua. Además, a escala cartográfica, se utilizó una equidistancia de 10 m entre curvas de nivel (CNIG, 2025d), de manera que facilitase la identificación de los diferentes elementos antrópicos sobre un mapa topográfico. Todo ello siguiendo la metodología descrita en otros trabajos previos sobre minería aurífera en el noroeste peninsular, en los cuales la huella de la explotación minera antigua puede inferirse a partir de la cartografía de formas geomorfológicas asociadas (Fernández-Lozano y Gutiérrez-Alonso, 2016; Fernández-Lozano *et al.*, 2020; Andrés-Bercianos y Fernández-Lozano, 2025). Posteriormente, es fundamental complementar las observaciones realizadas en gabinete (combinación de LiDAR y fotografía aérea actual e histórica) con el reconocimiento *in situ* en campo, para corroborar la presencia de los elementos

asociados a las potenciales labores mineras. Asimismo, se incluyó el uso de drones, lo que permitió mejorar la descripción de la infraestructura minera asociada a las labores identificadas (p. ej., mediante la visualización *in situ* o la realización de fotografía aérea oblicua). Por otra parte, se reconocieron las distintas ULE presentes en la zona, con el fin de realizar una descripción estratigráfica, apoyada con análisis granulométricos, de los depósitos susceptibles de ser considerados como placeres auríferos. Finalmente, se estableció una correlación entre la infraestructura minera asociada a las labores y las características de los potenciales depósitos auríferos descritos, de la cual se extrajeron las conclusiones.

Descripción de potenciales elementos de minería aurífera antigua sobre el paisaje

Para ahondar en detalles sobre la presencia de nuevas labores de minería aurífera en la sierra de la Culebra, procedemos al estudio pormenorizado de los dos sectores ya indicados: Valrojo y arroyo de Becerril.

Sector de Valrojo

El sector de Valrojo se ubica al sur de la localidad de Villanueva de Valrojo y abarca, aproximadamente, el área comprendida entre dicha localidad, como límite al norte, y el trabajo previo de Andrés-Bercianos y Fernández-Lozano (2025), como límite al sur (Fig. 1). Como característica común de estas labores mineras, destaca que la red hidráulica de abastecimiento siempre comienza con la captura de pe-

queños arroyos (Fig. 3). No obstante, la red de drenaje de la que se abastecen las labores ha tenido un corto recorrido previo a su captura, puesto que su nacimiento se identifica en manantiales próximos. Como criterio para proceder a su estudio, la descripción de las labores mineras se va a realizar en función de su situación geográfica, partiendo del extremo occidental al oriental de este sector. En este sentido, la labor minera más occidental se inicia en un canal de abastecimiento que capta, por su margen derecha y a una cota aproximada de 878 m s.n.m., a un afluente del regato Toza de la Yegua. Discurre durante 2,5 km por el interfluvio asociado a este curso fluvial y al del regato de Vega de los Prados, finalizando en un conjunto de trabajos hidráulicos de erosión asociados a zanjas con surcos divergentes. Con respecto a este canal de abastecimiento, hay que indicar que, entre su tramo inicial e intermedio, discurre de forma paralela a otro relativamente reciente, el cual no se identifica en la serie A del vuelo americano de 1945-1946 (CNIG, 2025b), a diferencia del que condujo el agua a las labores. La segunda zona identificada con trabajos hidráulicos de erosión se abastece de la captura, por su margen izquierda y a una cota aproximada de 848 m s.n.m., de un afluente del regato Vega de los Prados. Tras 500 m de recorrido, el canal asociado a la red hidráulica de abastecimiento se ramifica en surcos divergentes, cuyo objetivo era la erosión por lavado del depósito sedimentario. Más al este se ha identificado otro canal de abastecimiento que, en este caso, capta al arroyo de las Forcadas por su margen izquierda, a una cota aproximada de 868 m s.n.m. En este caso, tras recorrer una distancia de 800 m, es muy llamativo el codo que efectúa la zanja-canal principal, cuya

incisión en el terreno llega a superar los 4 m de profundidad y los 25 m de anchura (Fig. 4A). Paralela a la zanja-canal anterior, se ha identificado otra secundaria que desagua en la principal antes de que esta efectúe el codo. Finalmente, se identifica un último canal, cuyo inicio se ubica en una zona de manantiales situada al este del paraje del Gejo, a una cota aproximada de 870 m s.n.m. Tras un recorrido de 800 m, capta también al arroyo de las Forcadas, prosiguiendo durante otros 500 m más por el interfluvio asociado a dicho arroyo y al del afluente del regato Vega de los Prados, hasta la cota 840 m s.n.m. Llegados a este punto, el canal se divide en dos, bordeando ambos el perímetro asociado a la cabecera de una corta de arrastre: uno hacia el noreste y el otro hacia el noroeste, el cual se ramifica en zanjas con surcos divergentes antes de finalizar. El canal anteriormente indicado que proseguía hacia el noreste llegaba hasta las labores ubicadas en el paraje de las Forcadas, sirviendo también

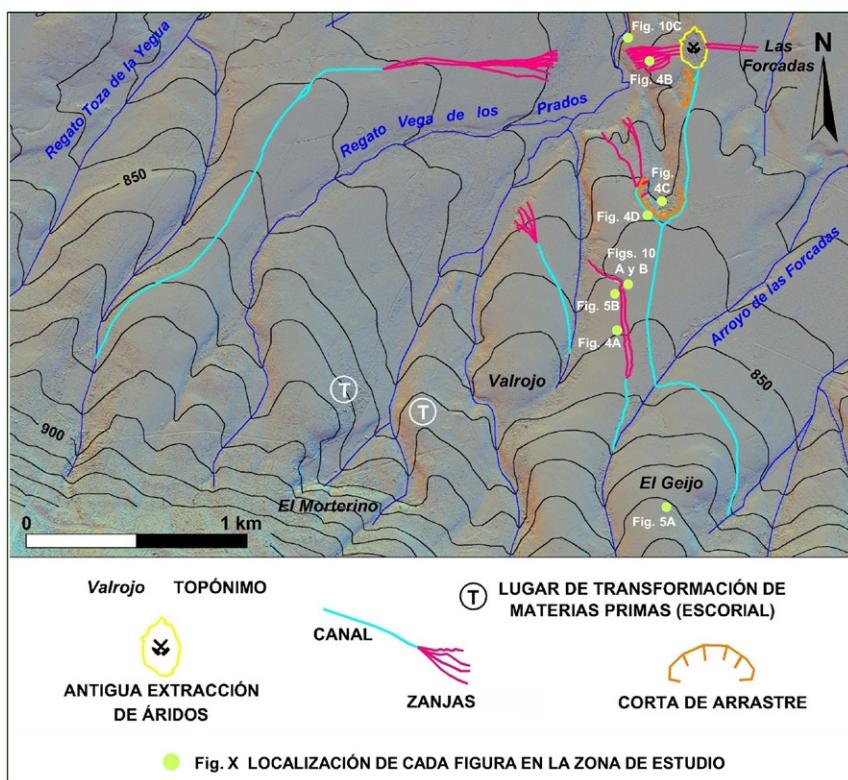


Fig. 3.- Representación de la traza de las labores de minería aurífera antigua identificadas en el sector de Valrojo. Base: imagen LiDAR (CNIG, 2025c).

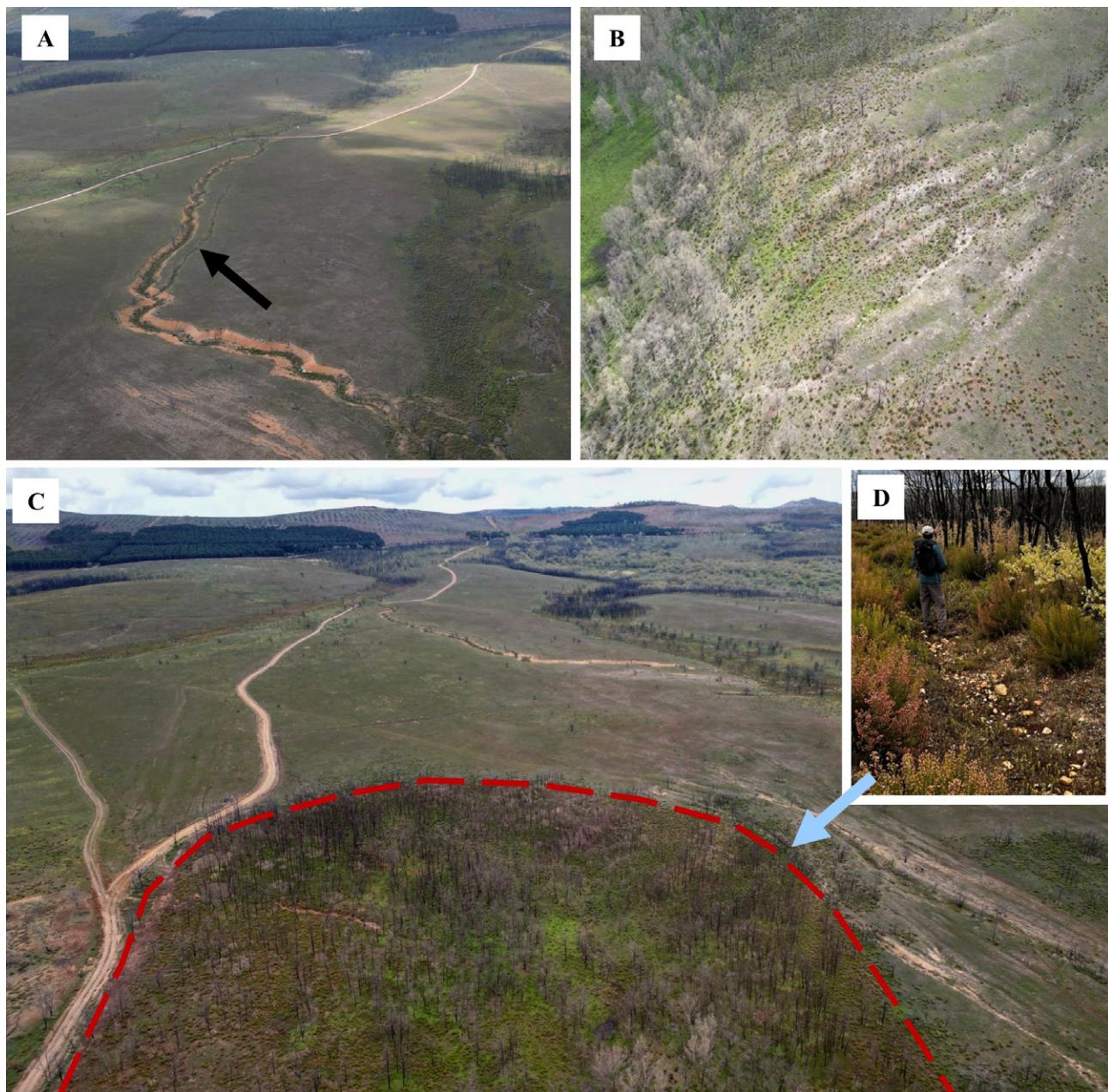


Fig. 4.- Aspecto de algunas de las labores mineras presentes en el sector de Valrojo. **A.** Zanja-canal con codo en su tramo final. Paralela a esta, se ha identificado otra secundaria (flecha negra) que desemboca en la principal antes de que esta efectúe el codo. **B.** Zanjas en forma de surcos divergentes al oeste del paraje de Las Forcadas. **C.** Corta de arrastre (indicada con línea discontinua y sombreado rojo). **D.** Aspecto de uno de los canales que discurren por el perímetro exterior de la corta de arrastre anterior (flecha azul), utilizados para el abastecimiento de los trabajos hidráulicos de erosión.

de abastecimiento de otras dos pequeñas cortas de arrastre previas. En las Forcadas se identifican dos zanjas en dirección este y numerosas zanjas en forma de surcos divergentes que parten hacia el oeste (Fig. 4B). No obstante, su tramo superior se encuentra destruido por lo que se presupone que fue una antigua extracción de áridos, la cual no consta en ningún inventario, a diferencia de otras cercanas de cronología más reciente, de las que sí figura su registro (IGME, 1972; IGME, 2025). Asimismo, se ha constatado su presencia en la primera fotografía aérea existente: la serie A del vuelo americano de 1945-1946 (CNIG, 2025b). Por tanto, no descartamos que, en su origen, pudiera haber estado relacionada con la extracción de áridos para la cons-

trucción de la Vía XVII del itinerario de Antonio, cuyo trazado discurre a escasos metros de las labores mineras y que unía *Bracara Augusta* con *Asturica Augusta* (Loewinsohn, 1965). Con respecto a la corta de arrastre anteriormente indicada, tal y como se señaló, su cabecera se identifica a una cota aproximada de 840 m s.n.m. y presenta una morfología semicircular (Fig. 4C), discurriendo los canales ya descritos por el exterior de su perímetro, los cuales también servían para el abastecimiento de la explotación (Fig. 4D). Presenta una anchura de 200 m y una profundidad de hasta 15 m, fruto de los trabajos hidráulicos de erosión que allí se desarrollaron.

Una vez descritas las labores mineras identificadas en

este sector de Valrojo, se comprueba que la red hidráulica de abastecimiento presenta una pendiente cercana al 2 %. No obstante, lo prioritario era conducir el agua erosionando lo menos posible, a diferencia de los tramos finales de la red, donde el objetivo era erosionar el terreno. Por ello, las zanjas asociadas a los trabajos hidráulicos de erosión presentan una pendiente mayor, que llega a alcanzar el 6 %. No obstante, la red hidráulica en todo este sector se encuentra en un avanzado estado de colmatación y parcialmente conservada. Asimismo, puntualmente se han identificado junto a las labores depósitos antrópicos, que con toda probabilidad corresponden a estériles de tipo minero (murias), constituidos por acumulaciones de bloques y cantos, que en ciertos casos alcanzan los 25 cm de tamaño.

Otro aspecto a reseñar es la toponimia circundante a las labores mineras, con ejemplos como El Morterino, Las Forcadas o El Gejo (Fig. 5A). Dichos topónimos son recurrentes en otras zonas con presencia de minería aurífera antigua en el noroeste peninsular, al igual que el propio nombre con el que se conoce a este sector (Valrojo). Según Riesco (2018), el topónimo Valrojo expresa generalmente la coloración del terreno, en referencia a su cromatismo “rubeus”, rojo o rojizo (Fig. 5B). En este sentido, Pérez-García y Sánchez-Palencia (2000) afirman que la coloración rojiza de los depósitos, producto de procesos de rubefacción (Fernández-Lozano *et al.*, 2016), pudo ser un factor que llamara la atención de los prospectores en época antigua, además de la experiencia acumulada sobre su posible valor aurífero.

Sector del arroyo de Becerril

Dentro de este sector del arroyo de Becerril se han incluido diversas labores identificadas en las proximidades de las localidades de Sarracín de Aliste y Riofrío de Aliste (Fig. 1). En concreto, el arroyo de Becerril, también llamado “río Frío”, nace en la fuente de Moya Pan, según minutas cartográficas históricas (CNIG, 2025a). En este sentido, parte de las labores identificadas se encuentran próximas a su nacimiento, en las cercanías de ambas márgenes del arroyo (Fig. 6). La primera de ellas se abastece

de la captura, por su margen derecha y a una cota aproximada de 927 m s.n.m., de un afluente del arroyo de la Mouta (Fig. 7). Tras 450 m de recorrido, el canal asociado a la red hidráulica de abastecimiento (Fig. 8A), identificable en la fotografía aérea histórica por la anomalía visible de coloración negruzca asociada a una mayor presencia de humedad, finaliza en una pequeña corta de arrastre (Fig. 8B), situada en la margen izquierda del arroyo de Becerril. Presenta una anchura de 40 m y una profundidad de hasta 7 m, fruto de los trabajos hidráulicos de erosión que allí se desarrollaron, intuyéndose en la fotografía aérea asociada a la serie B del vuelo americano de 1956-1957 (CNIG, 2025b) lo que podría corresponder con un pequeño estanque en cabecera. Asimismo, se ha identificado la traza de otro hipotético canal de abastecimiento, el cual discurriría paralelo al ya mencionado, a unos 130 m al norte de este. No obstante, todo el conjunto se encuentra bastante afectado por la actividad antrópica reciente. Ya en la ladera de enfrente, correspondiente a la margen derecha del arroyo de Becerril, se identifica todo un entramado de zanjas-cañal que no solo desaguan hacia dicho arroyo, sino también hacia el de Carballal (Fig. 8C). Si nos situamos en el collado que separa ambas vertientes, a una cota aproximada de 833 m s.n.m., se observa que las zanjas que desaguan hacia la vertiente del arroyo de Carballal lo hacen en forma de surcos convergentes que finalizan en un único canal de lavado o desagüe. Sin embargo, hacia la vertiente del arroyo de Becerril las zanjas se disponen de forma antagónica, es decir, en forma de surcos divergentes, de los cuales, en ciertos casos, surgen nuevas ramificaciones. Con respecto a la procedencia del agua que pudo abastecer estas labores, no se descarta que pudiera haber existido un estanque en el collado que separa ambas vertientes. Asimismo, en las proximidades del collado y a una cota aproximada de 938 m s.n.m., se ha identificado una pequeña depresión sobre el terreno, la cual pudo hacer las veces de estanque en cabecera. Estratigráficamente, se puede distinguir un suelo de carácter turboso, lo cual es indicativo de la presencia de una superficie favorable para la acumulación de agua. No obstante, en la actualidad resulta muy complicado —o en ciertos casos imposible— reconocer gran parte de los ele-

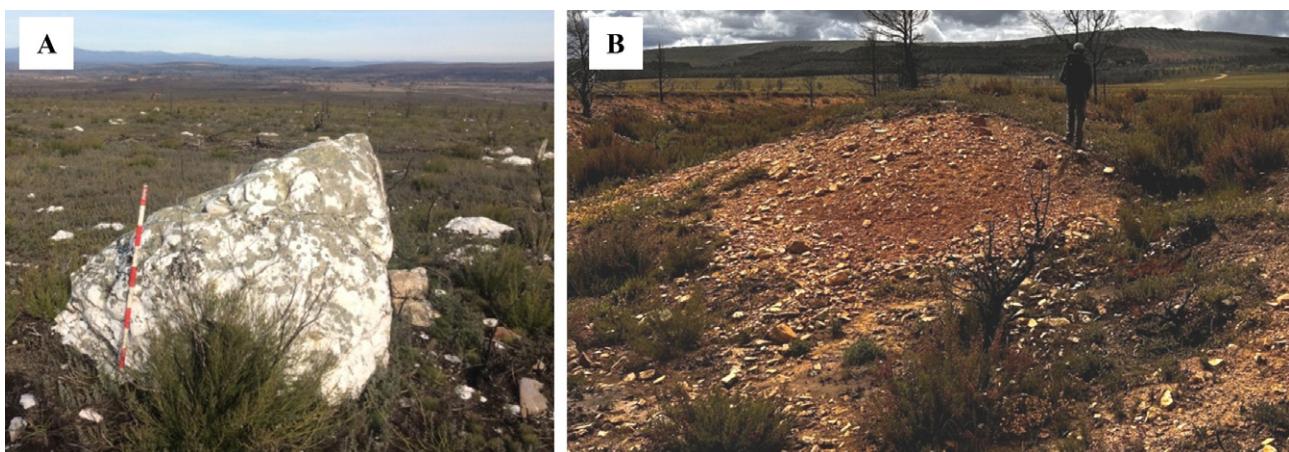


Fig. 5.- A. Paraje del Gejo, caracterizado por la abundante presencia de cuarzo lechoso de color blanco. B. Coloración rojiza del depósito sedimentario en una de las labores mineras del sector de Valrojo. El relieve del fondo corresponde con el zócalo paleozoico.

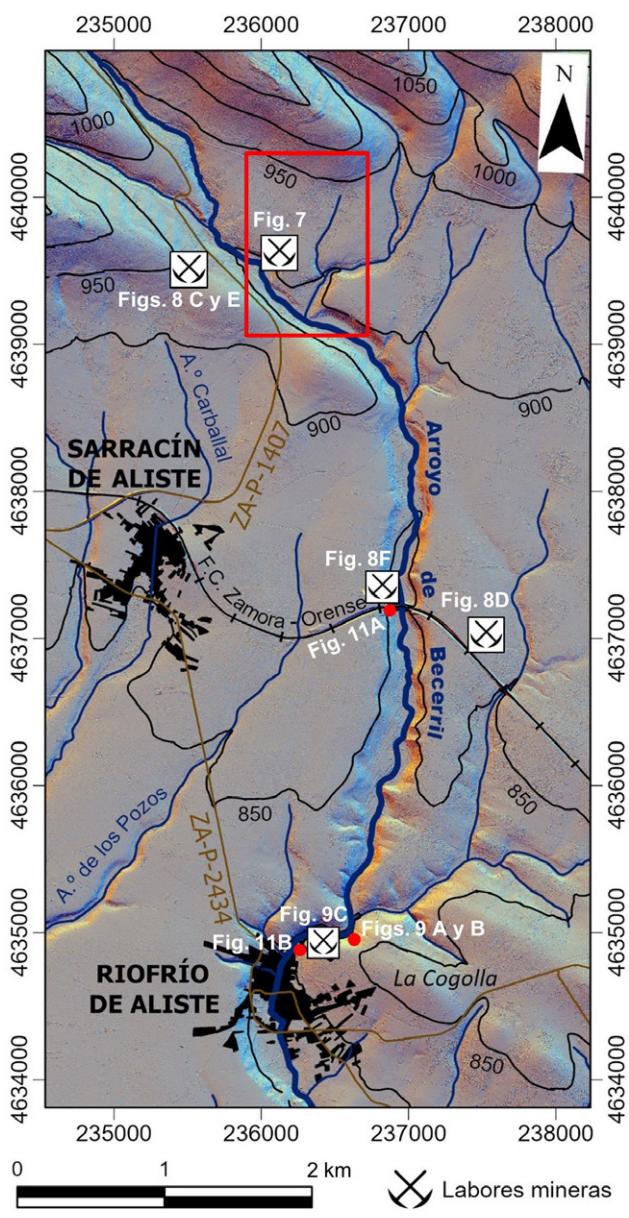


Fig. 6.- Localización de las labores de minería aurífera antigua identificadas en el sector del arroyo de Becerril. Base: imagen LiDAR (CNIG, 2025c).

mentos antrópicos asociados a las labores mineras, debido a la intensa repoblación forestal efectuada en la década de los 70 del siglo pasado y a la realización de cortafuegos o caminos que las han destruido. Esta circunstancia también se pone de manifiesto en lo que parece que fueron unas labores situadas junto al viaducto de la línea de ferrocarril Zamora – Orense que atraviesa el arroyo de Becerril. En concreto, en la ladera de la margen derecha se intuye un conjunto de zanjas mediante las que se pudo perseguir el lavado superficial del depósito de ladera. Asimismo, en la zona superior de la ladera de enfrente (margen izquierda del arroyo de Becerril) todavía se vislumbra la traza de lo que pudo ser una labor minera en “cola de caballo”, en la que una zanja principal se bifurca en otras secundarias, que posteriormente se reúnen en lo que sería el canal de lavado

(Fig. 8D). Al igual que en el sector de Valrojo, puntualmente se han identificado junto a las labores de este sector depósitos antrópicos, que con toda probabilidad corresponden a estériles de tipo minero (murias), constituidos por acumulaciones de bloques y cantos, que en ciertos casos superan los 25 cm de tamaño (Figs. 8E y 8F).

Finalmente, es preciso abordar el testimonio sobre la localidad de Riofrío de Aliste dado en el siglo XVIII por el geógrafo real Tomás López, en el que indica que: “sale del Regachuelo una gran zanja” (Lorenzo-Arribas, 2012), en alusión a una conducción hidráulica que se inicia en el arroyo de Becerril. No obstante, posteriormente apostilla que dicha zanja “pudo ser un camino cubierto” (Lorenzo-Arribas, 2012). Con respecto a su posible relación con minería antigua, en otras zonas del noroeste peninsular, con posterioridad a la explotación minera, la red hidráulica romana se transformó en caminos, también denominados carriles (Sáenz y Vélez, 1974). Por ello, se ha realizado un reconocimiento de ambas márgenes del arroyo de

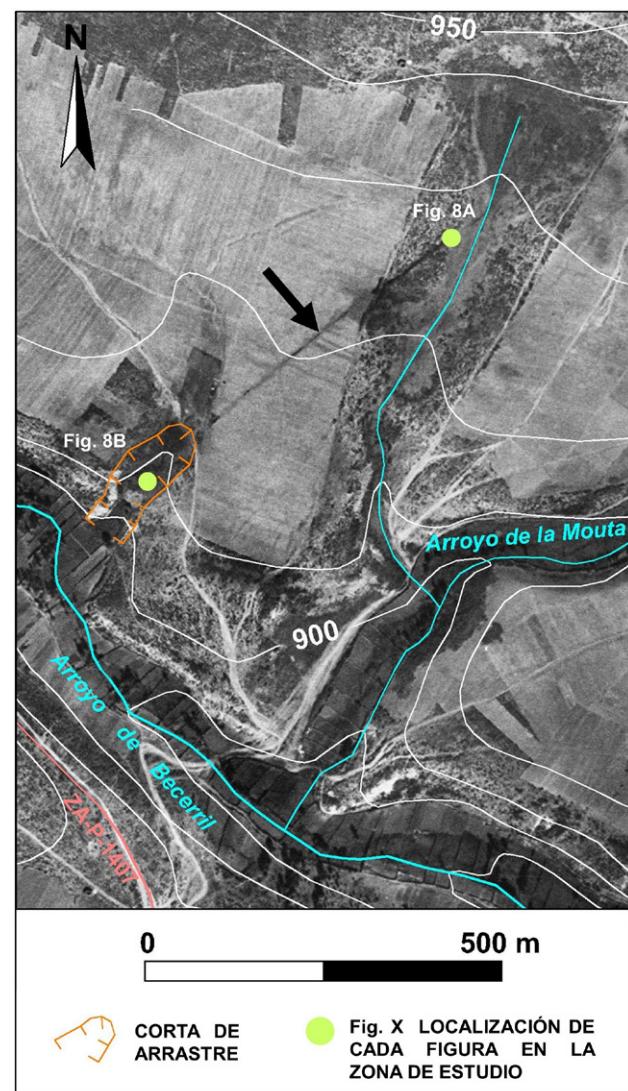


Fig. 7.- Corte de arrastre situada en la margen izquierda del arroyo de Becerril y canal asociado a la red hidráulica de abastecimiento (flecha negra). Base: fotograma de la serie B del vuelo americano de 1956-1957 (CNIG, 2025b).

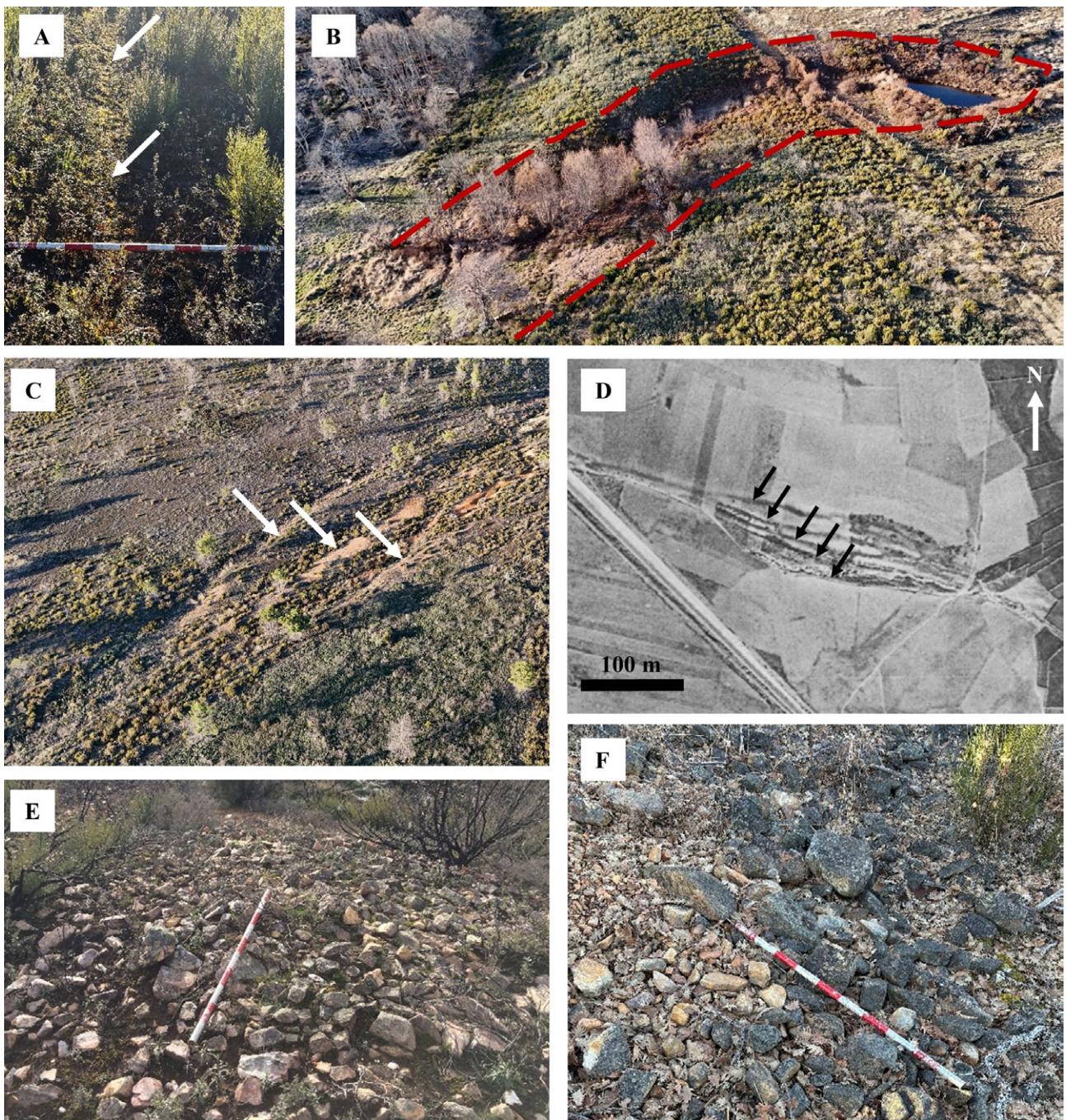


Fig. 8.- Aspecto de algunas de las labores mineras presentes en el sector del arroyo de Becerril. **A.** Canal de abastecimiento (flechas blancas) que finaliza en la pequeña corta de arrastre situada en la margen izquierda del arroyo de Becerril. **B.** Imagen tomada con dron de la citada corta de arrastre (indicada con línea discontinua y sombreado rojo). **C.** Zanjas (flechas blancas) existentes en la margen derecha del arroyo de Becerril. **D.** Labor minera en “cola de caballo”, situada junto al viaducto de la línea de ferrocarril Zamora – Orense que atraviesa el arroyo de Becerril (zona superior de la ladera de la margen izquierda). Las flechas negras indican la posición de las zanjas secundarias. Base: fotograma de la serie B del vuelo americano de 1956-1957 (CNIG, 2025b). **E y F.** Acumulaciones de cantos y bloques que probablemente corresponden con estériles mineros (murias).

Becerril con el fin de identificar posibles evidencias de la traza de dicha conducción hidráulica. Fruto de este, en la ladera rocosa situada junto al camino de los molinos (margen izquierda del arroyo de Becerril) se localizó lo que podría ser la traza de un antiguo canal labrado en la roca. La anchura de este hipotético canal sería de aproximadamente 1 m, identificándose en varios puntos su caja en la roca (Figs. 9A y 9B). Continuando su traza aguas

abajo, a los pocos metros, se localizó un zanjón de unos 40 m de anchura y hasta 7 m de profundidad (Fig. 9C), identificándose otro de menor entidad a unos 100 m de distancia, justo antes de las primeras casas de la localidad de Riofrío de Aliste. Ambos zanjas, ubicados en la ladera noroccidental del alto de la Cogolla, son el resultado de la erosión por lavado superficial del depósito de ladera y del perfil de alteración asociado al basamento Paleozoico.

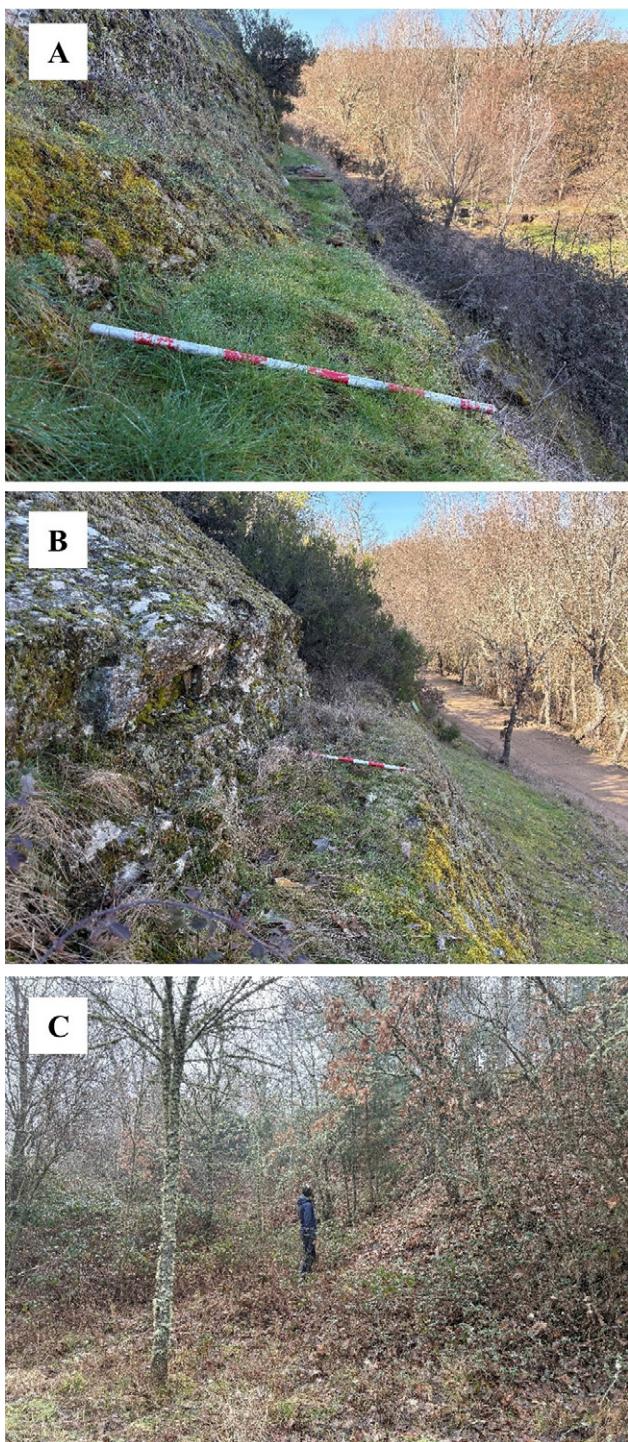


Fig. 9.- A y B. Caja de lo que podría ser un antiguo canal labrado en la roca, identificada en varios puntos de la ladera rocosa y situada junto al camino de los molinos (margen izquierda del arroyo de Becerril). **C.** Aspecto del zanjón principal, actualmente cubierto por la vegetación.

Con respecto a la presencia de minas en Riofrío de Aliste, Tomás López en el siglo XVIII ya indicaba que: “aunque ciega con el tiempo, hay una boca de cueva, y al pie de ella llaman la Huerta del Rey Moro” (Lorenzo-Arribas, 2012). Dicha cueva podría corresponder con la mina (galería) a la que hace alusión Rodríguez-Fernández (1991), al indicar que: “de ella se viene hablando desde tiempos antiquísimos por las gentes del lugar y se supone de hierro, sin que se

haya llegado a concretar nada exactamente ni de la época, ni de producción, ni de posibles explotadores” (Rodríguez-Fernández, 1991). En este sentido, el propio Rodríguez-Fernández (1991) planteaba la posibilidad de que no solo hubiera labores mineras en La Cogolla (margen izquierda del arroyo de Becerril), sino también en la otra margen del arroyo. No obstante, no hemos podido identificar sobre el terreno dichas galerías mineras, si bien la población de mayor edad de la localidad todavía tiene recuerdos de la situada en La Cogolla, por lo que no podemos determinar cuál pudo ser el elemento a explotar, ni la cronología de las mismas.

Por último, al igual que en Valrojo, en el sector del arroyo de Becerril también llama la atención la existencia de topónimos que son recurrentes en otras zonas con presencia de minería aurífera antigua en el noroeste peninsular, con ejemplos como El Mortero, El Carrilón o Peña Quebrada.

Descripción estratigráfica de los potenciales depósitos auríferos

Una vez identificados en el paisaje los elementos y las morfologías antrópicas susceptibles de constituir vestigios de minería aurífera antigua, se procede a realizar una descripción más detallada de los potenciales depósitos auríferos presentes en ambos sectores.

Estratigráficamente, en los depósitos cenozoicos del sector de Valrojo se identifica un tramo inferior, de aproximadamente 2 m de potencia (Fig. 10A). Está constituido por un ortoconglomerado con cantos subangulosos de cuarzoarenita (90 %) y cuarzo (10 %), con presencia de pátinas blancas de lavado y ferruginización interna. Este tramo inferior presenta un centímetro que está comprendido entre 3 y 4 cm, identificándose clastos de hasta 25 cm. Presenta una matriz amarillenta rojiza de tipo arenolimoso, cementada por óxidos de hierro. A techo del tramo inferior se identifica un tramo superior de tipo coluvial, que presenta unos 20 cm de potencia (Fig. 10B). Está constituido por cantos angulosos de cuarzo (65 %) y cuarzoarenita (35 %), identificándose también la presencia de cantos negros ferruginosos. El centímetro que presenta este tramo superior está comprendido entre 1 y 2 cm, identificándose clastos de hasta 10 cm. Presenta una matriz beige-rojiza, siendo la fracción fina de tipo arenoso y con presencia de materia orgánica. La presencia de clastos subangulosos en ambos tramos, asociados a depósitos de tipo aluvicoluvial, indica la proximidad del área fuente. En gran medida, proceden de la fracturación, meteorización y posterior desmantelamiento de la Fm. Puebla, así como de las venas de cuarzo o brechas de falla que rellenan las discontinuidades presentes en el macizo rocoso asociado a esta formación. No obstante, en estas superficies de gran extensión que sirven de nexo de unión entre la sierra de la Culebra y el valle del Tera, también se ha constatado la presencia de terrazas fluviales (Martín-Serrano, 1988). Por último, discordante y a muro de los depósitos cenozoicos, se identifica la Fm. Ollo de Sapo. En general, presenta un elevado grado de alteración, destacando el predominio de la fracción arcillosa caolínica. No obstante, en diversos puntos del sector se han



Fig. 10.- Columna estratigráfica levantada en el sector de Valrojo: A. Tramo inferior. B. Tramo superior. C. Fm. Ollo de Sapo.

identificado afloramientos rocosos de la Fm. Ollo de Sapo, como el existente en la margen derecha del Regato Vega de los Prados (junto a las labores mineras de Las Forcadas), el cuál fue utilizado como cantera histórica (Fig. 10C).

Con respecto al sector del arroyo de Becerril, se ha identificado un depósito compuesto por conglomerados con cantos, en proporción variable, de cuarcita, cuarzo y pizarra, que constituyen superficies de poca pendiente que tapizan extensiones kilométricas (Fig. 11A). La morfología de los cantos varía entre subangulosa y redondeada, siendo muy heterométricos. No obstante, algunos de ellos llegan a alcanzar los 40 cm de longitud, siendo muy habitual la presencia de cantos rubefactados. Este tramo presenta una matriz con contenido variable de arcillas y arenas, siendo su coloración rojiza o pardo-amarillenta. Su potencia aproximada alcanza los 4 m, aunque puede variar lateralmente (Nuño *et al.*, 1982), considerándose este tipo de depósitos como Pliocuaternarios de tipo raña (Martín-Serrano, 1988). A techo del tramo anterior, en algunos casos, se identifica un tramo superior de tipo coluvial que, a modo de recubrimiento, tapiza las laderas de la sierra. Está constituido fundamentalmente por cantos de cuarcita de tamaño variable, siendo su matriz arcilloso-arenosa y su potencia generalmente escasa. No obstante, el encajamiento de la red fluvial actual también ha generado una serie de depósitos coluviales más modernos, fruto de la incisión generada por los arroyos sobre los depósitos de tipo aluvio-coluvial anteriormente descritos. En este caso, los encontramos en las vertientes de ambas márgenes del arroyo de Becerril (Fig. 11B), presentando cantos de cuarcita de tamaño variable en una matriz arcillosa de coloración rojiza-grisácea. Los depósitos cenozoicos están discordantes sobre las unidades paleozoicas, que en este sector corresponden con la Fm. Culebra y la Fm. San Pedro de las Herrerías, identificándose pequeños recubrimientos arcilloarenosos fruto de su alteración “in situ”.

Por último, la presencia de acumulaciones antrópicas de bloques, que probablemente corresponden con estériles mineros (murias), es patente en ambos sectores. Por ejemplo, la presencia en el sector de Valrojo de cantos que, en algunos casos, alcanzan los 25 cm de tamaño máximo en el tramo sedimentario a techo del basamento paleozoico hace pensar que, en ciertas labores, todo el depósito cenozoico pudo ser explotado hasta alcanzar el lecho de roca (*bedrock*). Esto se deduce al observar en los depósitos de estériles bloques que también alcanzan los 25 cm de tamaño, a mayores de los existentes que puedan ser propios del nivel estratigráfico superior (cuyo tamaño máximo únicamente alcanzaba los 10 cm). Es decir, el tamaño de los cantos o bloques asociados a las acumulaciones de estériles (murias) sirve como indicador de la granulometría del depósito sedimentario que fue explotado.

Discusión

A grandes rasgos, los potenciales trabajos de minería aurífera antigua descritos en los sectores de Valrojo y del arroyo de Becerril presentan elementos comunes, similares a los de otras labores presentes en el noroeste peninsular.



Fig. 11.- A. Aspecto del depósito de tipo raña en una trinchera de la línea de ferrocarril Zamora – Orense, situada junto al viaducto que atraviesa el arroyo de Becerril. B. Depósito coluvial presente junto a la localidad de Riofrío de Aliste (ladera noroccidental del alto de la Cogolla).

En lo relativo a la red hidráulica de abastecimiento, para el desarrollo de las labores mineras en ambos sectores fue necesaria la captación de agua a partir de los arroyos circundantes, constituyendo el agua uno de los elementos más importantes para su desarrollo (Sánchez-Palencia, 1983). Un ejemplo destacado de ello en la provincia de Zamora es la captación del río Bibey, junto a la localidad de Pías, para el abastecimiento de las explotaciones auríferas romanas situadas en el municipio orensano de Viana do Bolo (Sáenz y Vélez, 1974). Sin embargo, en otras ocasiones es imposible el abastecimiento de agua mediante la captura de ríos o arroyos, siendo necesario realizar estanques de cabecera de los cuales parte la red hidráulica, como en el caso de las labores mineras situadas en los sectores de la sierra de la Culebra de Valdemanzanal y Valdemolinos (Andrés-Bercianos y Fernández-Lozano, 2025). En dichas labores, al igual que en otras explotaciones auríferas de la provincia de Zamora, como las del piedemonte de Justel (Andrés-Bercianos *et al.*, 2021b), se constató que los estanques de cabecera también se ubican sobre el perfil de alteración paleozoico (pizarras alteradas), al constituir un sustrato idóneo por su baja permeabilidad y su alta retención específica de agua (Andrés-Bercianos y Fernández-Lozano, 2025). No obstante, tanto los estanques situados en cabecera como la captación de los ríos y arroyos circundantes alimentan los distintos canales de abastecimiento, que conducen el agua hasta las zonas donde se desarrollaron los trabajos hidráulicos de erosión. No hay que obviar que estas estructuras de abastecimiento antiguas también han podido reaprovecharse con posterioridad para otros usos, al igual que en otras zonas del noroeste peninsular con presencia de minería aurífera antigua (Sánchez-Palencia, 2014). En los sectores de Valrojo y del arroyo de Becerril, estos canales de abastecimiento presentan una longitud no superior a 2,5 km, discurren mayoritariamente por zonas de interfluvio situadas entre pequeñas vaguadas y su pendiente aproximada es del 2 %.

En este caso, su pendiente es similar a la de otros canales romanos de abastecimiento realizados sobre sedimento, como los existentes en el sector S-4 de las explotaciones auríferas salmantinas del Cabaco (Sánchez-Palencia, 2014). A este respecto, Sánchez-Palencia (2014) afirma que valores relativamente elevados de la pendiente sólo son posibles en canales relativamente cortos, en cuyo caso el agua debe entrar con fuerza a las labores, o regulados cada cierto tiempo por depósitos. Esto sería impensable para canales de abastecimiento más largos, como los de Las Médulas, algunos de los cuales superan el centenar de kilómetros de longitud y cuya pendiente difícilmente alcanza el 0,5 % (Sánchez-Palencia, 2014). Por todo lo anteriormente enumerado, la tipología del sustrato (sedimentario o rocoso) y sus características asociadas (p. ej., porosidad y permeabilidad), junto con diversos condicionantes orográficos e hídricos, representan factores determinantes en la configuración de la red hidráulica de abastecimiento presente en cada sector minero.

En lo relativo a los trabajos hidráulicos de erosión identificados en los sectores de Valrojo y del arroyo de Becerril, también se constató que presentan una tipología similar a la de otras labores de minería aurífera antigua presentes en el noroeste peninsular. Es el caso de las zanjas en “cola de caballo”: un método de explotación aurífera adscrito a la época romana (Pérez-García, 1977). En particular, en la sierra de la Culebra se ha identificado esta tipología tanto en el sector del arroyo de Becerril como en el de Valdemanzanal (Andrés-Bercianos *et al.*, 2025), así como en zonas cercanas, como en el valle del río Negro (Andrés-Bercianos *et al.*, 2021a). Otra de las tipologías de trabajos hidráulicos de erosión identificadas en ambos sectores fueron las zanjas en forma de surcos divergentes. En concreto, este método también ha sido recientemente documentado en otras zonas próximas a la sierra de la Culebra, como el piedemonte de Justel (Andrés-Bercianos *et al.*, 2021b) o el valle del río Negro (Currás *et al.*, 2014;

Andrés-Bercianos *et al.*, 2021a). Por otra parte, a diferencia de la red hidráulica de abastecimiento, donde lo prioritario era conducir el agua erosionando lo menos posible, en la red hidráulica de erosión la pendiente de las zanjas es mayor (aproximadamente entre el 2 % y el 8 %), puesto que el objetivo es erosionar el sustrato. El anterior rango de pendiente se ajusta en gran medida a los valores de inclinación para los canales de lavado asociados a laboreo aurífero (entre el 2,1 % y el 6,2 %), así como a los cuantificados, por ejemplo, para los surcos de las explotaciones auríferas salmantinas del Cabaco (Sánchez-Palencia, 2014). La presencia de pequeñas cortas de arrastre, abastecidas por canales realizados sobre sedimento, también ha podido documentarse en ambos sectores. Esta tipología de trabajos hidráulicos de erosión también ha sido documentada en zonas próximas con presencia de labores de minería aurífera antigua, como en el piedemonte de Justel (Andrés-Bercianos *et al.*, 2021b) o en el valle del río Negro, junto a la localidad de Doney de la Requejada (Currás *et al.*, 2014).

Por otra parte, se constata que, para las distintas tipologías de trabajos hidráulicos de erosión identificados en los sectores de Valrojo y del arroyo de Becerril, también se han seguido los patrones sistemáticos propios de las labores de minería aurífera antigua del noroeste peninsular. Es decir, en las cortas de arrastre identificadas en ambos sectores, los depósitos cenozoicos fueron explotados hasta llegar al zócalo Paleozoico. Ello concuerda, a nivel de explotación, con la hipótesis de que, en muchos casos, las mayores concentraciones de partículas de oro se sitúan en las proximidades del lecho de roca (*bedrock*) o en la base de las secuencias (IGME, 1982). Por otra parte, en ambos sectores se ha identificado la presencia de trabajos hidráulicos de erosión en forma de zanjas en “cola de caballo” o en surcos divergentes, realizados en depósitos cenozoicos poco potentes o en suelos de laderas suaves. Es decir, la sistemática de los trabajos pudo adaptarse en cada caso a criterios de operatividad y eficiencia, en función también de la potencia del depósito sedimentario existente hasta alcanzar el basamento y/o la base de las secuencias. En este sentido, la presencia de estériles de tipo minero junto a las labores constituye otro indicador asociado a la minería aurífera antigua, tal y como también se ha podido documentar en otras labores existentes en la sierra de la Culebra situadas junto a la localidad de Ferreras de Arriba (Andrés-Bercianos y Fernández-Lozano, 2025). No obstante, se desconoce la ley aurífera específica asociada a las ULE de la sierra de la Culebra, por lo que es necesario estimarla en futuros trabajos, así como reevaluar ciertos indicios asignados a la minería de hierro (galerías, calicatas, etc.), considerando su posible relación con la prospección o explotación aurífera antigua en primario. Podría ser el caso de trincheras o galerías realizadas en primario sobre los niveles cuarcíticos y con presencia de venas de cuarzo asociados al Miembro Litos de la Fm. Puebla, a la Fm. Culebra o a la serie de transición situada a muro de la Fm. San Pedro de las Herrerías, como en Peñas de Mayas (Sarracín de Aliste), La Cogolla y La Mayada (Riofrío de Aliste), Peña Agujereada (Ferreras de Arriba), Peña de los Cristales y El Caño (Mahide) o La

Cubanca (San Pedro de las Herrerías). Todo ello basado en los criterios que sugieren que las labores prospectivas se inician desde las zonas bajas hacia las cabeceras de los cursos fluviales (Domergue y Héral, 1977; Sánchez-Palencia, 1980), a partir de la evaluación aurífera de los ríos y arroyos, con el fin de alcanzar los hipotéticos yacimientos auríferos. Asimismo, es necesario extrapolar la metodología y técnicas aplicadas en este estudio a otros sectores de la sierra de la Culebra (Abejera, Cabañas de Aliste, San Pedro de las Herrerías y Boya) en los que, mediante un reconocimiento preliminar, hemos identificado lo que podrían ser trabajos sistemáticos de minería aurífera antigua, asociados también a una prospección extensiva realizada sobre depósitos secundarios.

Por último, reseñar también la presencia de topónimos recurrentes en ciertos parajes de los dos sectores estudiados en los que se ha identificado la presencia de labores de minería aurífera antigua, con ejemplos como El Mortero, El Morterino, El Carrilón, Peña Quebrada, El Gejo, Valrojo o Las Forcadas. Dichos topónimos también son recurrentes en otras zonas con presencia de minería aurífera antigua en el noroeste peninsular, afirmando Sáenz y Vélez (1974) que “las primitivas minas de oro llevan implícita una toponimia que sí, a veces, no es concreta e inequívoca por un solo término, su asociación resulta inconfundible”. Asimismo, resaltar la destacada importancia que la sierra de la Culebra tuvo en la Edad Antigua (Loewinson, 1965; Esparza, 1986; Larrazábal, 1995, 1996; Sastre, 2017), gracias al hallazgo de numerosos vestigios relacionados con asentamientos, la transformación de materias primas (escoriales) y la existencia de una vía romana que atravesaba la sierra de la Culebra (Vía XVII del itinerario de Antonio) y que unía *Bracara Augusta* con *Asturica Augusta*.

Conclusiones

Las labores mineras descritas en los sectores de Valrojo y del arroyo de Becerril se ajustan a los patrones geológicos y mineros propios de otros trabajos sistemáticos de minería aurífera antigua presentes en el noroeste peninsular. Por su interés científico, constituyen vestigios, aún presentes sobre el paisaje, que deben ser preservados. Este trabajo subraya la necesidad de realizar un análisis del territorio basado en aspectos geológicos, geomorfológicos, estratigráficos y mineros, que ponen de manifiesto el valor de la Geoarqueología como disciplina. El desarrollo de futuros trabajos de investigación debe dirigirse a: i) extraer la metodología y técnicas aplicadas en este estudio a otros sectores de la sierra de la Culebra, con el objetivo de identificar nuevas labores de minería aurífera antigua; ii) determinar los tenores auríferos asociados a las ULE de la sierra de la Culebra; iii) realizar cubicaciones mediante el uso de nuevas tecnologías para establecer la cantidad de oro extraído de los diferentes depósitos secundarios, y iv) reevaluar ciertos indicios asignados a otros vestigios de minería (galerías, calicatas, etc.), considerando su posible relación con labores antiguas de prospección o explotación aurífera en primario.

Agradecimientos y financiación

Los autores agradecen a Augusto Rodríguez-García y a M.^a Ángela Suárez-Rodríguez (geomorfólogos de la UT IGME-CSIC León) las aportaciones realizadas para mejorar este trabajo, así como las efectuadas por los editores y revisores (Yolanda Peña Cervantes e Ildefonso Armenteros Armenteros). La presente investigación no ha recibido ayudas específicas provenientes de agencias del sector público, sector comercial o entidades sin ánimo de lucro. No obstante, se agradece al proyecto MPMIN (Gestión sostenible de las materias primas minerales, 000X) por las facilidades dadas para la presentación de este trabajo en el XI CGE celebrado en Ávila (2024).

Contribución de autores

El manuscrito ha sido redactado por R.A.B., con la colaboración y revisión de J.F.L.; figuras, R.A.B. y J.F.L.; reconocimiento en campo y obtención de datos, R.A.B. y J.F.L.; imágenes de dron, elaboración de MDT y técnicas de mejora de la imagen, J.F.L; investigación/análisis, R.A.B. y J.F.L.

Referencias

- Andrés-Bercianos, R., Alonso-Gavilán, G., Fernández-Lozano, J., 2019. Ingeniería hidráulica romana: caracterización de la red de abastecimiento hídrico de la explotación minera de Los Corralones (Espadañedo, Zamora). Revista de Obras Públicas, 3613: 70–75.
- Andrés-Bercianos, R., Fernández-Lozano, J., 2024. El Castiello de Lanseros (Zamora): sistemática de explotación aurífera y red hidráulica. XX Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. XXIV sesión científica de la Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero, Libro de resúmenes: 18.
- Andrés-Bercianos, R., Fernández-Lozano, J., 2025. Minería antigua en la sierra de la Culebra: pasado, presente y futuro. En: Zamora Revisada. Historia, Patrimonio y Territorio. UNED e Instituto de Estudios Zamoranos Florián de Ocampo, 419-427 (En prensa).
- Andrés-Bercianos, R., Fernández-Lozano, J., Alonso-Gavilán, G., 2021a. Caracterización geológica e identificación de nuevas labores de minería aurífera antigua en los sectores de cabecera de los depósitos tipo raña en el valle del río Negro (Zamora). En: The Archaeology of ‘Underdog Sites’ in the Douro Valley: From Prehistory to the Modern Age (S. Sánchez de la Parra Pérez, S. Díaz Navarro, J. Fernández-Lozano, J. Jiménez Gadea, Eds.). Archaeopress, Oxford, 345-358. <https://doi.org/10.2307/jj.14638140.29>
- Andrés-Bercianos, R., Fernández-Lozano, J., Alonso-Gavilán, G., 2021b. Documentación de explotaciones mineras romanas y caracterización geológica de los placeres auríferos del piedemonte de Justel (Zamora). En: The Archaeology of ‘Underdog Sites’ in the Douro Valley: From Prehistory to the Modern Age (S. Sánchez de la Parra Pérez, S. Díaz Navarro, J. Fernández-Lozano, J. Jiménez Gadea, Eds.). Archaeopress, Oxford, 329-344. <https://doi.org/10.2307/jj.14638140.28>
- Arce, J.M., Monteserín, V., 1981. Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 306 (Villardeciervos) y memoria. IGME, Madrid.
- Azor, A., González-Lodeiro, F., Hacar, M., Martín-Parra, L.M., Martínez-Catalán, J.R., Pérez-Estaún, A., 1992. Estratigrafía y estructura del Paleozoico en el Dominio del Ollo de Sapo. En: El Paleozoico inferior de Ibero-América (J.C. Gutiérrez-Marco, J. Saavedra, I. Rábano, Eds.). Universidad de Extremadura, Badajoz, 469-483.
- Barrois, Ch., 1882. Recherches sur les terrains anciens des Asturies et de la Galice. Mémoires de la Société Géologique du Nord, 2 (1), 630 p.
- Boixet, L., 2015. Prospección de yacimientos auríferos en la península ibérica. Tierra y Tecnología, 46: 3-8.
- Caldevilla, P., 2023. Geología y metalogenia de los Yacimientos de W-Sn y Au en el noroeste de la Península Ibérica: Peña do Seo (Zona Asturooccidental-Leonesa) y Sinclinal de Truchas (Zona Centroibérica). Tesis Doctoral, Univ. León, 161 p.
- CNIG, 2025a. Centro de descargas: documentación geográfica y cartografía antigua (en línea). Centro Nacional de Información Geográfica. Instituto Geográfico Nacional. <https://centrededescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp> (28/02/2025)
- CNIG, 2025b. Fototeca digital: Visualizador de fotogramas (en línea). Centro Nacional de Información Geográfica. Instituto Geográfico Nacional. <https://fototeca.cnig.es/fototeca/> (28/02/2025)
- CNIG, 2025c. PNOA: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (en línea). Centro Nacional de Información Geográfica. Instituto Geográfico Nacional. <https://pnoa.ign.es/> (28/02/2025)
- CNIG, 2025d. Visualizador Iberpix (en línea). Centro Nacional de Información Geográfica. Instituto Geográfico Nacional. <https://www.ign.es/iberpix/> (28/02/2025)
- Currás, B., Romero, D., Sánchez-Palencia, F.J., Pecharromán, J.L., Reher, G., Alonso, F., 2014. Minería de oro antigua en la cuenca del río Negro (Zamora). En: Minería romana en zonas interfronterizas de Castilla y León y Portugal (Asturias y NE de Lusitania) (F.J. Sánchez-Palencia, Ed.). Junta de Castilla y León, León, 217-229.
- Díez-Montes, A., 2006. La geología del dominio Ollo de Sapo en las comarcas de Sanabria y Terra do Bolo. Tesis Doctoral, Univ. Salamanca, 512 p.
- Domergue, C., Héral, G., 1977. Une méthode pour l' étude des mines antiques en alluvion: l' exemple des mines d'or romaines de la Valduerna (León, Espagne). Mélanges de la Casa de Velázquez, 13: 9-30. <https://doi.org/10.3406/casa.1977.2242>
- Esparza, Á., 1984. Explotaciones auríferas romanas en el valle del río Negro (Zamora). Anuario del Instituto de Estudios Zamoranos Florián de Ocampo, 1: 49-54.
- Esparza, Á., 1986. Los castros de la Edad del Hierro del norte de Zamora. Instituto de Estudios Zamoranos Florián de Ocampo, Zamora, 415 p.
- Fernández, J.J., 1990. El tesorillo visigodo de Villafáfila (Zamora). Nymantia. Investigaciones Arqueológicas en Castilla y León, 3: 195-208.
- Fernández-Fernández, A., Montero, J.M., Moro-Benito, M.C., 1995. Los hierros sedimentarios ordovícicos del sinforme de Alcañices (Prov. de Zamora, España). Boletín Geológico y Minero, 106(5): 11-24.
- Fernández-Fernández, A., Prieto-Mazariegos, R., Timón-Sánchez, S.M., Moro-Benito, C., 2019. Indicios de oro en el Distrito Minero de Calabor: Área de Hermisede-La Tejera (Zamora). Revista de la Sociedad Española de Mineralogía, 24: 39-40.
- Fernández-Lozano, J., Blanco, J.A., Carrasco, R.M., Pedraza, J., Remondo, J., Bonachea, J., González-Díez, A., Bernardo-Sánchez, A., Méndez-Cecilia, A.J., Gutiérrez-Alonso, G., 2019.

- Nuevas evidencias del impacto de la minería aurífera romana mediante el estudio de marcadores geomorfológicos, drones y LiDAR en los piedemontes zamoranos. XV Reunión Nacional del Cuaternario de Bilbao (AEQUA), Libro de actas: 114-117.
- Fernández-Lozano, J., Blanco, J.A., García-Talegón, J., Franco, P., 2016. Rubefaction process as prospection criteria within the roman goldmining context of the Eria Gold Mining District (León, NW Spain). *Geo-temas*, 16(2): 371-374.
- Fernández-Lozano, J., Carrasco, R.M., Pedraza, J., Bernardo-Sánchez, A., 2020. The anthropic landscape imprint around one of the largest Roman hydraulic gold mines in Europe: Sierra del Teleno (NW Spain). *Geomorphology*, 357: 107094. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107094>
- Fernández-Lozano, J., Gutiérrez-Alonso, G., 2016. Improving archaeological prospection using localized UAVs assisted photogrammetry: An example from the Roman Gold District of the Eria River Valley (NW Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 5: 509-520. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.01.007>
- Florido, P., González-Clavijo, E., Ortega, C., 2002. Mapa metalogenético de España 1:200.000, hoja nº 28 (Alcañices) y memoria. IGME, Madrid.
- GEODE, 2025. Mapa Geológico Digital continuo de España (en línea). http://mapas.igme.es/gis/rest/services/Cartografia_Geologica/IGME_Geode_50/MapServer (28/02/2025)
- González-Clavijo, E.J., 1997. La geología del Sínforme de Alcañices, oeste de Zamora. Tesis Doctoral, Univ. Salamanca, 238 p.
- González-Clavijo, E., Álvarez de Melo, F., Domínguez, J.M., 2024. Geolodía 24 Zamora: Buscando pruebas de la rotura de un supercontinente antiguo. Sociedad Geológica de España, Salamanca, 8 p.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G., Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13(1-5): 7-27. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(97\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00012-7)
- IGME, 1972. Mapa de Rocas Industriales de España 1:200.000, hoja nº 28 (Alcañices) y memoria. IGME, Madrid.
- IGME, 1982. Inventario de las labores romanas de prospección y explotación de oro en el NO de la Cuenca del Duero. IGME, 58 p.
- IGME, 2025. BDMIN: Base de Datos de Recursos Minerales (en línea). Instituto Geológico y Minero de España. <https://info.igme.es/BDmin/> (28/02/2025)
- JCYL, 2025. Visor IDECyL: Yacimientos arqueológicos (en línea). Junta de Castilla y León. <https://idecyl.jcyl.es/vcig/> (28/02/2025)
- Julivert, M., Fontbote, J.M., Ribeiro, A., Conde, L., 1972. Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares 1:1.000.000. IGME, Madrid.
- Larrazábal, J., 1995. Prospección minero-metalúrgica en la sierra de la Culebra (Zamora): un caso de adaptación metodológica. *Acontia. Revista de Arqueología*, 1: 33-39.
- Larrazábal, J., 1996. Iron mining and metallurgy during the Roman and Medieval Periods in Zamora (Spain). En: The importance of ironmaking. Technical innovation and social changes, Tomo II (G. Magnusson, Ed.). Jernkontorets Bergistorika Utskott, Estocolmo, 167-175.
- Loewinsohn, E., 1965. Una calzada y dos campamentos romanos del Conventus Asturum. *Archivo Español de Arqueología*, 38(111): 26-49.
- Lorenzo-Arribas, J., 2012. Diccionario histórico-geográfico de la provincia de Zamora según las informaciones obtenidas por el geógrafo real Tomás López 1765-1798. Instituto de Estudios Zamoranos Florián de Ocampo, Zamora, 342 p.
- Martínez-García, E., 1973. Deformación y metamorfismo en la zona de Sanabria (provincias de Zamora, León y Orense, Noroeste de España). *Stvdia geologica salmanticensia*, 5: 7-106.
- Martín-Serrano, Á., 1988. El relieve de la región occidental zamorana. La evolución geomorfológica de un borde del Macizo Hespérico. Instituto de Estudios Zamoranos Florián de Ocampo, Zamora, 311 p.
- Nuño, C., Fernández-Pompa, F., Arce, J.M., Monteserín, V., 1982. Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 307 (Ferres de Abajo) y memoria. IGME, Madrid.
- Perea, A., Rovira, S., 1995. The Gold from Arrabalde. En: Prehistoric gold in Europe: mines, metallurgy and manufacture (G. Morteani, J.P. Northover, Eds.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 471-490. https://doi.org/10.1007/978-94-015-1292-3_30
- Pérez-García, L.C., 1977. Los sedimentos auríferos del NO de la Cuenca del Duero (provincia de León, España) y su prospección. Tesis Doctoral, Univ. Oviedo, 429 p.
- Pérez-García, L.C., Sánchez-Palencia, F.J., 2000. Los sistemas de explotación de la minería romana. En: Las Médulas (León): Un paisaje cultural en la “Asturia Augustana” (F.J. Sánchez-Palencia, Ed.). Instituto Leonés de Cultura, León, 158-188. <https://doi.org/10.3989/tp.2000.v57.i2.257>
- Riesco, P., 2018. Toponimia de la provincia de Zamora: panorámica documental, comparativa y descriptiva. Instituto de Estudios Zamoranos Florián de Ocampo, Zamora, 973 p.
- Rodríguez-Fernández, G., 1991. Paisaje y alma de Aliste. La Bañeza, 651 p.
- Rovira, S., Consuegra, S., Montero, I., 1990. Estudio arqueometalúrgico del tesorillo de Villafáfila. *Nymantia. Investigaciones Arqueológicas en Castilla y León*, 3: 209-216.
- Sáenz, C., Vélez, J., 1974. Contribución al estudio de la minería primitiva del oro en el noroeste de España. Atlas, Madrid, 190 p.
- Sánchez-Palencia, F.J., 1980. Prospecciones en las explotaciones auríferas del NO de España (Cuencas de los ríos Eria y Cabreira, y Sierra del Teleno). *Noticiario arqueológico hispánico*, 8: 213-252.
- Sánchez-Palencia, F.J., 1983. Explotaciones auríferas en el “Conventus Asturum”. En: Indigenismo y romanización en el Coventus Asturum. Ministerio de Cultura y Univ. Oviedo, Madrid, 67-88.
- Sánchez-Palencia, F.J., 2014. La minería romana de la Sierra de la Peña de Francia. Las zonas arqueológicas de Las Cavenes de El Cabaco y del Pinalejo y Tenebrilla (Salamanca). En: Minería romana en zonas interfronterizas de Castilla y León y Portugal (Asturias y NE de Lusitania) (F.J. Sánchez-Palencia, Ed.). Junta de Castilla y León, León, 135-180.
- Sánchez-Palencia, F.J., Beltrán, A., Romero, D., Alonso, F., Currá, B., 2010. La zona minera de Pino del Oro (Zamora). Guía arqueológica. Junta de Castilla y León, Valladolid, 61 p.
- Sánchez-Palencia, F.J., García de los Ríos, J.I., 2007. Minería Antigua. Arqueominería de Castilla y León. En: La minería en Castilla y León. Junta de Castilla y León, Valladolid, 35-54.
- Sánchez-Palencia, F.J., Orejas, A., Sastre, I., Pérez, L.C., 2006. Las zonas mineras romanas del noroeste peninsular. Infraestructura y organización del territorio. En: Nuevos elementos de ingeniería romana: III Congreso de las Obras Públicas Romanas (I. Moreno, Ed.). Junta de Castilla y León, Valladolid, 265-285.
- Sánchez-Palencia, F.J., Romero, D., Beltrán, A., 2018. Geoarque-

- ología del oro en la Zona minera de Pino del Oro (Zamora). Mélanges de la Casa de Velázquez. Nouvelle série, 48-1: 63-87. <https://doi.org/10.4000/mcv.8210>
- Sánchez-Palencia, F.J., Romero, D., Beltrán, A., Pecharromán, J.L., Currás, B., 2014. La minería romana de Pino del Oro y su entorno inmediato (Zamora). En: Minería romana en zonas interfronterizas de Castilla y León y Portugal (Asturias y NE de Lusitania) (F.J. Sánchez-Palencia, Ed.). Junta de Castilla y León, León, 181-215.
- Sastre, J.C., 2017. El poblado de “El Castillón” (Santa Eulalia de Tábara, Zamora): Contribuciones al estudio de la Antigüedad tardía en el valle del Esla. Tesis Doctoral, Univ. Granada, 859 p.
- Tornos, F., 1993. Mapa metalogenético de España 1:200.000, hoja nº 18 (Ponferrada) y memoria. IGME, Madrid.
- Vacas, J.M., Martínez-Catalán, J.R., 1987. El sinforme de Alcañices en la transversal de Manzanal del Barco. *Stvdia Geologica Salmanticensia*, 24: 151-175.

MANUSCRITO RECIBIDO: 07-03-2025

REVISIÓN RECIBIDA: 14-04-2025

ACEPTACIÓN DEL MANUSCRITO REVISADO: 14-07-2025



Geoarqueología y cronoestratigrafía del yacimiento aziliense del Pleistoceno superior de la cueva de Los Azules (Cangas de Onís, Asturias, España)

Geoarchaeology and chronostratigraphy of the Azilian site of the Upper Pleistocene of Los Azules Cave (Cangas de Onís, Asturias, Spain)

Jesús F. Jordá Pardo¹, David Álvarez-Alonso², María de Andrés-Herrero², Pilar Carral González³, Aitor Hevia-Carrillo⁴, José María Vázquez-Rodríguez⁴

¹ Departamento de Prehistoria y Arqueología, Universidad Nacional de Educación a Distancia. Senda del Rey, 7, 28040 Madrid, España.

jjorda@geo.uned.es

² Departamento de Prehistoria, Historia Antigua y Arqueología, Universidad Complutense de Madrid. C/Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, Spain.

david.alvarez@ucm.es, maria.deandres@ucm.es

³ Departamento de Geología y Geoquímica, UAM, Campus de Cantoblanco, E-28049 Madrid, Spain.

pilar.carral@uam.es

⁴ Programa de Doctorado en Historia e Historia del Arte y Territorio, Escuela Internacional de Doctorado UNED. Departamento de Prehistoria y Arqueología, Universidad Nacional de Educación a Distancia. Senda del Rey, 7, 28040 Madrid, España.

aitorhevia@gmail.com, jmvr.preh@gmail.com

Resumen: La cueva de Los Azules (Contranquil, Cangas de Onís, Asturias) es una cavidad kárstica situada en la margen oeste del río Sella y desarrollada en las calizas cretácicas de la cobertura mesozoico-terciaria que surca de E a O la Cordillera Cantábrica (norte de la península ibérica). La cavidad contiene un importante registro sedimentario, arqueológico y paleontológico del Pleistoceno superior, con abundantes evidencias tecnológicas y restos faunísticos. El registro arqueológico contiene una amplia secuencia estratigráfica del Aziliense formada por catorce capas, que se estudian con metodología geoarqueológica. En este trabajo se analiza la secuencia litoestratigráfica aziliense y se presentan los datos de los análisis granulométricos, mineralógicos, edafológicos y radiométricos. El resultado de estos análisis permite interpretar con precisión tanto la litoestratigrafía del depósito como los procesos sedimentarios y diagenéticos responsables de su formación y posterior evolución. Las dataciones radiocarbónicas disponibles permiten situar claramente los niveles azilienses al final del Pleistoceno superior.

Palabras clave: karst, norte de Iberia, prehistoria, procesos sedimentarios, radiocarbono.

Abstract: Los Azules Cave (Contranquil, Cangas de Onís, Asturias, Spain) is a karstic cavity located on the west bank of the Sella River and developed in the Cretaceous limestones of the Asturian Longitudinal Depression that runs from east to west through the Cantabrian Mountains (northern Iberian Peninsula). The cavity contains an important sedimentary, archaeological, and paleontological record from the Late Pleistocene, with abundant technological evidences and faunal remains, which was studied in the last quarter of the XX century by J. A. Fernández-Tresguerres. Since 2019, a team coordinated by one of the signatories (DAA) has been conducting further research at this site. The archaeological

record contains a broad stratigraphic sequence of the Azilian period consisting of fourteen layers, which are studied using geoarchaeological methodology. This work analyzes the Azilian lithostratigraphic sequence and presents data from sedimentologic (granulometric and mineralogical), edaphic (determination of pH, total organic carbon TOC, total carbon TC and inorganic carbon IC, determination of colour and hydrophobicity or water repellency) and radiometric analyses. The results of these analyses allow for a precise interpretation of the lithostratigraphy of the deposit and the sedimentary and diagenetic processes responsible for its formation and subsequent evolution. Available radiocarbon dating allows the Azilian levels to be placed clearly at the end of the Upper Pleistocene.

Keywords: karst, northern Iberia, prehistory, radiocarbon, sedimentary processes.

Jesús F. Jordá Pardo, David Álvarez-Alonso, María de Andrés-Herrero, Pilar Carral González, Aitor Hevia-Carrillo, 2025. Geoarqueología y cronoestratigrafía del yacimiento prehistórico del Pleistoceno superior de la cueva de Los Azules (Cangas de Onís, Asturias, España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 38 (2): 63-82.

Introducción

La cueva de Los Azules se encuentra en el extremo oriental de Asturias, dentro del término municipal de Cangas de Onís, en el barrio de Contranquil, a unos 500 m al norte de la capital del municipio (Fig. 1). Se trata de una pequeña cavidad situada en la ladera sur del monte Llueves, a una cota de 65,5 m s.n.m. y muy próxima a la confluencia de los ríos Sella y Güeña. Sus coordenadas UTM X: 327.178, Y: 4.802.868 (Huso 30, ETRS89).

El yacimiento que contiene fue descubierto de manera fortuita en 1971, al hallarse en los sedimentos removidos de una de sus entradas (Los Azules I) un fragmento de arpón aziliense junto a varias piezas de cuarcita y sílex que evidenciaron su interés arqueológico. Por entonces, el acceso era muy limitado debido a la gran acumulación de sedimentos que obstruían la cavidad. No obstante, su ubicación facilitó pronto excavaciones clandestinas, hasta que se procedió a cerrar la cueva y se iniciaron las primeras investigaciones sistemáticas en 1973, dirigidas por el arqueólogo Juan A. Fernández-Tresguerres (1941-2011) (Fernández-Tresguerres, 1976; Díaz y Martínez 2012; Álvarez Alonso *et al.*, 2022a).

Entre 1973 y 1992, Fernández-Tresguerres prosiguió las excavaciones en el yacimiento en donde documentó una secuencia muy completa correspondiente al Magdaleniense superior y al Aziliense. No obstante, sus trabajos y publicaciones se centraron en el registro aziliense, considerado el más exhaustivo entre los yacimientos situados al sur de los Pirineos (Fernández-Tresguerres, 1980; Fernández-Tresguerres y Rodríguez, 1990; Fernández-Tresguerres y Junceda, 1992, 1995). Desde 2019, un nuevo equipo de investigación ha retomado las excavaciones en la cueva de Los Azules, incorporando una perspectiva más orientada al análisis geocronológico y estratigráfico, en contraste con el enfoque predominantemente espacial que caracterizó los trabajos anteriores (Álvarez Alonso *et al.*, 2022a, 2022b).

La secuencia arqueológica de la cueva de Los Azules está compuesta por una serie de unidades sedimentarias (B a N) correspondientes al Aziliense, que se corresponden

con los niveles 2 a 5 de la secuencia de Fernández-Tresguerres (1980, 2004). Estos depósitos se caracterizan por la abundancia de los típicos fósiles directores del Aziliense: las puntas de dorso, denominadas “puntas azilienses” y los arpones característicos de este periodo. Especialmente destaca el nivel correspondiente al Aziliense antiguo -nivel 5 de la secuencia clásica, renombrado como capa N en la nueva interpretación de la estratigrafía-. La secuencia aziliense, en este caso el nivel N, se superpone sin solución de continuidad sobre la secuencia del Magdaleniense superior, de la cual hasta la fecha solo se han excavado las capas O y P (no incluidas en este trabajo), ambas con presencia de arpones típicos de este periodo (Álvarez-Alonso *et al.*, 2025).

El objetivo de este trabajo es la realización del estudio geoarqueológico y cronoestratigráfico del registro arqueosedimentario del Aziliense de la cueva de Los Azules, a partir del análisis de la secuencia estratigráfica obtenida en las excavaciones realizadas por Juan A. Fernández-Tresguerres. Esta secuencia está siendo revisada desde 2019 por David Álvarez-Alonso y su equipo, quienes han llevado a cabo labores de limpieza del yacimiento, refrescado de los cortes estratigráficos y toma de muestras para diferentes análisis.

El estudio geoarqueológico aborda los siguientes aspectos: (1) el estudio de la secuencia sedimentaria del yacimiento arqueológico y la correspondiente toma de muestras; (2) la realización de análisis sedimentológicos y edafológicos; (3) la interpretación de los procesos de formación y transformación que dieron lugar a la actual configuración de su registro arqueológico, diferenciando, en la medida de lo posible, los procesos naturales (*N transforms*) y/o culturales de origen antrópico (*C transforms*) (Schiffer, 1987); (4) la identificación de los procesos sedimentarios o de formación frente a los diagenéticos o postdeposicionales (Wood y Johnson, 1978); y (5) el establecimiento de la evolución geoarqueológica del yacimiento.

El estudio cronoestratigráfico contempla el análisis de las dataciones radiocarbónicas ya existentes (Fernández-Tresguerres, 1976, 1989) y la obtención de nuevas

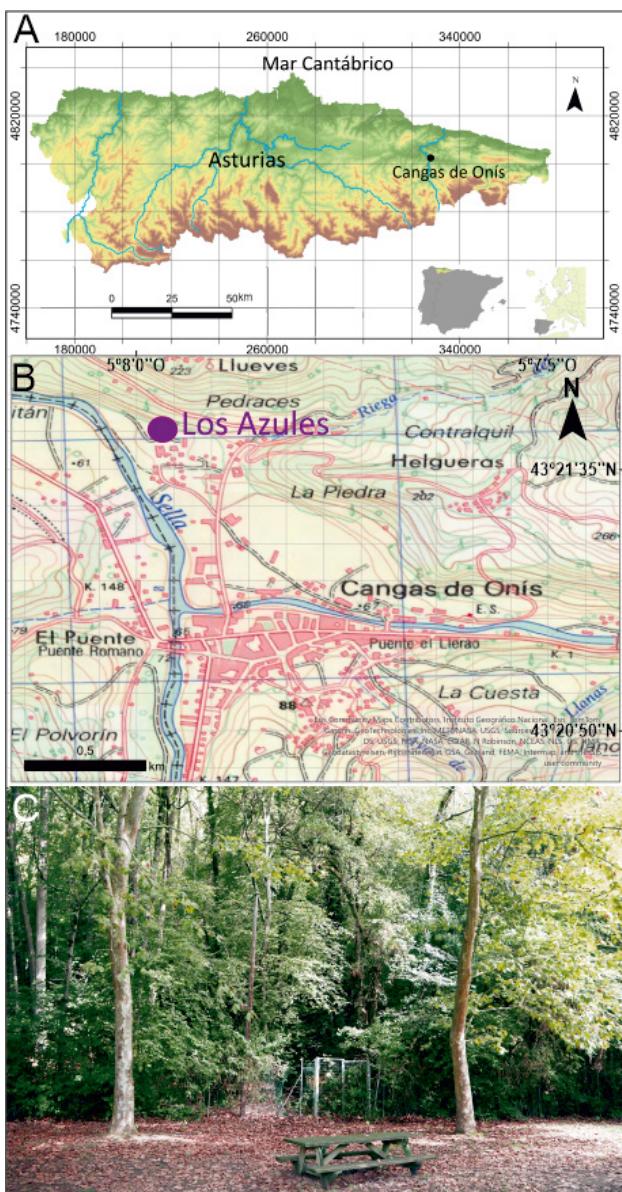


Fig. 1. A y B. Situación geográfica de la cueva de Los Azules. C. Vista parcial del acceso al recinto vallado donde se encuentra la cueva.

dataciones que permitirán verificar la validez de las previamente publicadas. Todas ellas serán sometidas a un proceso de validación y, posteriormente, calibradas con el fin de situar la secuencia con precisión en la escala cronoestratigráfica del Cuaternario.

Materiales y métodos

Muestreo y análisis sedimentológicos y edafológicos

El estudio geológico y geomorfológico del entorno de la cueva de Los Azules se ha realizado a partir de la información de la hoja 31 (Ribadesella) del Mapa Geológico de España a escala 1/50.000 (Navarro *et al.*, 1986) y del visor cartográfico del Mapa Geológico Continuo de España a escala 1/50.000 (<http://info.igme.es/visorweb/>), ambos del Instituto Geológico Minero de España.

Para obtener la litoestratigrafía de la secuencia arqueo-sedimentaria de la cueva, hemos estudiado y muestrado con detalle la sección estratigráfica del corte longitudinal derecho de la cata de las excavaciones de Fernández-Tresguerres, que han sido limpiados y refrescados recientemente por Álvarez-Alonso y su equipo. Tras realizar la descripción litoestratigráfica de detalle de las diferentes capas de las secciones estratigráficas, procedimos a muestreos, obteniendo un total de 15 muestras (AZ.A, AZ.B, AZ.C, AZ.D, AZ.E, AZ.F, AZ.G, AZ.H, AZ.I, AZ.J, AZ.K, AZ.L, AZ.M, AZ.N1, AZ.N2).

Los análisis sedimentológicos realizados han consistido en la clasificación textural de los sedimentos mediante granulometría láser para la fracción inferior a 2 mm y por granulometría Phi para el total de sedimento incluyendo los gruesos, y la identificación mineralógica mediante difracción de Rayos X (DRX) en polvo de la fracción inferior a 0,63 mm. Los análisis edafológicos han sido la determinación del pH, del carbonato orgánico total TOC, del carbono total CT y del carbono inorgánico CI. Estos análisis han sido realizados en el Centro de Asistencia a la Investigación de Técnicas Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid. Por otro lado, se ha realizado la determinación del color y la medida de la repelencia al agua en el Laboratorio de Edafología del Departamento de Geología y Geoquímica de la Universidad Autónoma de Madrid.

El análisis granulométrico laser se ha realizado utilizando un equipo Honeywell Microtrac X100, con capacidad para medir fracciones de 700 a 0,10 µm. El tratamiento estadístico de los datos de las granulometrías se ha realizado con el programa GRADISTAT Versión 8.0 (Blott y Pye, 2001; Blott, 2010) que permite agrupar estadísticamente los sedimentos de las muestras detríticas analizadas en diferentes grupos texturales en función de la mayor o menor presencia de gravas, arenas y fangos (limos y arcillas). Para ello hemos aplicado la clasificación granulométrica adoptada por el programa que procede de la modificación de las escalas de Udden (1914) y Wentworth (1922).

Para la obtención de los datos de Difracción de Rayos X se ha utilizado un difractómetro Bruker modelo D8 ADVANCE. Los diagramas de difracción de polvo desorientado para caracterizar la mineralogía de la muestra total se han obtenido en un intervalo angular de 2 a 65°, con tamaño y tiempo de paso de 0,02° y 1 s, respectivamente. El análisis semicuantitativo se ha realizado siguiendo el método de Chung (1975) y utilizando el software EVA de Bruker.

El pH se ha medido mediante potenciometría siguiendo los criterios de la Soil Science Society of America (Thomas, 1996). El análisis de Carbono Orgánico Total (TOC) se ha realizado mediante combustión y detección por infrarrojos en un equipo SHIMADZU modelo TOC-VCSH con módulo de sólidos modelo SSM-5000a. El contenido de TOC se ha obtenido por diferencia entre el resultado de Carbono Total (TC) y Carbono Inorgánico (IC).

Para la determinación precisa del color –en seco y en húmedo– se han utilizado las Munsell Soil Color Charts (Munsell, 1981), expresando el color en: Matiz (HUE) + Brillo (VALUE) + Croma (CHROMA). Las muestras

AZ.A, AZ.D, AZ.G, AZ.H y AZ.N1 no pudieron ser analizadas por no contar con remanente de muestra suficiente para el análisis.

La hidrofobicidad o repelencia al agua (Wallis y Horne, 1992) se ha medido en dos de las muestras que presentaban esta característica (AZ.B y AZ.K) mediante el método del grado de hidrofobia de un suelo (WDPT = Water Drop Penetration Time) (Letey, 1969).

Radiocarbono y cronoestratigrafía

Para definir el marco cronoestratigráfico de la secuencia, se han empleado dataciones por radiocarbono, integrando los resultados previamente publicados con una nueva serie de dataciones obtenidas para este estudio. Las dataciones publicadas por Fernández-Tresguerres corresponden a dos fechas obtenidas en el laboratorio CSIC del Instituto de Química-Física Rocasolano (CSIC) de Madrid (Fernández-Tresguerres, 1976) y a cinco del laboratorio BM del British Museum de Londres, actualmente cerrado (Fernández-Tresguerres, 1989), todas ellas realizadas aplicando el método del radiocarbono convencional a fragmentos óseos indeterminados. En este trabajo se han realizado siete nuevas dataciones AMS en los laboratorios de la Oxford Radiocarbon Accelerator Unit (ORAU, Oxford, Reino Unido) y Beta Analytic Inc. (Miami, Florida EUA). Las cuatro de ORAU se obtuvieron a partir de fragmentos óseos indeterminados (mamífero talla media) con marcas de actividad antrópica, siguiendo los protocolos de datación por radiocarbono aplicados en ORAU (Brock *et al.*, 2010), incluyendo la ultrafiltración. Por su parte, las tres dataciones realizadas en Beta se obtuvieron a partir de un hueso con marcas y de dos muestras de carbón.

Todas las fechas han sido sometidas a un examen de validez (Mestres, 1995, 2000, 2003, 2008) para comprobar que cumplen los requisitos fundamentales de orden químico-físico, analítico, y arqueológico para su validación. Los de orden químico-físicos hacen alusión a la capacidad del material datado para dar una fecha radiocarbónica válida. Los de orden analítico son la precisión (desviación típica) y la exactitud (descontaminación, tratamiento químico y medida del contenido en radiocarbono). El requisito de precisión que deben cumplir las fechas radiocarbónicas es que su desviación típica sea lo más pequeña posible. La exactitud está relacionada con la calidad de los laboratorios que se puede verificar si cuentan con certificados homologados. Finalmente, en el orden arqueológico, las determinaciones ^{14}C deben cumplir el requisito de ser representativas de los acontecimientos que se quieren datar mediante una buena correspondencia entre la fecha física del ma-

terial datado y la fecha arqueológica del contexto o acontecimiento datado. Para ello deben cumplir dos condiciones: asociación (que el material datado o su presencia en el contexto arqueológico sea producto de la actividad del grupo humano que creó el contexto) y sincronía (que su formación sea contemporánea al grupo humano que creó el contexto arqueológico).

La calibración de las fechas la hemos realizado usando el software CalPal 2025.5 (Weninger y Jöris, 2008) utilizando la curva de calibración IntCal20 Northern Hemisphere (Reimer *et al.*, 2020).

Finalmente, con objeto de ubicar las ocupaciones humanas de Los Azules en la escala cronoestratigráfica del Pleistoceno Superior final actualmente en uso –basada en los *Greenland Events* detectados en los sondeos de Groenlandia (Björck *et al.*, 1998)– hemos comparado, mediante CalPal 2025.5, la curva de probabilidad acumulada de las fechas calibradas con las curvas de variación de los isotópos de oxígeno de Groenlandia $\delta^{18}\text{O}$ GISP2 (Grootes *et al.*, 1993; Meece *et al.*, 1994) y GRIP $\delta^{18}\text{O}$ 2001 Hulu Age Model (Johnsen *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2001), utilizadas aquí como *proxies* del paleoclima cuaternario (Svensson *et al.*, 2008).

Contexto geológico y secuencia litoestratigráfica

Geológicamente, la cueva de Los Azules se encuentra en el concejo de Cangas de Onís cuyo territorio comprende dos unidades geológicas principales: la Zona Cantábrica del Macizo Hespérico y la cubierta mesozoico-terciaria. El territorio de la Zona Cantábrica corresponde a la región del Manto del Ponga en la zona norte del concejo, mientras que la zona sur se extiende por la región de Picos de Europa (Bastida, 2004). Este territorio se caracteriza por relieves fuertes y contrastados, más acusados hacia el sur, desarrollados sobre cuarcitas, areniscas, pizarras y calizas afectadas por pliegues, fallas y cabalgamientos producidos durante la orogenia Varisca, así como por nuevas estructuras originadas en el ciclo alpino (Martínez García, 1981; Navarro *et al.*, 1986). De oeste a este, está atravesado por la cubierta mesozoico-terciaria con depósitos de areniscas, limolitas y calizas mesozoicas, y conglomerados y lutitas cenozoicas, afectados por suaves pliegues y fallas de la orogenia Alpina (García-Ramos y Gutiérrez Claverol, 1995), que dan lugar a una zona deprimida con suaves relieves que recorren el río Sella y su afluente, el Güeña.

La cueva de los Azules se localiza en las calizas bioclásticas grises del Cretácico (Albiense-Cenomaniense inferior) (Navarro *et al.*, 1986; IGME, en línea), al pie del farallón rocoso de Contranquil, en la orilla derecha de la llanura de inundación del Sella (Fig. 2). Estas calizas configuran un suave sinclinal de dirección E-O que descansa sobre las cuarcitas de la Formación Barrios, del Ordovícico, y las calizas de la Formación Barcaliente, del Carbonífero (Navarro *et al.*, 1986).

La cueva se abre en el flanco S de un suave sinclinal, en una zona donde las calizas buzan ligeramente hacia el N y su entrada se encuentra a unos 20 m sobre la llanura de inundación del sistema fluvial Sella-Güeña. Se trata de una pequeña cavidad que presenta dos entradas separadas por unos pocos metros, que dan paso a sendas galerías de pequeñas dimensiones y escaso desarrollo practicable (aproximadamente unos 100 m²), que se conectan entre sí en dos puntos distintos del interior (Fig. 3A). Estas dos bocas han sido referidas en la bibliografía como Los Azules I y Los Azules II (Fig. 3B), aunque en realidad se trata de un mismo yacimiento. La cavidad carece de espeleotemas y

se encuentra parcialmente colmatada por depósitos arqueo-sedimentarios, que fueron excavados por Fernández-Tresguerres, dando lugar a una gran cata rectangular (≈ 30 m²) de dirección N-S con dos secciones estratigráficas, una E y otra O, en las que definió una secuencia estratigráfica, de naturaleza predominantemente arcillosa, correspondiente al Aziliense (Fig. 3C) formada por cinco capas (denominadas como niveles 1, 2, 3, 4, y 5), de las cuales la correspondiente al nivel 3 estaba dividida en cinco subniveles (a, b, c, d, e) (Fernández-Tresguerres, 1980). En la actualidad, el segmento sur de esta secuencia no existe por haber sido excavado posteriormente por el propio Fernández-Tresguerres.

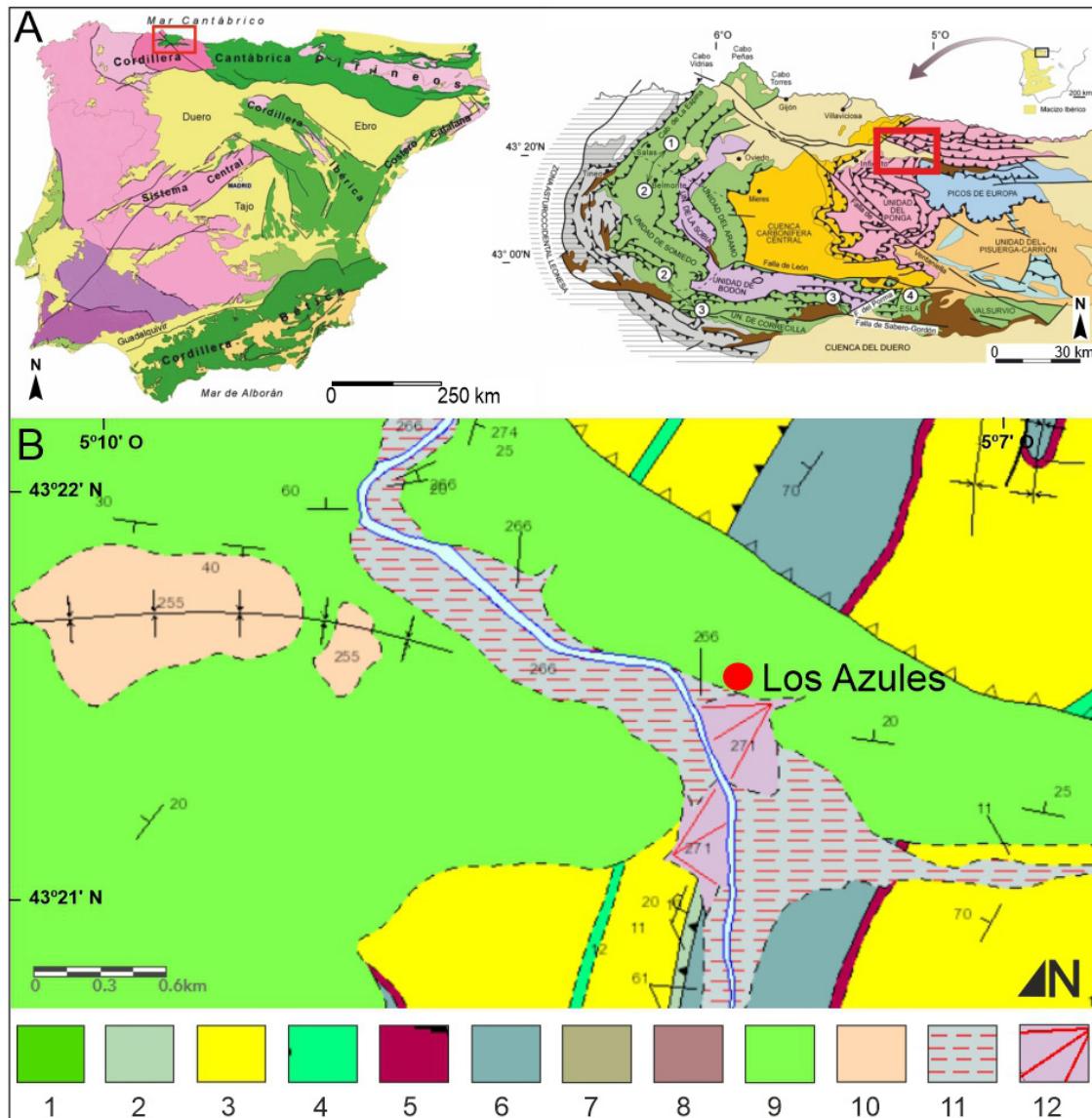


Fig. 2. A. Situación geológica de Los Azules en el contexto de Iberia (Vera, 2004) y la Zona Cantábrica (Pérez-Estaún y Bea, 2004). B. Mapa geológico de la zona de la zona de Cangas de Onís (IGME, en línea). Leyenda: 1, calizas grises, dolomías, margas y calizas nodulosas de la Formación Láncara (Cámbrico inferior-Cámbrico medio); 2, pizarras, areniscas y cuarcitas de la Formación Oville (Cámbrico inferior-Cámbrico medio); 3, Cuarcitas, areniscas y pizarras de la Formación Barrios (Cámbrico superior-Ordovícico inferior); 4, lutitas y limolitas negras de la Formación Pizarras del Sueve (Cámbrico superior-Ordovícico inferior); 5, calizas nodulosas rojas de la Formación Alba (caliza griotte) (Carbonífero inferior); 6, calizas negras y fétidas de la Formación Barcaliente (Carbonífero inferior); 7, lutitas, areniscas, margas y calizas del Carbonífero superior; 8, lutitas, areniscas, conglomerados calcáreos, brechas y calcítitas de la Formación Cavandi (Carbonífero superior); 9, areniscas, arenas y calizas (Cretácico); 10, conglomerados, arenas, arcillas y calizas (Eoceno-Oligoceno); 11, cantos, gravas y arenas (llanura aluvial) (Cuaternario); y 12, conglomerados, brechas y arenas (derrumbes de ladera y conos aluviales) (Cuaternario).

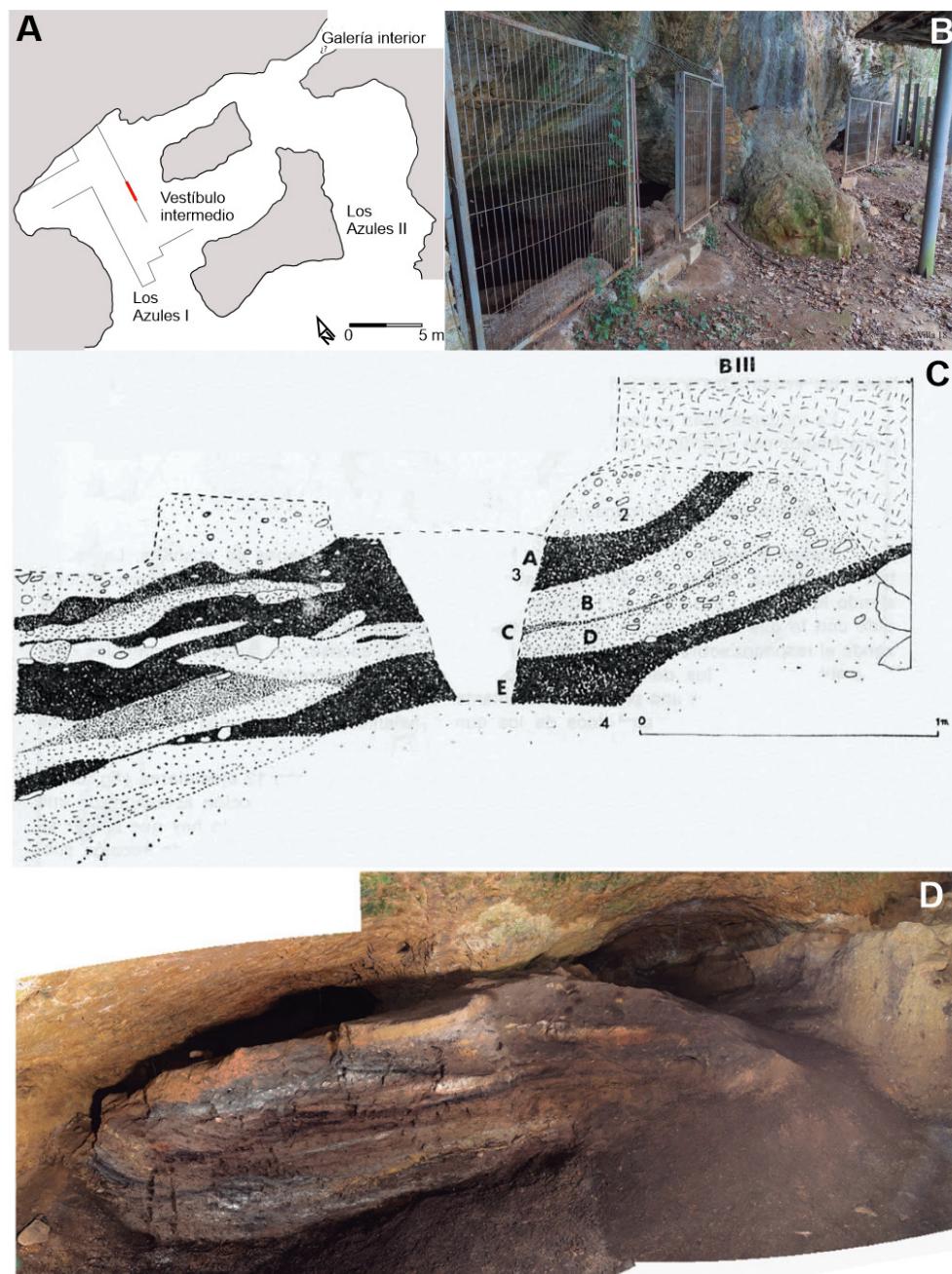


Fig. 3. A. Planta de la cueva generada a partir de la nube de puntos obtenida tras el escaneado de la cueva, con indicación en rojo de la porción de sección estratigráfica estudiada. B. Entrada de la cueva; en primer plano, Los Azules I y, al fondo, Los Azules II (foto A. Martínez Villa). C. Estratigrafía obtenida por Fernández-Tresguerres (1980). D. Sección estratigráfica longitudinal E tras la limpieza llevada a cabo en 2019 en la gran cata de Fernández-Tresguerres. Fotos B y D A. Martínez-Villa.

Tras proceder a su limpieza y refresco (Fig. 3D), la secuencia litoestratigráfica obtenida en el marco de este trabajo en la sección estratigráfica longitudinal E de la gran cata, presenta, de muro a techo, las siguientes capas, sin que hasta el momento hayamos alcanzado la roca del sustrato (Figs. 4 y 5):

- AZ.N2-N3: 10 a 25 cm, limos de color marrón oscuro con gravas de caliza, el conjunto buza ligeramente hacia el interior. Se corresponde con el nivel 5 de Fernández-Tresguerres (1980).
- AZ.N1: 5 cm, gravas de caliza dispersas en una matriz de arenas y limos de color marrón oscuro

que hacia el techo pasa a negro. Se corresponde con el nivel 5 de Fernández-Tresguerres (1980).

- AZ.M: 15 cm, limos amarillentos y gravas, más abundantes estas hacia la base, con un subnivel intermedio naranja. Se corresponde con el nivel 4 de Fernández-Tresguerres (1980).
- AZ.L: 5 cm, gravas con limos de color negro a gris con láminas blancas.
- AZ.K: 5 cm, limos de color marrón claro homogéneo con gravas de color marrón claro homogéneo. Se corresponde con el nivel 3f de Fernández-Tresguerres (1980).

- AZ.J: 4-5 cm, gravas con arenas y limos de color marrón claro y geometría lenticular, que se acuña hacia el S. Se corresponde con el nivel 3f de Fernández-Tresguerres (1980).
- AZ.I: 10-12 cm, limos de color marrón claro con gravas y algún canto. Se corresponde con el nivel 3f de Fernández-Tresguerres (1980).
- AZ.H: 2 cm, arenas finas y limos de color negro con gravas. Se corresponde con el nivel 3e de Fernández-Tresguerres (1980).
- AZ.G: 3-4 cm, gravas con arenas y limos de color negro intenso con parches blancos.
- AZ.F: 6 cm, arenas y limos de color blanco con tonos naranjas con gravas de pequeño tamaño.
- AZ.E: de 0 cm a 15 cm, arenas y limos de color marrón claro con gravas que se acuñan hacia el S. Se corresponde con el nivel 3d2 de Fernández-Tresguerres (1980).
- AZ.D: 3 cm, arenas y limos de color marrón oscuro con gravas gruesas, que se acuña hacia el S y que hacia el techo pasar a tener un color grisáceo. Se corresponde con el nivel 3d2 d de Fernández-Tresguerres (1980).
- AZ.C: de 15 cm (al N) a 25 cm (al S), gravas de pequeño tamaño con arenas y limos de color marrón oscuro, más blanquecinos a muro.
- AZ.B: 10 a 15 cm, limos de color marrón claro a beige, con gravas de pequeño tamaño y cantos de caliza autóctona (centil 20 cm, media 5 cm). Es fuertemente erosivo sobre el nivel infrayacente. Se corresponde con el nivel 2d de Fernández-Tresguerres (1980).
- AZ.A: 2 cm, limos de color marrón oscuro con gravas de pequeño tamaño. Constituye el techo de la sedimentación y el suelo actual.

En total, la secuencia visible alcanza un espesor de entre 1 y 1,5 m. Las diferentes capas presentan una buena estratificación con superficies de contacto muy evidentes por cambio en la coloración y, en general, buzan hacia el interior de la cavidad, inclinación que es mayor en las capas inferiores.

En la sección estratigráfica longitudinal O, opuesta a la anterior, aparece una secuencia que buza fuertemente hacia el interior, caracterizada por la abundante presencia de clastos autóctonos y constituida por tres capas (Fig. 6): la inferior de color marrón oscuro, la intermedia de tonos marrón claro en continuidad aparente con el anterior, y la superior de color amarillo claro, que está separada de la intermedia por una superficie de discontinuidad neta producida por erosión. Las dos capas inferiores corresponden al Magdaleniense, mientras que la superior es Aziliense y es correlacionable con AZ.B. Esta sección no ha sido estudiada ni muestrada por el momento.

Análisis sedimentológicos y edafológicos

Granulometría

Los análisis granulométricos de las muestras de la cueva de Los Azules ofrecen unos resultados que permiten identificar una secuencia detrítica ligeramente granocrecente, con un predominio de arenas y limos, y varios niveles con abundantes gravas distribuidos en el tramo basal (AZ.M y AZ.L) y a techo (AZ.C) y otro en la parte media con gravas menos abundantes (AZ.G) (Tablas 1 y 2, Figura 7). La caracterización textural se muestra en la Tabla 2. Las arcillas apenas están presentes en la secuencia, con porcentajes inferiores al 3,1 %. Las arenas y los limos predominan en el tramo central y en el techo de la secuencia.

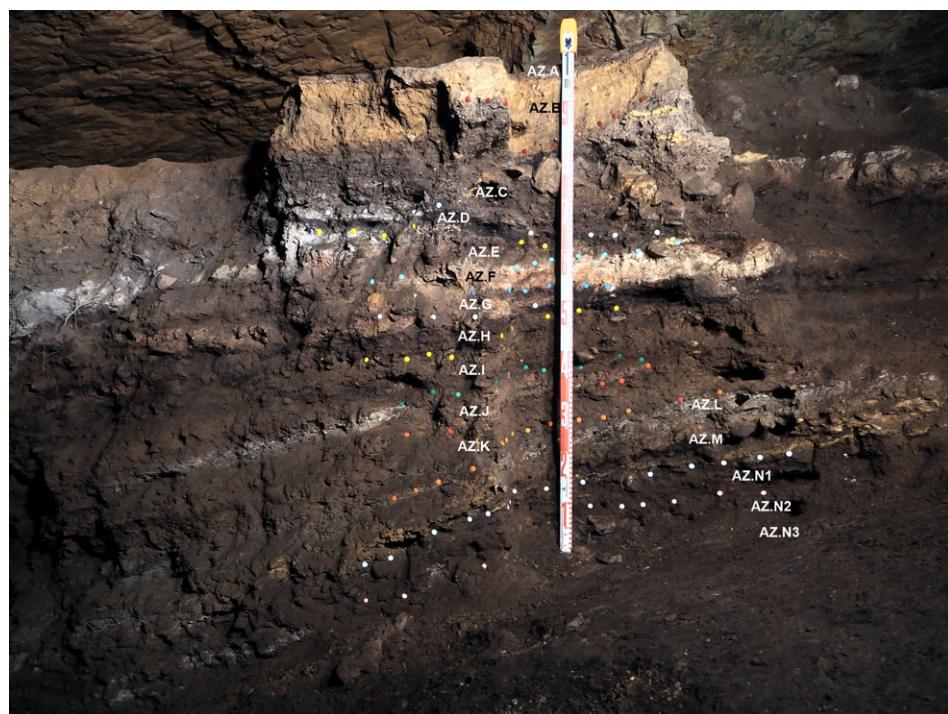


Fig. 4. Secuencia estratigráfica de Los Azules en la sección longitudinal E de la gran cata de Fernández-Tresguerres.

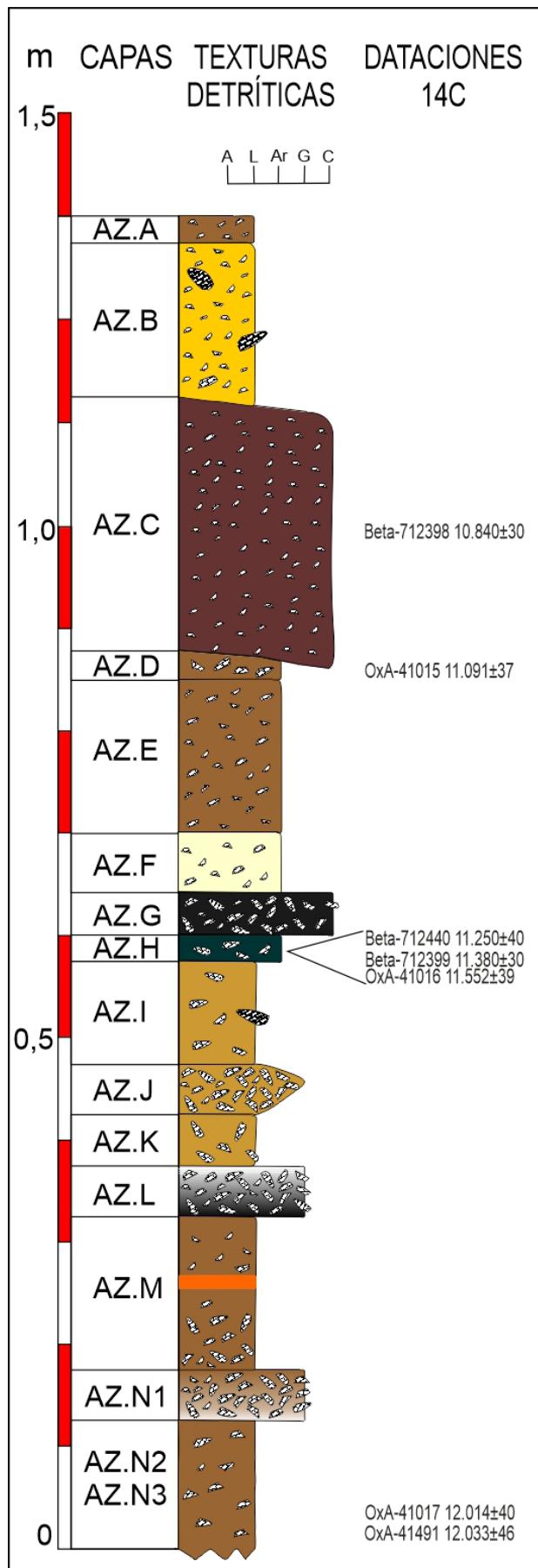


Fig. 5. Secuencia estratigráfica esquemática de Los Azules (A, arcilla; L, limo; Ar, arena, G, grava; C, canto).



Fig. 6. Secuencia estratigráfica de Los Azules en la sección longitudinal O de la gran cata de Fernández-Tresguerres, situada frente a la sección muestreada.

	Gravas	Arenas	Limos	Arcillas
AZ.A	20,36	39,64	38,10	1,90
AZ.B	16,31	38,70	42,42	2,58
AZ.C	68,78	17,37	13,85	0,00
AZ.D	26,53	39,45	34,02	0,00
AZ.E	21,74	40,77	36,40	1,09
AZ.F	6,76	53,73	38,68	0,83
AZ.G	31,15	37,30	30,86	0,68
AZ.H	22,81	40,99	36,00	0,20
AZ.I	13,84	42,97	41,99	1,20
AZ.J	14,52	52,65	32,18	0,65
AZ.K	19,80	43,05	36,37	0,78
AZ.L	59,42	16,52	22,65	1,42
AZ.M	70,14	14,51	14,85	0,50
AZ.N1	40,12	30,45	28,35	1,07
AZ.N2	27,20	31,22	38,47	3,11

Tabla 1. Granulometría de la fracción global (% en peso).

En la fracción fina, predominan las arenas frente a los limos, superando a estos en el tramo medio de la secuencia, mientras que los limos las superan ligeramente a muro y a techo. Las arcillas son muy escasas (< 4 %) y están ausentes en AZ.C y AZ.D (Figura 7).

Como se observa en el diagrama triangular que representa la granulometría global de las muestras (Figura 8 A), los sedimentos de los distintos niveles de la cueva de Los Azules muestran una cierta homogeneidad, situándose en la banda de las arenas fangosas y limos con proporciones variables de gravas, así como en la de las gravas fangosas y gravas arenosas con limos y arcillas. Esta distribución permite diferenciar dos grupos de sedimentos con significados ligeramente diferentes:

- Grupo Azules 1, que engloba los sedimentos del grupo textural de las gravas fangosas (*muddy gravelly*)

Capas / Muestra	Espesor (cm)	Grupo textural	Clasificación	Tipo de sedimento
AZ.A	2	fango con gravas	bimodal, muy mala	limos muy gruesos con gravas finas
AZ.B	10 - 15	fango con gravas	trimodal, muy mala	limos muy gruesos con gravas finas
AZ.C	15 - 25	gravas fangoso-arenosas	trimodal, muy mala	gravas medias arenosas con limos gruesos
AZ.D	0 - 3	arenas fangosas con gravas	trimodal, muy mala	arenas muy finas limosas con gravas finas
AZ.E	0 - 15	arenas fangosas con gravas	polimodal, muy mala	arenas muy finas con limos muy gruesos y gravas medianas
AZ.F	6	arenas fangosas con gravas	polimodal, muy mala	arenas finas con limos muy gruesos y gravas finas
AZ.G	3 - 4	gravas arenoso-fangosas	polimodal, muy mala	gravas medias arenosas con limos muy gruesos
AZ.H	2 - 5	arenas fangosas con gravas	trimodal, muy mala	arenas muy finas con limos muy gruesos y gravas finas
AZ.I	10 - 12	fango con gravas	bimodal, muy mala	limos muy gruesos con gravas finas
AZ.J	4 - 5	arenas fangosas con gravas	trimodal, muy mala	arenas medias con limos muy gruesos
AZ.K	5 - 10	arenas fangosas con gravas	bimodal, muy mala	arenas muy finas con limos gruesos y gravas finas
AZ.L	5	gravas fangosas	polimodal, muy mala	gravas medias con limos muy gruesos
AZ.M	15	gravas fangosas	trimodal, muy mala	gravas medias con limos muy gruesos
AZ.N1	5	gravas arenoso-fangosas	polimodal, muy mala polimodal,	gravas medias arenosas con limos muy gruesos
AZ.N2	10 - 25	fango con gravas	extremadamente muy mala extremely poorly sorted	limos muy gruesos con gravas finas

Tabla 2. Caracterización textural de los sedimentos obtenida mediante el software GRADISTAT Versión 8.0 (Blott y Pye, 2001; Blott, 2010)

vel) (AZ.L) y las gravas arenosas y fangosas (*muddy sandy gravel*) (AZ.C, AZ.M, AZ.N1).

- Grupo Azules 2, formado por sedimentos que corresponden a los grupos texturales de fangos con gravas (*gravelly mud*) (AZ.B, AZ.D) y de arenas fangosas con gravas (*gravelly muddy sand*) (AZ.A, AZ.E, AZ.F, AZ.G., AZ.H, AZ.I, AZ.J., AZ.K, AZ.N2).

Si se prescinde de la fracción grava y se consideran únicamente los tamaños de grano inferiores a 2 mm (Figura 8 B), la homogeneidad del sedimento de las distintas unidades aumenta, pues las muestras se sitúan en el grupo de las arenas limosas (*silty sand*) y de limos arenosos (*sandy silt*).

Tanto los diagramas acumulativos como los triangulares muestran características composicionales muy semejantes a las descritas para los depósitos fluviales de los yacimientos de las cuevas de Coímbre (Peñamellera Alta, Asturias) (Jordá Pardo y Carral González, 2017) y de El Olivo (Llanera, Asturias) (Jordá Pardo *et al.*, 2023).

Las curvas granulométricas de la fracción global son también bastante homogéneas, aunque en ellas pueden diferenciarse tres familias:

- Familia Azules FG-1: incluye las muestras del grupo Azules 1 (AZ.C, AZ.L, AZ.M y AZ.N1), que ofrecen curvas irregulares con un primer tramo cargado de gravas medias y gruesas que suponen entre el 40 % y el 70 % del sedimento, un segundo tramo de gravas medias a muy finas, arenas gruesas a muy finas y limos muy gruesos y gruesos que suponen entre el 20 % y el 50 %, seguido de un tercer tramo muy tendido, con las arenas muy finas, los limos y las arcillas que, en su conjunto, apenas suponen menos del 10 % (Figura 9A). Las curvas de esta familia corresponden a una sedimentación mixta en la que, por un lado, hay aportes de clastos, y por otro, aportes de fangos y arenas fangosas. Estos depósitos serían compatibles con una sedimentación por gelificación, que generaría los clastos,

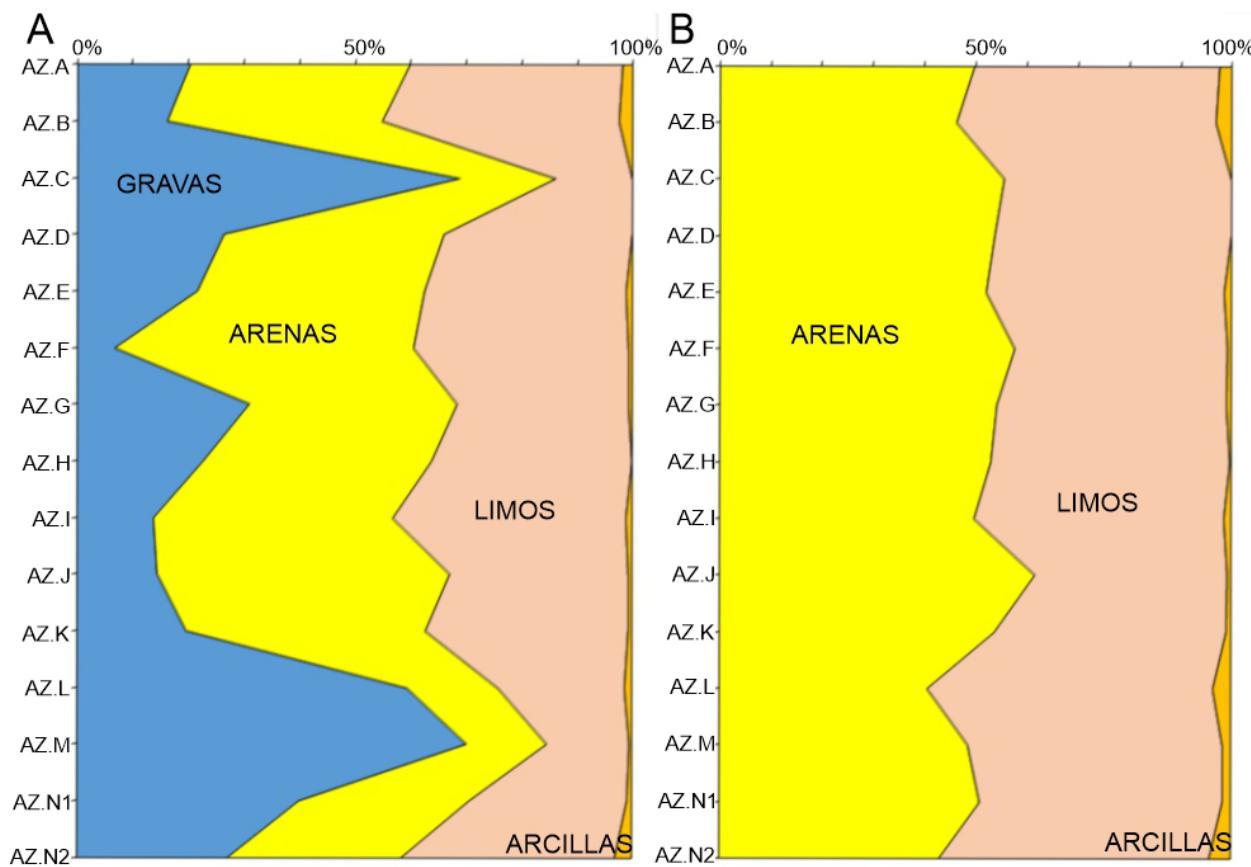


Fig. 7. A. Granulometría de la fracción global (% en peso). B. Granulometría de la fracción fina (< 2mm) (% en peso).

a la que se uniría la acción de arroyada difusa que podría convertirse en finas coladas de fango de tipo *mud flow*, en un medio de baja a moderada energía.

- Familia Azules FG-2a: incluye las muestras del grupo Azules 2, AZ.A, AZ.D, AZ.E, AZ.G, AZ.H y AZ.N2, que ofrecen curvas casi sigmoidales con tres tramos bien marcados: uno inicial convexo hacia arriba con presencia variable de gravas arenas gruesas y medias, un tramo medio inclinado con abundantes arenas finas y muy finas y limos gruesos y medios, y un tercer tramo muy tendido con

el resto de los limos y apenas arcillas (Figura 9B). Estas curvas indican la presencia de una población fundamentalmente compuesta por arenas y limos, acompañada por limos finos y escasas arcillas, y presencia variable de gravas y arenas gruesas. Son indicativas de un medio hídrico de media a baja energía, compatible con la arroyada difusa de aguas sin carga en suspensión.

- Familia Azules FG-2b: incluye las muestras del grupo Azules 2, AZ.N, AZ.F, AZ.I, AZ.K y AZ.J, que ofrecen curvas con forma sigmoidal con tres

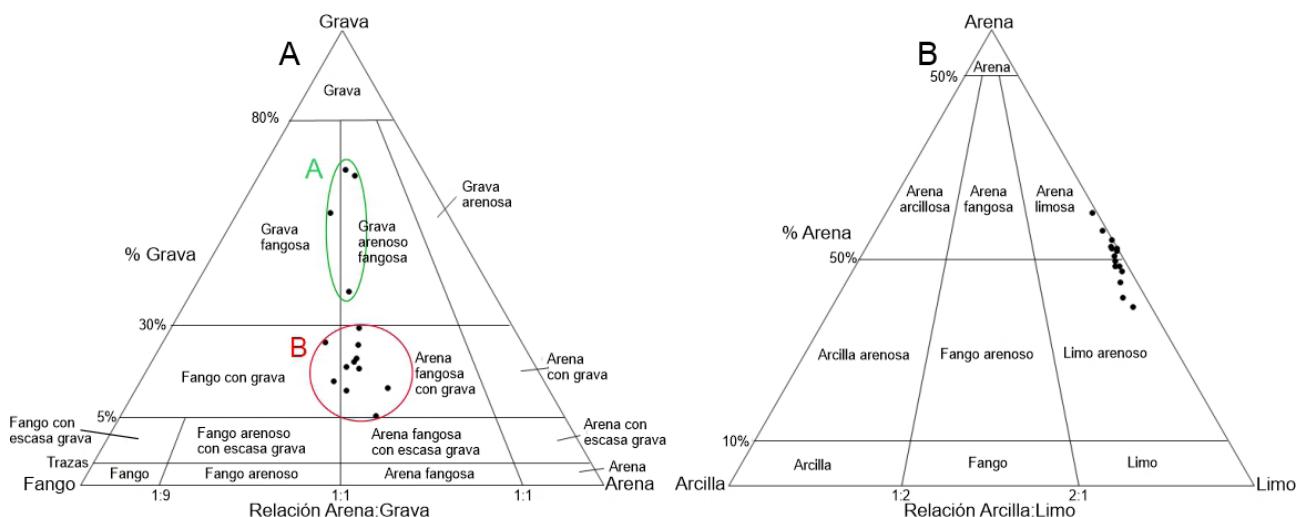


Fig. 8. A. Diagrama triangular la fracción global. B. Diagrama triangular la fracción fina (< 2mm).

tramos muy claros. Uno inicial ligeramente tendido que incluye los tamaños gravas y arenas muy gruesas, gruesas y medias; otro medio, muy verticalizado que comprende desde las arenas finas hasta los limos finos; y uno final, muy tendido, con el resto de los limos y apenas arcillas (Figura 9C). Estos tramos indican la presencia de una población principal constituida por arenas finas y limos, transportada mayoritariamente por suspensión, acompañada por una segunda población, menos numerosa, transportada por rodadura y saltación. Estas curvas son propias de medios fluviales de alta a moderada energía con buen poder clasificador.

En las curvas de la fracción fina ($< 2 \text{ mm}$) que corresponde a la matriz de los sedimentos de la secuencia, las curvas granulométricas se agrupan en una única familia (Fig. 9D) con morfología sigmoidal, con un primer tramo integrado por las arenas gruesas y medias, que no superan el 20%; un segundo tramo, fuertemente inclinado que agrupa las arenas finas y muy finas y la práctica totalidad de los limos, que suponen el 70% de las muestras; y un tercer tramo de tendencia a la horizontalidad con los limos finos y las escasas arcillas que corresponden a menos del 10% del sedimento.

Como ya hemos visto en los diagramas acumulativos y triangulares, las características morfológicas de las curvas

de las familias descritas, tanto de la fracción global como de la fina, presentan ciertas similitudes con las curvas granulométricas de los sedimentos mayoritariamente arenosos depositados por flujos hídricos en las cuevas de Coímbre (Peñamellera Alta, Asturias) (Jordá Pardo y Carral González, 2017) y de El Olivo (Llanera, Asturias) (Jordá Pardo *et al.*, 2023), si bien en Los Azules queda patente que los sedimentos son de tamaño inferior y por tanto la energía del medio es mucho más baja.

Mineralogía

En cuanto a la mineralogía (Tabla 3, Figs. 10 y 11) la secuencia presenta un predominio de silicatos (cuarzos, feldespatos potásicos, plagioclásas, filosilicatos) que suponen entre el 55% y el 90%, frente a los carbonatos (calcita, dolomita, ankerita, aragonito, magnesita), entre el 4% y el 35%, el apatito, entre el 1% y el 8%, los óxidos de hierro (hematites, goethita), entre 1% y el 4%, y el apatito solo presente en el nivel AZ.B.

Entre los silicatos, el cuarzo es mayoritario en la secuencia ($> 46\%$) con un mínimo en el nivel basal AZ.N2 (39%) y sendos máximos en los niveles AZ.M (64%) y AZ.B (65%). En el resto de silicatos, los más abundantes son los filosilicatos (entre 12% y 22%), seguidos de los

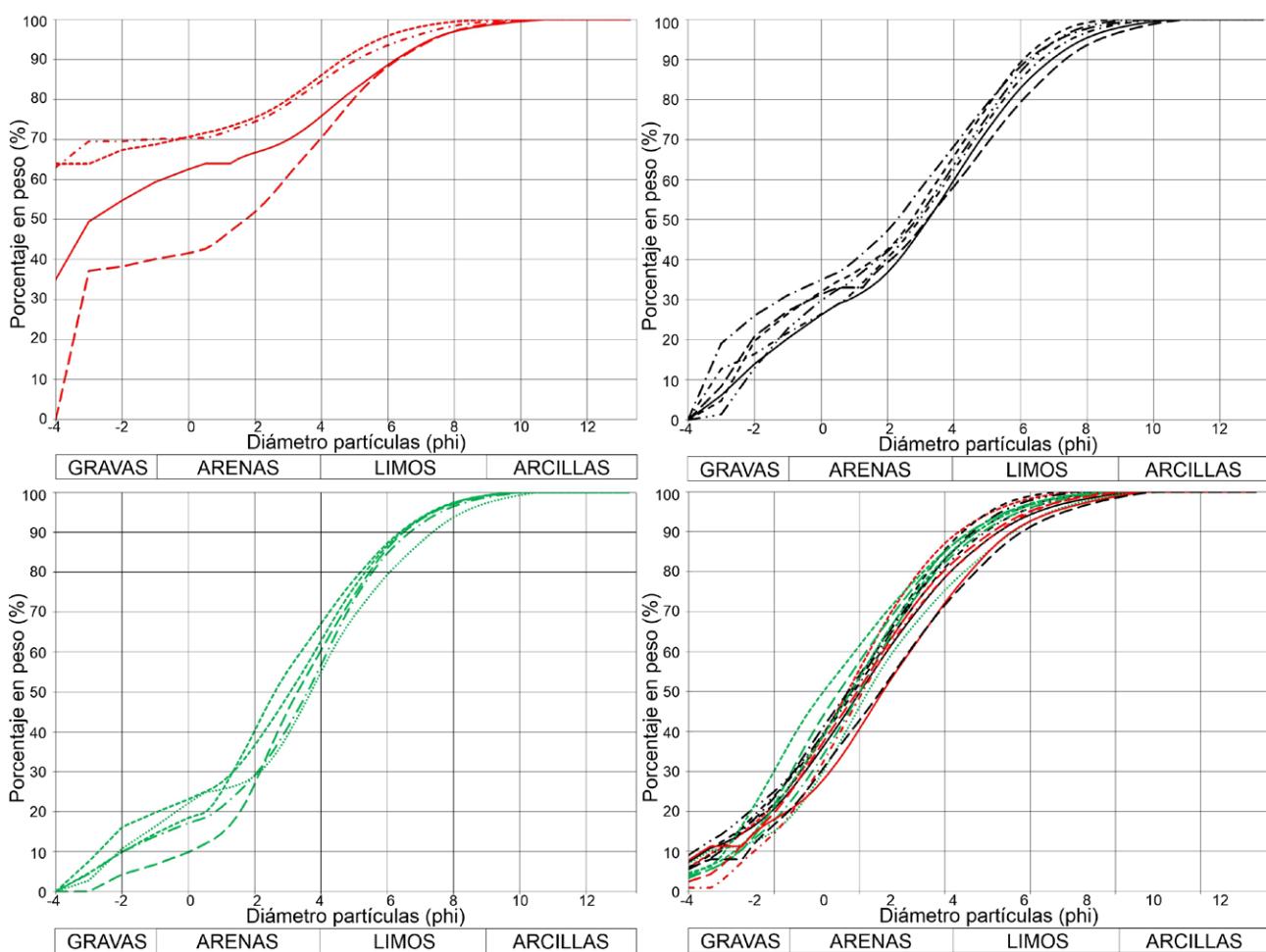


Fig. 9. A, B y C. Curvas granulométricas de la fracción global de las muestras de las familias Azules FG-1, Azules FG-2b, Azules FG-2b. Cueva de Los Azules. D. Curvas granulométricas de la fracción fina del total de las muestras.

Muestras	Cuarzo	Feldes. K	Plagioclasas	Filosilicatos	Calcita	Dolomita	Ankerita	Aragonito	Magnesita	Apatito	Yeso	Hematites	Goethita
AZ.A	54	8	3	18	2	4	0	2	1	5	0	2	1
AZ.B	65	4	2	19	1	0	0	3	0	1	2	1	2
AZ.C	48	6	3	20	5	5	0	4	1	7	0	0	1
AZ.D	46	7	3	22	5	4	0	4	0	8	0	0	1
AZ.E	61	5	2	13	9	2	0	3	1	3	0	0	1
AZ.F	62	6	1	13	11	1	0	3	0	2	0	1	0
AZ.G	48	5	2	13	23	0	0	4	1	2	0	1	1
AZ.H	50	5	2	17	11	1	0	3	1	8	0	1	1
AZ.I	62	4	2	16	5	4	0	2	1	2	0	1	1
AZ.J	63	3	1	14	6	4	3	2	0	2	0	1	1
AZ.K	63	2	1	12	8	2	2	2	1	3	0	1	1
AZ.L	55	4	1	13	18	1	0	2	0	4	0	1	1
AZ.M	64	7	1	18	2	1	0	2	0	2	0	1	2
AZ.N2	39	4	1	12	16	8	8	3	0	7	0	1	1
AZ.N1	46	5	1	14	2	9	10	3	0	6	0	2	2

Tabla 3. Minerales (DRX en %) presentes en la fracción fina.

feldespatos potásicos (entre 4 % y 8 %) y las plagioclásas (entre 1 % y 3 %).

En el grupo de los carbonatos, la calcita es la mejor representada, con un máximo en el nivel AZ.G (23 %) y mínimos en AZ.B (1 %) y AZ.A, AZ.M y AZ.N2 (2 %), seguida por la dolomita que está ausente en AZ.B y AZ.G y tiene un máximo en los dos niveles basales AZ.N2 y AZ.N1 (8 % y 9 %), el aragonito, entre el 2 % y 4 %), la ankerita, solo presente en los dos niveles basales (8 % y 10 %) y AZ.K y AZ.J (2 % y 3 %), y la magnesita, representada con un 1 % en la parte media y superior de la secuencia. El apatito está presente en toda la secuencia con valores mínimos en AZ.B (1 %) y máximos en los dos niveles basales (7 % y 6 %) y medios (AZ.I y AZ.D, 8 %, y AZ.D 7 %). El yeso solo está presente en una proporción del 2 % en el nivel superior AZ.B. Los óxidos de hierro, hematites y goethita están presentes en concentraciones de 1-2% en todos los niveles, con ausencia de hematites en los niveles superiores (AZ.E, AZ.D y AZ.C) y de goethita en AZ.F.

Los minerales que aparecen en los distintos niveles son frecuentes en depósitos detriticos de cavidades kársticas (Hill y Forti, 1997). La abundante presencia de minerales silicatados es compatible con la mineralogía de las rocas de las zonas del entorno de la cavidad y básicamente corresponde a tectosilicatos y filosilicatos de origen alóctono. También son alóctonos los óxidos de hierro y el yeso. Los carbonatos presentes en la secuencia tienen un origen local.

Carbono total, carbono inorgánico y carbono orgánico total

En los sedimentos de la secuencia estudiada la presencia de carbono total, carbono inorgánico y carbono orgánico total es baja (< 7 %) (Tabla 4, Fig. 12), con variaciones alter-

nantes en el carbono total que aumenta notablemente es las muestras AZ.N1, AZ.N2, AZ.H, AZ.G y AZ.C, con valores entre 5,8 % y 11 %, y en el carbono orgánico total que presenta máximos en las muestras AZ.H, AZ.D y AZ.C. Por su parte, el carbono inorgánico muestra una presencia decreciente de muro a techo con un aumento en la parte media (AZ.G), al igual que ocurre en la secuencia con la calcita, cuyo máximo también está en la parte media (AZ.G).

Muestras	% TC	% IC	% TOC
AZ.A	2,4 ± 0,2	0,6 ± 0,1	1,8 ± 0,2
AZ.B	1,8 ± 0,2	0,1 ± 0,1	1,8 ± 0,2
AZ.C	5,2 ± 0,5	0,9 ± 0,1	4,3 ± 0,5
AZ.D	11 ± 1,0	0,7 ± 0,1	10 ± 1,0
AZ.E	4,3 ± 0,4	1,6 ± 0,2	2,7 ± 0,4
AZ.F	2,8 ± 0,3	1,7 ± 0,2	1,1 ± 0,3
AZ.G	6,6 ± 0,7	4,5 ± 0,5	2,1 ± 0,7
AZ.H	7,7 ± 0,8	1,1 ± 0,1	6,6 ± 0,8
AZ.I	3,7 ± 0,4	1,6 ± 0,2	2,1 ± 0,4
AZ.J	3,6 ± 0,4	1,4 ± 0,1	2,2 ± 0,4
AZ.K	4,5 ± 0,4	2,6 ± 0,3	1,9 ± 0,5
AZ.L	4,7 ± 0,4	3,2 ± 0,3	1,5 ± 0,5
AZ.M	1,4 ± 0,4	0,23 ± 0,02	1,2 ± 0,1
AZ.N1	5,8 ± 0,4	3,4 ± 0,3	2,4 ± 0,6
AZ.N2	7,5 ± 0,4	4,9 ± 0,5	2,6 ± 0,8

Tabla 4. Carbono total, carbono inorgánico y carbono orgánico total. pH, color e hidrofobicidad

El pH (Tabla 5, Fig. 13) de los sedimentos de la secuencia ofrece valores ligeramente básicos, en torno a 9, con una disminución a techo, con valores de 7,2 en AZ.B y de 8,2 en AZ.A.

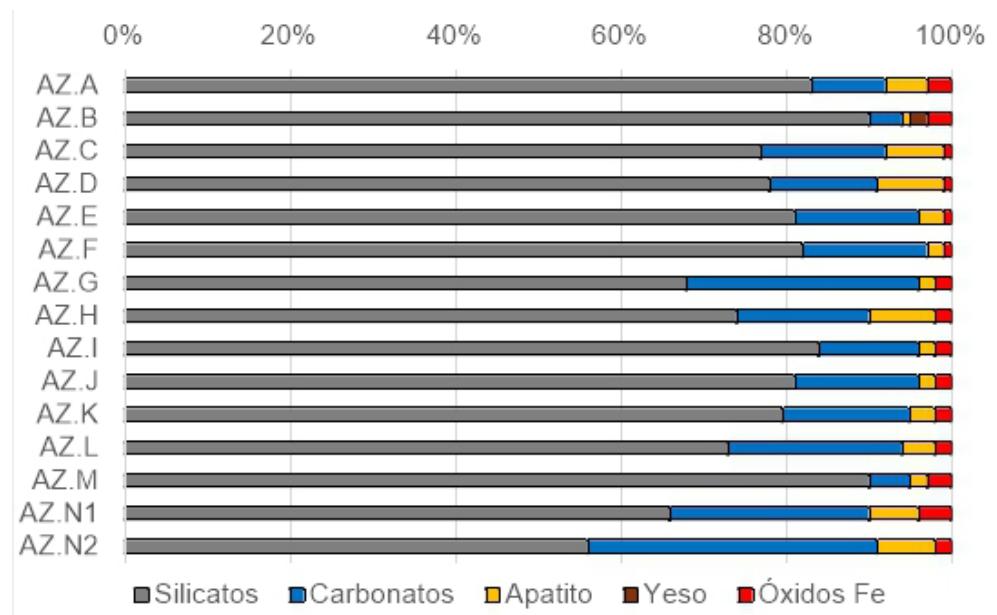


Fig. 10. Grupos mineralógicos (DRX en %) presentes en la fracción fina.

Muestras	pH en H ₂ O
AZ.A	8,2
AZ.B	7,2
AZ.C	9,1
AZ.D	9,1
AZ.E	9,3
AZ.F	9,3
AZ.G	9,3
AZ.H	9,1
AZ.I	9,1
AZ.J	9,3
AZ.K	9,1
AZ.L	9,1
AZ.M	8,9
AZ.N1	9,0
AZ.N2	8,9

Tabla 5. Valores del pH de los sedimentos (error ± 0,1).

A partir de la determinación del color en seco de los sedimentos de la secuencia se observa una cierta uniformidad, con predominio de colores marrones (rojizo-amarillentos) (YR) en sus distintos niveles, que en AZ.B y AZ.E son más rojizos, con luminosidad alta y brillo bajo (Tabla 6). El color en húmedo varía del mismo modo con una mayor homogeneidad de colores y disminuyendo la luminosidad y el brillo.

Durante el procesado de las muestras de cara a la determinación del color, se observó que algunas de ellas ofrecían cierta repelencia al agua o hidrofobicidad. Sin embargo, la mayoría mostraron tiempos de penetración del agua inferiores a 10 segundos, por lo que pueden considerarse hidrófilas. Sólo dos muestras se apartan de este comportamiento: la correspondiente a la capa AZ.B, con 91 segundos, compuesta por sedimentos fuertemente hidrófobos, y la capa AZ.K, con 14 segundos, que es ligeramente hidrófoba.

Muestras	Color en seco	Color en húmedo
AZ.B	5YR 6/4	5YR 5/4
AZ.C	7.5YR 4/3	7.5YR 3/2
AZ.E	5YR 5/2	5YR 4/2
AZ.F	7.5YR 6/2	7.5YR 4/3
AZ.I	7.5YR 5/4	7.5YR 4/3
AZ.J	7.5YR 5/3	7.5YR 4/2
AZ.K	7.5YR 5/3	7.5YR 4/2
AZ.L	7.5YR 6/2	7.5YR 5/2
AZ.M	7.5YR 6/6	7.5YR 4/4
AZ.N2	7.5YR 5/1	7.5YR 3/2

Tabla 6. Color de los sedimentos según la escala Munsell (1981).

Dataciones radiocarbónicas

Contamos con catorce dataciones radiocarbónicas para la secuencia arqueológica de Los Azules, siete publicadas por Fernández-Tresguerres (1976, 1989) de los niveles 3a, 3c, 3d, 3e1, 3e2, 3e3 y 3f, y siete inéditas, obtenidas por nosotros, de las capas AZ.C, AZ.D, AZ.H y AZ.N. Estas últimas presentan una correcta ordenación temporal en la secuencia, sin que se observen inversiones.

Tras someter las fechas al preceptivo examen de validez (Mestres, 1995, 2000, 2003, 2008), observamos que cumplen los requisitos químico-físicos, pues todas las fechas proceden de muestras que corresponden a materiales orgánicos (carbonos y fragmentos óseos) aptos para la datación. En los requisitos analíticos, el de precisión lo cumplen las fechas proporcionadas por ORAU y BETA al ser sus desviaciones típicas menores de 50 años. Por su parte, las fechas CSIC y BM, debido al método usado (datación convencional) y a la época en que se obtuvieron, presentan unas desviaciones típicas entre 120 y 360 años que las hacen escasamente precisas y difíciles de comparar con fechas con desviación típica inferior a 50 años, por lo que no

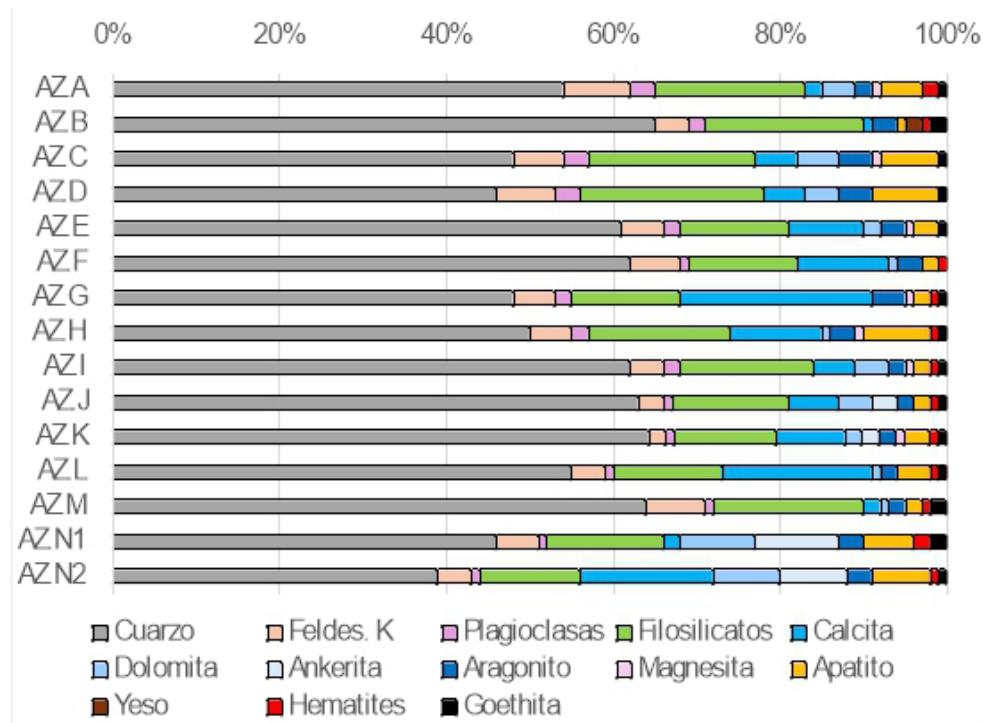


Fig. 11. Mineralogía DRX de la fracción fina de los sedimentos.

las consideraremos en la interpretación cronoestratigráfica. Además, las fechas CSIC ofrecen valores sospechosamente jóvenes en comparación con las fechas obtenidas por nosotros. Aun así, las fechas BM son coincidentes con las de ORAU en términos BP si bien las horquillas calibradas las dotan de gran imprecisión. Respecto a la exactitud, ORAU

cumple el requisito al encontrarse acreditado según la norma ISO-9001 Gestión de Calidad por la *British Standards Institution* para el suministro de mediciones de radiocarbono (<https://c14.arch.ox.ac.uk/>) y BETA está acreditada según la norma ISO/IEC-17025:2017 para la determinación de edades radiocarbónicas de muestras arqueológicas median-

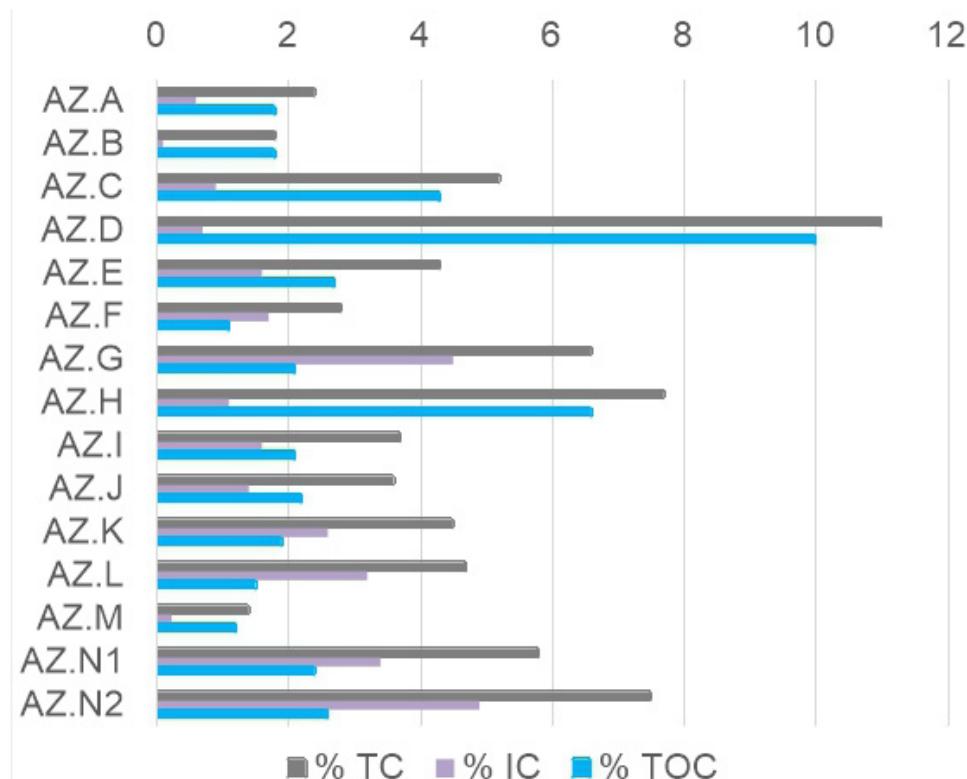


Fig. 12. Presencia (%) de Carbono total (TC), carbono inorgánico (CI) y carbono orgánico total (TOC) en los sedimentos de la secuencia.

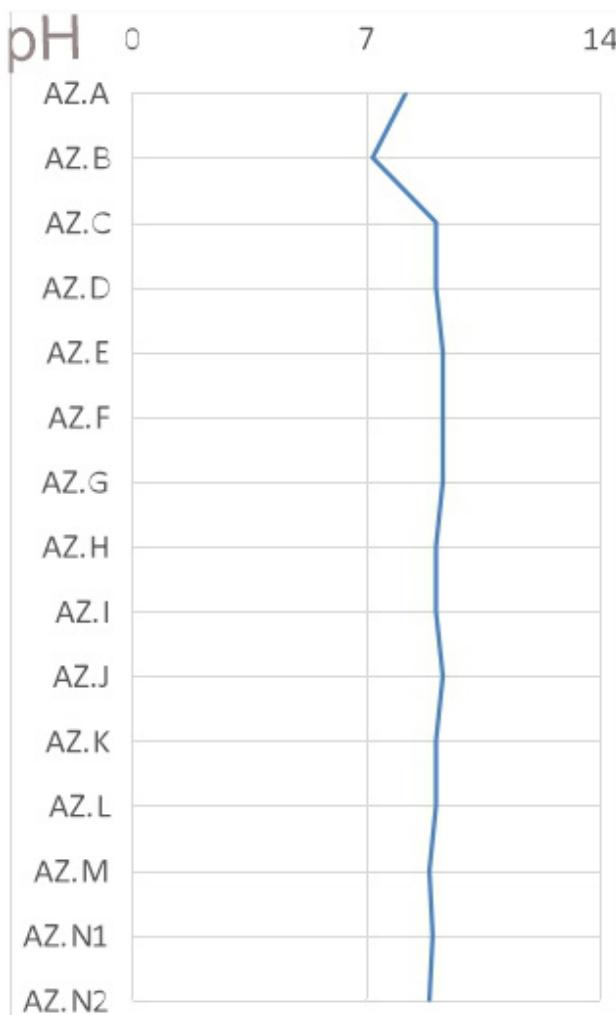


Fig. 13. Valores del pH de los sedimentos.

te AMS (<https://www.radiocarbon.com/iso-certified.htm>), mientras que de MB y CSIC no disponemos de información al respecto. Finalmente, en el orden arqueológico, las fechas de ORAU cumplen el requisito de asociación, dado que no parece existir duda razonable de que los carbonos y huesos datados no sean producto de la actividad antrópica. Respecto a la sincronía, las muestras óseas corresponden a organismos de vida corta cazados (macromamíferos), por lo que podemos considerarlas sincrónicas a la actividad antrópica que las depositó.

Hemos procedido al calibrado de todas fechas ^{14}C mediante la curva de calibración IntCal 20 (Reimer *et al.*, 2020) incluida en el software CalPal 2025.5 (Weninger y Jöris, 2008). En la tabla 7 se muestran los resultados de las catorce fechas radiocarbónicas, indicando las fechas ^{14}C convencionales acompañadas de su incertidumbre expresada como la desviación típica (σ) de su distribución de probabilidad y los resultados de su calibración. Se indican las fechas calibradas correspondientes a los intervalos centrados en las modas de la distribución de probabilidad de la fecha calibrada verdadera, correspondientes a una probabilidad total del 95% (calibración 2σ), expresadas como fechas cal. BP (0 = AD 1950).

La secuencia aziliense arranca *ca.* 14.000-13.750 cal

BP con la capa N cuyos materiales corresponden a un Aziliense antiguo en pleno Tardiglacial. Esta capa descansa sobre depósitos del Magdaleniense superior (no estudiados en este trabajo). La siguiente capa datada, la AZ.H, con materiales del Aziliense clásico, se encuentra en la horquilla 13.510-13.070 cal PB en la segunda mitad del Tardiglacial; esta capa corresponde al subnivel 3e3 de Fernandez-Tresguerres (1980) fechado con BM-1877R 11.320±360 BP (Fernández-Tresguerres, 1989), cuya amplia horquilla calibrada 13.910-12.550 cal BP, debida a su escasa precisión, engloba el lapso calibrado de las fechas ORAU. Hacia el techo, la capa AZ.D con Aziliense clásico, nos ha proporcionado la horquilla calendárica 13.130-12.890 cal BP, en el tramo final del Tardiglacial; esta estrecha horquilla temporal se encuentra englobada en el amplio lapso 13.220-12.460 cal BP de la fecha del nivel ligeramente superior 3d2 de Fernandez-Tresguerres (1980) datado mediante BM-1876R 10.880±210 (Fernández-Tresguerres, 1989). La siguiente capa datada, AZ.C, con materiales del Aziliense fechada en la horquilla 12.830-12.710 cal BP, se emplazó ya en el Dryas reciente, al igual que los niveles 3e2, 3e1 y 3 c de Fernandez-Tresguerres (1980) datados en la amplia horquilla 13.220-11.890 cal BP.

Interpretación geoarqueológica y cronoestratigráfica

Interpretación geoarqueológica

A partir de la descripción litoestratigráfica y la caracterización sedimentológica y edafológica de los sedimentos de la sección longitudinal este de los depósitos de la cueva de Los Azules, parece evidente que su génesis está relacionada con una sedimentación en la que intervienen dos tipos de procesos fundamentales. Por un lado, el funcionamiento de flujos hídricos de baja a moderada a energía, responsables de la sedimentación de las arenas y los limos que constituyen mayoritariamente los depósitos. Estos flujos circularían de forma entrelazada, dando lugar a delgados mantos de arroyada difusa (*sheet flood*), y estarían provocados por precipitaciones en forma de lluvia de moderada intensidad que penetrarían por escorrentía superficial en el interior de la cavidad arrastrando partículas finas como arenas y limos. No se observan procesos de encarcamiento ni de decantación. Por otro lado, de manera ocasional a lo largo de la secuencia se observan tres momentos de aportes clásticos de la roca del sustrato producidos por procesos gravitacionales posiblemente inducidos por la alternancia de flujos de hielo y deshielo (*gelifracción*). Ambos tipos de procesos se observan bien en depósitos de similar cronología de otros yacimientos como son las cuevas de Coímbre (Peñamellera Alta, Asturias) (Jordá Pardo y Carral González, 2017), de El Olivo (Llanera, Asturias) (Jordá Pardo *et al.*, 2023) y de La Güelga (Narciandi, Cangas de Onís) (Jordá Pardo *et al.*, 2013). Es significativo que el yacimiento aziliense de Los Azules constituye un lugar preservado dentro de la cavidad, donde la acumulación producida durante las ocupaciones azilienses de la cueva no han sufrido posterior erosión. Esta sí se manifiesta en la sección estratigráfica oeste, donde la capa detrítica amarilla (denominada

Intervención	Nivel/Capa	Método	Material	Cod. Lab.	Fecha cal BP	σ	Periodo	Publicación
	3a	14C	hueso	CSIC-216	9.430	120	11.210 -10.290	Fernández-Tresguerres 1976
	3c	14C	hueso	BM-1879R	10.510	130	12.850 -11.890	Fernández-Tresguerres 1989
	3d	14C	hueso	CSIC-260	9.540	120	11.280 -10.480	Fernández-Tresguerres 1976
1973-1992	3e1	14C	hueso	BM-1875R	10.480	210	12.920 -11.640	Aziliense
	3e2	14C	hueso	BM-1876R	10.880	210	13.220 -12.460	Fernández-Tresguerres 1989
	3e3	14C	hueso	BM-1877R	11.320	360	13.910 -12.550	
	3f	14C	hueso	BM-1878R	10.910	290	13.410 -12.170	
	AZ.C	14C AMS	carbón	Beta-712398	10.840	30	12.830 -12.710	
	AZ.D (=3d2)	14C AMS	hueso con impactos antrópicos (mamífero talla media)	OxA-41015	11.091	37	13.130 -12.890	
	AZ.H (=3e)	14C AMS	carbón	Beta-712400	11.250	40	13.230 -13.070	Aziliense
2019-actualidad	AZ.H (=3e)	14C AMS	carbón	Beta-712399	11.380	30	13.350 -13.150	inéditas
	AZ.H (=3e)	14C AMS	hueso con impactos antrópicos (mamífero talla media)	OxA-41016	11.552	39	13.510 -13.310	
	AZ.N3 (=5)	14C AMS	hueso con impactos antrópicos (mamífero talla media)	OxA-41017	12.014	40	14.070 -13.750	Aziliense
	AZ.N3 (=5)	14C AMS	hueso con impactos antrópicos (mamífero talla media)	OxA-41491	12.033	46	14.080 -13.760	antiguo

Tabla 7. Dataciones radiocarbónicas del yacimiento de Los Azules. La calibración se ha realizado usando la curva IntCal 20 (Reimer *et al.*, 2020) y el software CalPal 2025.5 (Weninger y Jöris, 2008).

AZ.2) situada a techo es fuertemente erosiva y descansa directamente sobre depósitos del Magdaleniense superior (Fig. 6).

La mineralogía de la fracción fina de los sedimentos se caracteriza por una elevada presencia de minerales silicatados, con predominio del cuarzo, lo que indica una procedencia alóctona que es compatible con la mineralogía de las rocas del entorno de la cavidad, como ocurre en otros yacimientos de la zona (Jordá Pardo *et al.*, 2018). La elevada presencia de plagioclásas, feldespatos y filosilicatos, que acompañan al cuarzo, indica una baja madurez textural, indicativa de que los sedimentos han sufrido un transporte corto. Los diferentes minerales carbonatados presentes son propios del interior del karst (De Waale y Gutiérrez, 2022) y la presencia de apatito en toda la secuencia indica una fuerte alteración de los fragmentos de huesos de origen antrópico (Hill y Forti, 1997; De Waale y Gutiérrez, 2022), como se ha constatado en otros yacimientos cantábricos (Jordá Pardo *et al.*, 2008; Baena *et al.*, 2021). La presencia de óxidos de hierro puede estar en relación con procesos de oxidación producidos en el interior del karst (De Waale y Gutiérrez, 2022) o con aportes del exterior mediante un transporte corto.

La presencia de carbonatos es constante en toda la secuencia con un máximo de carbonato inorgánico coincidente con el máximo de calcita, y una elevada presencia de carbono orgánico, que está en relación con la actividad humana. La hidrofobicidad está fundamentalmente relacionada con la cantidad de lípidos y ácidos grasos provenientes de la materia orgánica, lo que también está relacionado con una disminución del pH. La gama de colores de la secuencia también está relacionada con la presencia de materia orgánica de aporte antrópico.

Interpretación cronoestratigráfica

Para establecer la situación cronoestratigráfica en la escala del Pleistoceno superior final se consideran únicamente las curvas de probabilidad acumulada obtenidas a partir de la calibración de las nuevas dataciones que presentamos en este trabajo obtenidas en los laboratorios ORAU y BETA, dada su mayor precisión y la calidad acreditada de ambos centros.

Cronoestratigráficamente, las dataciones radiocarbónicas calibradas sitúan con precisión la secuencia estratigráfica de Los Azules en la horquilla cronológica entre 14.080 y 12.710 cal BP situada a finales del Pleistoceno superior final (OIS 2), que comprende la segunda mitad del interestadio templado Tardiglacial o GI 1 y el primer tercio del estadio de características más frías del Dryas reciente o GS 1 (Fig. 14). Esta horquilla cronológica para el Aziliense de Los Azules concuerda plenamente con la propuesta por Hevia-Carrillo *et al.* (2019) y Álvarez-Alonso *et al.* (2022), que sitúan el inicio del Aziliense cantábrico entre 14.100 y 13.600 cal BP y el final del periodo entre 11.000 y 10.400 cal BP. No obstante, con las nuevas dataciones AMS es muy probable que este límite superior se retrase al introducirse en los modelos cronoestratigráficos nuevas dataciones AMS más precisas.

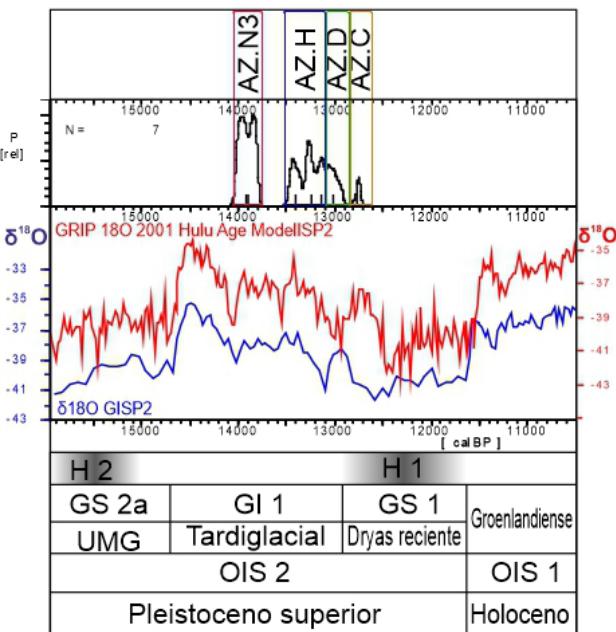


Fig. 14. Cronoestratigrafía de Los Azules a partir de las curvas de probabilidad acumulada de las fechas 14C calibradas con IntCal 20 (Reimer *et al.*, 2020) y el software CalPal 2025.5 (Weninger y Jöris, 2008), comparadas con las proxies $\delta^{18}\text{O}$ GISP2 (Grootes *et al.*, 1993; Meese *et al.*, 1994) y GRIP 18O 2001 Hulu Age Model (Johnsen *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2001).

Las dataciones de Los Azules guardan una buena correlación con las obtenidas para estos momentos en otros yacimientos del valle del Sella, como las de los niveles azilienses (CIERRO C y CIERRO D) de la cueva de El Cierro (Ribadesella, Asturias), que ofrecen una horquilla calibrada entre 13.060 y 12.674 cal BP (Jordá Pardo *et al.*, 2018, 2024), y las de la capa C del Testigo III de La Lloseta cuya horquilla calibrada es 12.870-11.220 cal BP (Martínez-Villa, 2022). También hay coincidencia con la fecha del nivel aziliense de la Cuevona de Avín (Asturias) (Álvarez-Fernández *et al.*, 2022) y con las de los niveles azilienses de El Mirón (Cantabria) (Straus y Gonzalez Morales, 2010).

Por otro lado, es un hecho significativo la presencia de sedimentación continua en estos momentos del Pleistoceno superior final en la cueva de Los Azules, teniendo en cuenta que en otros yacimientos del valle del Sella está ausente, como es el caso de Cova Rosa, donde existe un hiato importante con ausencia completa de registro durante el Tardiglacial (GI 1) y el Dryas reciente (GS 1) (Álvarez-Fernández *et al.*, 2021). Esta ausencia de registro estratigráfico durante el Dryas reciente ha sido testificada en numerosos yacimientos del valle del Ebro y del litoral mediterráneo (Aura *et al.*, 2011). En este sentido, la integridad estratigráfica del registro aziliense constituye un hecho aislado en la cuenca del Sella y otras zonas de Asturias.

Conclusiones

El yacimiento de la cueva de Los Azules constituye uno de los registros más importantes del periodo Aziliense de la cornisa cantábrica gracias a su potente serie estratigráfica que cubre un periodo de tiempo del final del Pleistoceno

superior, ausente en otros yacimientos cantábricos, siendo un yacimiento clave para entender el proceso de transición entre el Magdaleniense y el Aziliense en esta región. Dentro del contexto regional del valle del Sella, en donde se encuentra, la cueva de Los Azules contiene un yacimiento clave para el estudio en la cornisa cantábrica del Aziliense,

El estudio geoarqueológico del yacimiento aziliense de Los Azules permite interpretar su secuencia sedimentaria como una sucesión de cortos y numerosos eventos de sedimentación por arroyada difusa de baja a moderada energía de procedencia no muy lejana, con aportes gravitacionales relacionados con ciclos de hielo-deshielo de baja intensidad. Durante toda esta sedimentación los aportes antrópicos son muy relevantes, con incorporación de abundante materia orgánica, fragmentos óseos y restos de industrias líticas. La baja energía de los procesos geológicos implicados en la formación de la secuencia es una garantía de la escasa alteración y movilización sufrida por los elementos de origen antrópico que forman parte de su registro arqueológico. Estos procesos son frecuentes en los registros arqueosedimentarios de los yacimientos pleistocenos de Asturias oriental.

Las nuevas dataciones radiocarbónicas de Los Azules permiten situar con precisión su secuencia en la escala cronoestratigráfica del Cuaternario, en un lapso cronológico comprendido entre 14.080 y 12.710 cal BP, en el final del Pleistoceno superior, que incluye el interestadio de características climáticas benignas del Tardiglacial (GI 1) y el estadio frío del Dryas reciente (GS 1). Las nuevas dataciones sitúan claramente la secuencia aziliense de Los Azules en la horquilla cronológica calculada para el Aziliense cantábrico, dentro del Pleistoceno superior final, sin llegar a edades holocenas.

Este trabajo es una primera aportación al conocimiento exhaustivo del registro arqueológico de Los Azules. Los resultados de los diferentes estudios interdisciplinares que se están llevando a cabo actualmente sobre los diferentes componentes de su registro geoarqueológico permitirán en los próximos años obtener un mejor conocimiento de este importante yacimiento asturiano.

Agradecimientos

El presente estudio ha sido financiado por el proyecto CantabricOIS2 (PID2020-115192GB-I00) (IP: JFJP) de la Agencia Estatal de Investigación. La intervención en la cueva de Los Azules ha sido financiada en el marco del proyecto “Análisis cronoestratigráfico de la transición Magdaleniense/Aziliense en la cueva de Los Azules (Contranquil, Cangas de Onís)” (UCM AYUD/2024/2265) subvencionado por el Principau d’Asturias, así como por el programa de ayudas para analíticas de la Fundación Palarq. Agradecemos a la Consejería de Cultura, Política Llingüística y Turismo del Principau d’Asturias los permisos otorgados desde 2019 para la intervención en el yacimiento y al Centro de Asistencia a la Investigación de Técnicas Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid sus comentarios sobre los análisis realizados. Agradecemos a los revisores del manuscrito y a la editora de la RSGE sus aportaciones y comentarios para la mejora del trabajo

Contribución de autores/as

Elaboración del trabajo, J.F.J.P. y D.A.-A.; metodología, J.F.J.P. y P.C.; obtención de datos, J.F.J.P., P.C., D.A.-A., M.A.-H., A.H.-C. y J.M.V.-R.; figuras, J.F.J.P. y D.A.-A.; investigación/análisis, J.F.J.P., P.C., D.A.-A., M.A.-H., A.H.-C. y J.M.V.-R.; revisión del manuscrito, J.F.J.P., P.C., D.A.-A., M.A.-H., A.H.-C. y J.M.V.-R.; coordinación, J.F.J.P.; supervisión, J.F.J.P.; obtención de financiación, J.F.J.P. y D.A.-A.

Referencias

- Álvarez-Alonso, D, Hevia-Carrillo, A., Andrés-Herrero, M. de, Carboyo Usano, M., 2022. El Aziliense cantábrico y la continuidad cultural en la transición Pleistoceno superior/ Holoceno. *Sagvntvm* (P.L.A.V.), 54: 9-26. <https://doi.org/10.7203/SAGVNTVM.54.23690>
- Álvarez-Alonso, D., Hevia-Carrillo, A., Andrés-Herrero, M. de., Coya Alález, L., Vázquez-Rodríguez, J. M., Arrizabalaga, A., Iriarte-Chiapusso, M. J., Jordá Pardo, J. F., Martínez-Villa, A., Sainz de los Terreros, J.Y., 2022a. La Cueva de Los Azules (Cangas de Onís, Asturias, España), 50 años después. En: Descendiendo el río Sella. Una (re)visión de la Arqueología Prehistórica del valle del Sella (Asturias, España) (J. Jordá Pardo, S. Martín-Jarque, R. Portero Hernández y E. Álvarez Fernández, eds.). UNED Asturias. Entemu, XIX: 335-360.
- Álvarez-Alonso, D., Hevia-Carrillo, A., Andrés-Herrero, M. de., Vázquez-Rodríguez, J. M., Coya Alález, L., 2025. Excavaciones en la cueva de Los Azules (Cangas de Onís) 2022-2024. Excavaciones Arqueológicas en Asturias 2021-2024, 10. Consejería de Cultura, Política Llingüística y Turismo - Gobiernu del Principau d’Asturias, Oviedo.
- Álvarez-Alonso, D., Hevia-Carrillo, A., Andrés-Herrero, M. de., Vázquez Rodríguez, J.M., Coya Alaez, L., Arrizabalaga, A., Iriarte Chiapusso, M.J., Jordá Pardo, J.F., 2022b. Nuevas investigaciones en la cueva de Los Azules (Cangas de Onís): campañas 2019-2020. Excavaciones Arqueológicas en Asturias 2017-2020, 9. Consejería de Cultura, Política Llingüística y Turismo - Gobiernu del Principau d’Asturias, Oviedo, 115-120.
- Álvarez-Fernández, E., Jordá Pardo, J.F., Arias, P., Bécares, J., Martín-Jarque, S., Portero, R., Teira, L., Douka, K., 2021. Radiocarbon dates for the Late Pleistocene and Early Holocene occupations of Cova Rosa (Ribadesella, Asturias, Spain). *Radiocarbon*, 63 (3), 20-05-2021: 1.05-1.072 <https://doi.org/10.1017/RDC.2021.18>
- Álvarez-Fernández; E., Martín-Jarque, S., Rodrigo Portero, R., Vadillo Conesa, M., Martínez-Villa, A., Aparicio, M.T., Armenteros, I., Cerezo-Fernández, R., Domingo, R., García-Ibañarriaga, N., González, F.J., Llorente, L., Rufa, A., Tarriño, A., Uzquiano, P., Pinto-Llona. A.C., 2022. La Cuevona de Avín (Avín, Asturias, North Spain): A new Late Pleistocene site in the lower valley of the River Güeña. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 45: 10359. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2022.103591>
- Aura, J.E., Jordá, J.F., Montes, L., Utrilla, P., 2011. Human responses to Younger Dryas in the Ebro valley and Mediterranean watershed (Eastern Spain). *Quaternary International*, 242: 348-359. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.01.023>
- Baena J., Jordá Pardo J. F., Carrión Santafe E., Torres Navas C., Carral Gonzalez P., Yravedra Sainz De Los Terreros, J., 2021. A road to nowhere? The non-transitional sequence at El Esquilleu (Cantabria, Spain). En: *Palaeolithic of Northwest Iberia*

- ria and beyond: multidisciplinary approaches to the analysis of Late Quaternary hunter-gatherer societies, (X.P. Rodríguez Álvarez, M. Otte, M., A. de Lombera-Hermida y R. Fábregas-Valcarce, Eds.). Comptes Rendus Palevol, 20 (16): 277-295. <https://doi.org/10.5852/cr-palevol2021v20a16>
- Beta Analytic Receives ISO/IEC 17025:2017 Accreditation. Disponible en <https://www.radiocarbon.com/iso-certified.htm> [consultado 28/07/2025]
- Björck, S., Walker, M.J.C., Cwynar, L.C., Johnsen, S., Knudsen, K.-L., Lowe, J.J., Wohlfarth, B., 1998. An event stratigraphy for the Last Termination in the north Atlantic based on the Greenland Ice Core record: a proposal by the INTIMATE group. Journal of Quaternary Science, 13: 283-292. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.09.016>
- Blott, S.J., 2010. GRADISTAT Version 8.0. A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments by Sieving or Laser Granulometer. Kenneth Pye Associates Ltd., Crowthorne Enterprise Centre, Old Wokingham Road, Crowthorne.
- Blott, S.J., Pye, K., 2001. GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. Earth Surface Processes and Landforms, 26: 1237-1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Brock, F., Higham, T.F.G., Ditchfield, P., Ramsey, C.B., 2010. Current pre-treatment methods for AMS radiocarbon dating at the Oxford Radiocarbon Accelerator Unit (ORAU). Radiocarbon, 52: 103-112. <https://doi.org/10.1017/S0033822200045069>
- Chung, F.H., 1975. Quantitative interpretation of X-Ray diffraction patterns. III. Simultaneous determination of a set of reference intensities. Journal of Applied Crystallography, 8 (1): 17-19. <https://doi.org/10.1107/S0021889875009454>
- De Waale, J., Gutiérrez, F., 2022. Karst Hydrogeology, Geomorphology and Caves. Wiley-Blackwell, Croydon, U.K. <https://doi.org/10.1002/9781119605379>
- Díaz y Martínez, F., Martínez Faedo, L., 2012. Juan Antonio Fernández-Tresguerres en Los Azules. En: La construcción de la nueva Prehistoria en la Asturias del último franquismo (1967-1975). Ad Orientem: del final del Paleolítico en el norte de España a las primeras civilizaciones del Oriente Próximo (J. R. Muñiz, ed.). Ménsula Ediciones, Oviedo, 57-90.
- Fernández-Tresguerres, J.A., 1976. Excavaciones en la Cueva de los Azules, Contranquil, Cangas de Onís (Asturias). Noticiario Arqueológico Hispano, 5: 77-84.
- Fernández-Tresguerres Velasco J.A., 1980. El Aziliense en las Provincias de Asturias y Santander. Centro de Investigación y Museo de Altamira, Monografías nº 2. Ministerio de Cultura, Santander.
- Fernández-Tresguerres, J.A., 1989. Thoughts on the Transition from the Magdalenian to the Azilian in Cantabria: Evidence from the Cueva de Los Azules, Asturias. En: The Mesolithic in Europe. Proceedings of the Third International Symposium, Edinburgh 1985 (C. Bonsall, ed.). John Donald Publishers Ltd., Edinburgh, 582-588.
- Fernández-Tresguerres, J.A., 2004. El final del Paleolítico en los espacios cantábricos: El Aziliense. En: Las Sociedades del Paleolítico en la Región Cantábrica (M.A. Fano, coord.) (Kobie Serie Anejos, 8). Bizkaiko Foru Aldundia/Diputación Foral de Bizkaia, Bilbao: 309-336.
- Fernández-Tresguerres, J.A., Junceda, F., 1992. Informe sobre las campañas de excavación realizadas en la cueva de los Azules entre 1986 y 1990. Excavaciones Arqueológicas en Asturias (1987-90), 2. Consejería de Educación, Cultura, Deportes y Juventud, Principado de Asturias, Oviedo, 89-94.
- Fernández-Tresguerres, J.A., Junceda, F., 1995. Cueva de los Azules. 1991-1994. Excavaciones Arqueológicas en Asturias (1991-1994), 3. Consejería de Cultura, Principado de Asturias, Oviedo, 63-64.
- Fernández-Tresguerres, J.A. Rodríguez Fernández, J.A., 1990. La Cueva de Los Azules (Cangas de Onís). Excavaciones Arqueológicas en Asturias (1983-1986), 1. Consejería de Educación, Cultura y Deportes, Principado de Asturias, Oviedo, 129-133.
- García-Ramos, J.C., Gutiérrez Claverol, M., 1995. La cobertura mesozoico-terciaria. En: Geología de Asturias (C. Aramburu y F. Bastida, eds.). Ediciones Trea S.L., Gijón, 81-94.
- Grootes, P.M., Stuiver, M., White, J.W.C., Johnsen, S.J. Jouzel, J., 1993. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. Nature, 366: 552-554. <https://doi.org/10.1038/366552a0>
- Hevia-Carrillo, A., Álvarez-Alonso, D., Andrés Herrero, M. de., Jordá Pardo, J.F., 2019. El contexto cronocultural y paleoecológico de los últimos cazadores-recolectores cantábricos (Aziliense/Mesolítico). En: Paleoambiente y recursos bióticos del Pleistoceno superior cantábrico (N. García-Ibaibarriaga, X. Murelaga Bereikua, A. Suárez Bilbao, O. Suárez Hernando, coords.). Kobie anejos 18. Diputación Foral de Bizaia, Bilbao, 169-180.
- Hill, C.A., Forti, P., 1997. Cave Minerals of the World, 2nd Edition. National Speleological Society, Huntsville.
- IGME (en línea). Mapa Geológico Continuo de España a escala 1/50.000. Disponible en <http://info.igme.es/visorweb/> [consultado 28/07/2025]
- Johnsen, S.J., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N., Steffensen, J.P., Clausen, H.B., Miller, H., Masson-Delmotte, V., Sveinbjörnsson, A.E., White, J., 2001. Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and NorthGRIP. Journal of Quaternary Science, 16 (4): 299-307. <https://doi.org/10.1002/JQS.622>
- Jordá Pardo, J.F., Baena Preysler, J., Carral González, P., García-Guinea, J., Correcher Delgado, V., Yravedra Sainz de los Terreros, J., 2008. Procesos sedimentarios y diagenéticos en el registro arqueológico del yacimiento pleistoceno de la cueva de El Esquilleu (Picos de Europa, Norte de España). Cuaternario y Geomorfología, 22 (3-4): 31-46.
- Jordá Pardo, J.F., Bécares, J., Portero, R., Martín-Jarque, S., Duarte, C., Iriarte Chiapuso, M.J., Palencia Ortas, A., Arias Cabal, P., Teira, L.C., Álvarez-Fernández, E., 2024. Retorno a dos viejos yacimientos del Pleistoceno superior y Holoceno inferior del valle del Sella. El Cierro (Fresnu) y Cova Rosa (Sardéu), Ribadesella, Asturias, campañas de 2017 y 2019. En: De las cuevas paleolíticas a los monasterios medievales. Trabajos en homenaje a la arqueóloga Gema E. Adán Álvarez (J.F. Jordá Pardo, R. Alonso Álvarez, A. Martínez-Villa, J. E. Aura Tortosa, E. Álvarez-Fernández, D. Álvarez-Alonso, eds.). UNED Asturias. Entemu XX: 131-167.
- Jordá Pardo, J.F., Carral González, P., 2017. Estudio litoestratigráfico, sedimentológico y edafológico del registro del Pleistoceno superior de la Zona B de la cueva de Coímbre (Asturias, España). En: La cueva de Coímbre (Peñamellera Alta, Asturias), (D. Álvarez-Alonso, J. Yravedra Sainz de los Terreros, eds.), Fundación Masaveu, Oviedo, 170-185.
- Jordá Pardo, J.F., Menéndez Fernández, M., Carral González, P., Quesada López, J.M., Wood, R., 2013. Geoarchaeology and Chronostratigraphy of the Middle-Upper Palaeolithic transition at the cave of La Güelga (Cangas de Onís, Asturias, Spain). En: Pleistocene foragers on the Iberian Peninsula: Their culture and environment. Festschrift in honour of Gerd - Christian Weniger for his sixtieth birthday, (A. Pastoors

- y B. Auffermann, Eds.). *Wissenschaftliche Schriften des Neanderthal Museums*, 7, Mettmann, 85-106.
- Jordá Pardo, J.F., Carral González, P., Álvarez-Alonso, D., Arias, P., Bécares, J., Cubas, M., Martín-Jarque, S., Portero, R., Teira, L., Álvarez-Fernández, E., 2018. Al oeste del Sella. Geoarqueología y cronoestratigrafía del registro del Pleistoceno superior de la cueva de El Cierro (Fresnu, Ribadesella, Asturias, España). *Boletín Geológico y Minero*, 129 (1-2): 207-250. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.129.1.009>
- Jordá Pardo, J.F., Álvarez-Alonso, D., Andrés-Herrero, M. de, Ballesteros, D., Carral, P., Hevia-Carrillo, A., Sanjurjo, J., Giralt, S., Jiménez-Sánchez, M., 2023. Geomorphology, Geoarchaeology, and Geochronology of the Upper Pleistocene Archaeological Site of El Olivo Cave (Llanera, Asturias, Northern Spain). *Geosciences*, 13 (10), 301, <https://doi.org/10.3390/geosciences13100301>
- Letey, J., 1969. Measurement of contact angle, water drop penetration time and critical surface tensions. *Proc. Symp. Water Rep. Soils*. University of California, Riverside.
- Martínez García, E., 1981. La geología y el relieve de Asturias. En: *Enciclopedia Temática de Asturias* (J. Cueto Alas, dir.), 10. Silverio Cañada Editor, Gijón, 57-136.
- Martínez-Villa, A., 2022. Cien años de investigaciones en la cueva de la Lloseta (Ribadesella/Ribeseya, Asturias/Asturies, España). Revisión e identificación de los trabajos arqueológicos. Planteamiento y objetivos del nuevo proyecto. En: *Descendiendo el río Sella. Una (re)visión de la Arqueología Prehistórica del valle del Sella* (Asturias, España) (J. Jordá Pardo, S. Martín-Jarque, R. Portero Hernández y E. Álvarez Fernández, eds.). UNED Asturias. Entemu XIX: 267-301
- Meese, D.A., Alley, R.B., Fiacco, R.J., Germani, M.S., Gow, A.J., Grootes, P.M., Illing, M., Mayewski, P.A., Morrison, M.C., Ram, M., Taylor, K.C., Yang, Q., Zielinski, G.A., 1994. Preliminary depth-agescale of the GISP2 ice core. Special CRREL Report 94-1, US.
- Mestres, J.S., 1995. La datació per radiocarboni i el calibratge de les dates radiocabòniques. Objectius, problemes i aplicacions. *Revista d'Arqueologia de Ponent*, 5: 260-275.
- Mestres, J.S. 2000. La datació per radiocarboni. Una visió actual. *Tribuna d'Arqueologia*, 1997-1998: 195-239.
- Mestres, J.S. 2003. La química i la cronología: la datació per radiocarboni. *Revista de la Societat Catalana de Química* 4: 11-25.
- Mestres, J.S. 2008. El temps a la Prehistòria i el seu establiment a través de la datació per radiocarboni. *Cypsela*, 17: 11-21.
- Munsell, A.H., 1981. *A Color Notation: An Illustrated System Defining All Colors and Their Relations by Measured Scales for Hue, Value and Chroma*, 14th ed. Munsell Color, Baltimore.
- Navarro, D., Leyva, F., Villa, E., Granados, L., 1986. Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 31 (Ribadesella), segunda serie, primera edición. IGME, Madrid.
- Oxford Radiocarbon Accelerator Unit. Disponible en <https://c14.arch.ox.ac.uk/> [consultado 28/07/2025]
- Pérez-Estaún, A. y Bea, F. (eds.) (2004): Macizo Ibérico.. En: *Geología de España* (Vera, J.A., ed.). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 19-230.
- Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G. Bronk Ramsey, C., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.G., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kromer, B., Manning, S.W., Muscheler, R., Palmer, J.G., Pearson, C., van der Plicht, J., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Turney, T.S.R., Wacker, L., Adolphi, F., Büntgen, U., Capano, M., Fahrni, D.S.M., Fogtmann-Schulz, A., Friedrich, R., Köhler, P.I., Kudsk, S., Miyake, F., Olsen, J., Reinig, F., Sakamoto, M., Sookdeo, S.A., Talamo, S., 2020. The INTCAL20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0-55 Cal kBP). *Radiocarbon*, 62 (4): 725-757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Schiffer, M.B., 1987. *Formation Processes of the Archaeological Record*. University of New Mexico Press, Albuquerque.
- Straus, L.G., González Morales, M.R., 2010. The radiocarbon chronology of El Mirón Cave (Cantabria, Spain): new dates for the Initial Magdalenian occupations. *Radiocarbon*, 52 (1): 33-39. <https://doi.org/10.1017/S003382220004501X>
- Svensson, A., Andersen, K.K., Bigler, M., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Davies, S.M., Johnsen, S.J., Muscheler, R., Parrenin, F., Rasmussen, S.O., Röhlisberger, R., Seierstad, I., Steffensen, J.P., Vinther, B.M., 2008. A 60 000 year Greenland stratigraphic ice core chronology. *Climate of the Past*, 4 (1): 47-57. <https://doi.org/10.5194/cp-4-47-2008>
- Thomas, G.W., 1996. Soil pH and soil acidity. *Methods of Soil Analysis*, Part 3-Chemical Methods. Soil Science Society of America, Madison, 475-490. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
- Udden, J.A., 1914. Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, 25: 655-744. <https://doi.org/10.1130/GSAB-25-655>
- Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., An, Z.S., Wu, J.Y., Shen, C.C., Dorale, J.A., 2001. A High-Resolution Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China. *Science*, 294 (5550): 2345-2348. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1064618>
- Wentworth, C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30: 377-392. <https://doi.org/10.1086/622910>
- Wallis, M.G., Horne, D.J., 1992. Soil water repellency. *Advances in Soil Science*, 20: 91-146. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2930-8_2
- Weninger, B., Jöris, O., 2008. A 14C age calibration curve for the last 60 ka: the Greenland-Hulu U/Th timescale and its impact on understanding the Middle to Upper Paleolithic transition in Western Eurasia. *Journal of Human Evolution*, 55: 772-781. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2008.08.017>
- Wood, W.R., Johnson, D.L., 1978. A survey of disturbance processes in archaeological site formation. *Advances in Archaeological Method and Theory*, 1, Academic Press, New York, 315-381. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-003101-6.50015-9>

MANUSCRITO RECIBIDO: 18-08-2025

REVISIÓN RECIBIDA: 01-10-2025

ACEPTACIÓN DEL MANUSCRITO REVISADO: 24-10-2025



BIOESTRATIGRAFÍA DEL SILÚRICO (GRAPTOLITOS) DE LA PARTE MERIDIONAL DE LA ZONA CENTROIBÉRICA ESPAÑOLA

Silurian graptolite biostratigraphy of the southern Central Iberian Zone (Spain)

Saturnino Lorenzo¹ y Juan Carlos Gutiérrez-Marco²

¹ Dpto. de Ingeniería Geológica y Minera-IGeA, Escuela de Ingeniería Minera e Industrial (UCLM), Plaza Manuel Meca 1, 13400 Almadén, Ciudad Real. saturnino.lorenzo@uclm.es

² Instituto de Geociencias (CSIC- UCM) y Área de Paleontología, Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad CC. Geológicas, José Antonio Novais 12, 28040 Madrid. jcgrapto@ucm.es

Resumen: Se analiza la bioestratigrafía de la sucesión silúrica en un vasto sector de la Zona Centroibérica meridional, a través del análisis de una treintena de secciones y localidades paleontológicas puntuales, seleccionadas entre más de 130 lugares con graptolitos silúricos. Se realizó un exhaustivo análisis bibliográfico a partir de los datos contenidos en 254 estudios que refirieron distintos aspectos del Silúrico en la región, lo que permitió revisar las unidades litoestratigráficas y precisar su correlación en las distintas estructuras variscas. El registro de graptolitos se circunscribe mayormente a las facies de pizarras negras vinculadas con fondos anóxicos entre el Telychiense y el Homeriense inferior. En casos puntuales se hallaron graptolitos del Aeroniense y el Ludfordiense en intercalaciones pizarrosas dentro de unidades dominadas por ambientes arenosos de alta energía. Se identificaron más de cien especies de graptolitos pertenecientes, al menos, a 32 géneros, de las que se ilustran algunas de las más importantes desde el punto de vista bioestratigráfico. Trece de las 15 biozonas y tres subzonas caracterizadas se distribuyen entre la base del Telychiense y el Homeriense basal. Las biozonas que registran una mayor diversidad de graptolitos, así como una amplia extensión en todo el ámbito del trabajo, son las de Oktavites spiralis y Torquigraptus tullbergi del Llandovery y la de Cyrtograptus perneri-Cyrtograptus ramosus del Wenlock. Las biozonas analizadas se relacionan bien con la sucesión bioestratigráfica del Silúrico perigondwánico tipificado por la sucesión del sinform de Praga, en la República Checa.

Palabras clave: graptolitos, bioestratigrafía, Llandovery, Wenlock, España.

Abstract: The biostratigraphy of the Silurian succession in a vast area of the southern Central Iberian Zone is analysed through the study of around thirty sections and isolated fossil localities, selected from over 130 sites containing Silurian graptolites. A thorough bibliographic analysis was carried out, based on data from 254 studies that analyzed various aspects of the Silurian in the region. This allowed for a review of lithostratigraphic units and the refinement of their correlation within the different Variscan structures. The graptolite record is largely restricted to black shale facies associated with anoxic bottoms, between the Telychian and the early Homerian. Occasionally, rare Aeronian and Ludfordian graptolite records may also occur within dark shale intercalations recorded in units dominated by high-energy sandstones. Palaeontologically, over one hundred species of graptolites were identified, belonging to at least 32 genera, with the most biostratigraphically significant species being illustrated. Thirteen of the 15 biozones and three subzones identified range

from the base of the Telychian to the early Homerian. The biozones with the greatest diversity of graptolites, as well as the widest distribution across the study area, are those of Oktavites spiralis, Torquigrapthus tullbergi and Cyrtograptus perneri–Cyrtograptus ramosus. All biozones studied herein allowed an accurate correlation with the Silurian biostratigraphic succession of peri-Gondwanan regions, as exemplified by the Prague Synform, Czech Republic, with the sole exception of the global Spirograptus guerichi Biozone at the base of the Telychian. In Bohemia, this biozone features unfavourable facies for graptolites in its lower part (Rastrites linnaei Biozone). From a biostratigraphic perspective, only one biozone is identified in the Aeronian (Lituigraptus convolutus Biozone), as pre-Telychian deposits are developed in almost exclusively sandy facies. The overlying black shales contain abundant Telychian graptolite assemblages, including the biozones of Spirograptus guerichi (with its three subzones: Paradiversograptus runcinatus–Monograptus gemmatus, Parapetalolithus palmeus, and Parapetalolithus hispanicus), Spirograptus turriculatus, Streptograptus crispus, Monoclimacis griestoniensis, Torquigrapthus tullbergi, Oktavites spiralis, and Cyrtograptus lapworthi. In the Sheinwoodian black shales, the Cyrtograptus murchisoni, Monograptus riccartonensis, Monograptus belophorus–Cyrtograptus rigidus, and Cyrtograptus perneri–Cyrtograptus ramosus biozones are recognised. Finally, the Homerian and Ludfordian strata are represented by the Cyrtograptus lundgreni and Saetograptus leintwardinensis (?) biozones, which correspond respectively to the end of black sapropelic deposition (diachronous in the study area), and to a local intercalation of this lithology within the sandy alternations in the upper part of the succession.

Key words: graptolites, biostratigraphy, Llandovery, Wenlock, Spain.

Lorenzo, S., Gutiérrez-Marco, J.C. 2025. Bioestratigrafía del Silúrico (graptolitos) de la parte meridional de la Zona Centroibérica española. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 38 (2): 83-111.

Introducción

El Sistema Silúrico es tal vez el que se conoce con menor detalle entre cuantos componen la sucesión paleozoica pre-varisca representada en la Península Ibérica (ver síntesis generales en Julivert *et al.*, 1980; Comba, 1983; Dallmeyer y Martínez García, 1990; Gibbons y Moreno, 2002; Vera, 2004; Quesada y Oliveira, 2019). Ello se debe a la aparente uniformidad de facies sedimentarias y a la escasez de fósiles determinativos, que sólo abundan en la parte inferior de la mayoría de las secciones. Ambos factores han condicionado un nivel simplista de conocimientos y el mantenimiento de ideas erróneas de tipo cronoestratigráfico, sedimentológico y paleobiogeográfico (Gutiérrez-Marco *et al.*, 2001).

En la parte meridional de la Zona Centroibérica española, los materiales silúricos constituyen afloramientos de extensión reducida, restringidos al núcleo de los sinclinales variscos de plano axial vertical que configuran buena parte de las macroestructuras características de la región (Díez Balda *et al.*, 1990; Martínez Poyatos, 2002; Martínez Poyatos *et al.*, 2004a).

Las síntesis estratigráficas más recientes del Silúrico ibérico (Gutiérrez-Marco *et al.*, 1998, 2019; Robardet y Gutiérrez-Marco, 2002) establecen una sucesión “iberotípica” para la región centroibérica situada al norte de la zona de cizalla de Puente Génave-Castelo de Vide (Martín Parra *et al.*, 2006), donde no existen rocas caláreas y que se subdivide, a grandes rasgos, en: a) una cuarcita basal de espesor métrico, donde se sitúa el tránsito Ordovícico-Silúrico; b) una unidad muy ubicua de pizarras

negras graptolíticas (10-150 m); y c) una sucesión superior con predominio arenoso (200-400 m), que registra el tránsito Silúrico-Devónico, y en la que normalmente alternan cuarcitas y pizarras y puede incorporar intercalaciones de rocas volcánicas.

Dada la ausencia generalizada de estudios estratigráficos de detalle y el gran potencial de la región para las investigaciones paleontológicas, se procedió a revisar exhaustivamente la mayor parte de estos afloramientos atribuidos al Silúrico en un área muy amplia de la región surcentroibérica (Fig. 1). Muchos de ellos fueron descubiertos o delimitados durante la realización de los trabajos cartográficos del Proyecto MAGNA a escala 1:50.000, y su caracterización se apoyó en muestras paleontológicas dispersas y heterogéneas, cuyos resultados requerían revisión.

El presente artículo constituye un resumen de algunos aspectos tratados en la tesis doctoral inédita del primero de los autores (Lorenzo, 2015), realizada bajo la codirección del segundo autor. Su objetivo es presentar un análisis básico de antecedentes y establecer un primer esquema estratigráfico regional, que sirva como patrón para referir las secciones parciales de los materiales silúricos aflorantes en las diferentes estructuras y localidades. Para ello, nos guiaremos por las informaciones bioestratigráficas aportadas por los graptolitos, sin duda el grupo fósil más abundante y mejor representado en la zona de estudio. La biozonación más reciente y actualizada de estos fósiles (Lloydell, 2012; Štorch, 2023; Maletz, 2023a; Štorch *et al.*, 2025) permite precisar la correlación del sector estudiado a los niveles ibérico e internacional.



Fig. 1. Esquema de situación de la región estudiada en el Macizo Ibérico. Modificado de Martínez Catalán *et al.*, 2004.

Finalmente, la actualización de conocimientos sobre el Silúrico de la región surcentroibérica es de utilidad por su aplicación a los aspectos patrimoniales geológicos de la minería del mercurio de Almadén. Dicha minería ha sido reconocida oficialmente por la UNESCO a través, tanto de la designación Patrimonio Mundial en 2012 (Patrimonio del Mercurio. Almadén e Idrija), como de su inclusión en el Geoparque Mundial de la UNESCO Volcanes de Calatrava, aprobado en 2024. Como se indica a continuación, buena parte de los antecedentes sobre el Silúrico de España se originan en la región de Almadén (Ciudad Real), vinculados con la explotación del cinabrio de sus minas. La relevancia de la geología y paleontología del Silúrico local ha sido tratada por Lorenzo *et al.* (2009), Gutiérrez-Marco *et al.* (2012) y Lorenzo y Gutiérrez-Marco (2016).

Antecedentes

La existencia de materiales silúricos en el área de estudio se conoce desde el siglo XIX y está esencialmente

vinculada a la investigación minera en las áreas de Almadén (Ciudad Real) y Sierra Morena Oriental (Jaén). El reconocimiento geológico del Sistema contempla distintas etapas de conocimiento, inicialmente bien definidas y, más adelante, parcialmente solapadas debido a las actividades de distintos grupos con intereses compartidos tanto científicos como mineros o institucionales.

La primera etapa de estudios (1834-1861) se halla representada por los trabajos pioneros realizados en la región de Almadén. Son investigaciones básicas que permitieron deslindar por vez primera las localidades con fósiles “gotlandienses” del “terreno Siluriano” en sentido amplio, que en la Zona Centroibérica corresponde mayoritariamente al Ordovícico. Se trata de los fósiles descubiertos en torno a Almadén por Le Play (1834), Prado (1855), Verneuil y Barrande (1855) y Bernáldez y Rúa Figueroa (1861).

En una segunda etapa (1875-1884) la Comisión del Mapa Geológico de España abordó diversos estudios que permitieron descubrir nuevas localidades con graptolitos y otros fósiles del “Siluriano superior” en las provincias

de Cáceres (Mallada, 1875a, 1875b; Egózcue y Mallada, 1876), Badajoz (Gonzalo y Tarín, 1879), Ciudad Real (Cortázar, 1880) y Jaén (Mallada, 1884). Paralelamente, Kuss (1878) consideró a las ampelitas de graptolitos como intercaladas en la Cuarcita del Criadero de Almadén.

La tercera etapa (1897-1956) corresponde a estudios geológicos donde se identificaron materiales del “Siluriano superior”, generalmente con graptolitos, en afloramientos situados nuevamente en las regiones de Almadén (Malaise, 1897; Hernández-Sampelayo, 1926, 1942, 1960; Ciry, 1936), Guadalmez (Groth, 1911), las Villuercas (Gómez de Llarena, 1916; Sáenz García, 1947; Ramírez y Ramírez, 1955; Sos Baynat, 1955; Kindelán, 1955), Cáceres ciudad (Kindelán *et al.*, 1949) y Sierra Morena oriental (Henke, 1926; Henke y Hundt, 1926; Haberfelsner, 1931).

A partir del decenio de 1950, se realizaron numerosas tesis doctorales alemanas a cargo de discípulos del Prof. Franz Lotze (Münster), que perseguían la realización de dos cortes geológicos en el basamento del Macizo Ibérico, atravesando regiones poco exploradas. De las once tesis emplazadas en la región surcentroibérica, nueve identificaron materiales silúricos aportando su estratigrafía y diversos yacimientos paleontológicos. De noroeste a sureste son las tesis de Schmidt (1957) centrada en el sinclinal de Cañaveral-Monfragüe, Bochmann (1956) y Kelch (1957) en los sinclinales de Cáceres y Sierra de San Pedro, Ransweiler (1968) en los sinclinales de Guadarranque y Herrera del Duque, Machens (1954) en el sinclinal de Corral de Calatrava, Redlin (1955) en el sinclinal de Fuencaliente-Solana del Pino, prolongación oriental del sinclinal de Guadalmez, Richter (1967) en el Centenillo y Butenweg (1968, 2008) y Kettel (1968), en Sierra Morena Oriental, estas dos últimas en el flanco norte del sinclinal de Los Pedroches. Salvo las tres últimas tesis, del resto únicamente se publicaron los mapas con la columna general más los datos paleontológicos (en edición de Walter, 1977), así como unos resúmenes expandidos poco actualizados (Von Raumer, 2008).

Por parte española, en los mismos años se continuó la investigación puntual de la sucesión silúrica en el sinclinal de Almadén, que registró importantes avances con la publicación de la monografía de Almela *et al.* (1962), precedida por los estudios de Almela (1959) y Almela y Febrel (1960). En el vecino sinclinal de Guadalmez, se destaca la aportación de Márquez Triguero (1961), así como las de Julivert y Truyols (1974) en el sinclinal de Guadarranque, Corretgé y García de Figuerola (1971) en el de Cáceres y Alía Medina *et al.* (1971) en la síntesis de trabajos inéditos realizados en Sierra Morena Oriental, entre ellos el importante informe de Capote del Villar y Hernández Enrile (1969).

Una segunda incursión destacable de trabajos extranjeros con datos del Silúrico surcentroibérico proviene, por un lado, de las escuelas francesas de Orsay y Nancy (1964-1982), que aportaron tanto publicaciones como tesis doctorales inéditas. Destacan, en la zona de Almadén, los trabajos de Saupé (1971a, 1971b, 1973), Lauret (1974), Lozac'h y Vidal (1976) y Blachère (1978), en Castuera, situada en la parte más occidental del flanco norte del sín-

clinorio de Los Pedroches, Prost-Dame (1980) y, en Sierra Morena Oriental, Tamain (1964, 1971), Arbe y Tamain (1971), Péran (1971), Poupon (1971) y Charpentier (1976). Por otro lado, los investigadores alemanes prosiguieron los trabajos estratigráficos, que involucraban materiales silúricos, en los sinclinales de Guadalmez (Puschmann, 1967) y Herrera del Duque (Puschmann, 1970), así como en el límite Ordovícico-Silúrico del sinclinal de Corral de Calatrava (Hafenrichter, 1979, 1980). Esta última autora encontró en las Pizarras Chavera y en la base de la Cuarcita del Criadero supuestos acritarcos silúricos mal conservados, con lo cual dicha datación carece de sustento taxonómico. Las contribuciones alemanas más tardías se refieren al Silúrico de los sinclinales de Guadarranque (Ballestra *et al.*, 1982) y Corral de Calatrava (Kappes, 1991). La posición del límite Ordovícico-Silúrico en el sinclinal del Guadarranque fue igualmente considerada por Robardet *et al.* (1980).

Entre los años 1971 y 1982, el Instituto Geológico y Minero de España publicó una síntesis cartográfica de diversas áreas surcentroibéricas con afloramientos silúricos, correspondientes a ocho hojas a escala 1:200.000 (Cáceres, Talavera de la Reina, Villarreal, Badajoz, Villanueva de la Serena, Pozoblanco, Linares y Villacarrillo). En las memorias acompañantes se resume sucintamente la estratigrafía del Sistema Silúrico en los distintos ámbitos, con datos tomados de autores precedentes, y a los que se añaden diversos comentarios.

En 1976 se inicia la publicación de la segunda serie del Proyecto MAGNA a escala 1:50.000 que, con un total de 44 hojas geológicas acompañadas por sus memorias correspondientes, cubrió completamente los afloramientos silúricos situados en el área de este trabajo. La edición de estas hojas fue irregular y la más reciente se publicó en el año 2019. En la Figura 2 puede verse la extensión realizada de los afloramientos silúricos y la numeración de aquellas secciones y localidades que han servido de base para el estudio bioestratigráfico, con referencia tanto al contorno de las estructuras variscas, como a la cuadrícula de hojas 1:50.000.

Aparte del trabajo cartográfico y de los descubrimientos propiciados por el MAGNA, numerosos autores españoles realizaron aportaciones al conocimiento estratigráfico y paleontológico de la región considerada. En el sinclinal de Guadarranque, destacan los trabajos de Gil Cid *et al.* (1976), Rodríguez Núñez (1989), Rodríguez Núñez *et al.* (1989), Sarmiento y Rodríguez Núñez (1991) y Menéndez y Rábano (2010). En el sinclinal de Cañaveral-Monfragüe tenemos a Carballeira *et al.* (1985) y Gumié *et al.* (2003, 2010). En los sinclinales de Cáceres y la Sierra de San Pedro, los trabajos de Corretgé *et al.* (1982), Soldevila (1992) y López Díaz (1991). En el sinclinal de Herrera del Duque, destacan los trabajos de Pierren Pidal (1985, 1986) y Pierren Pidal y Gutiérrez-Marco (1990). En este último sinclinal y en el de Almadén, Pardo Alonso (1998) analiza la posición del límite Silúrico/Devónico. En el sinclinal de Almadén y en el sinclinal meridional de Guadalmez, se publicaron estudios relativos al área de Garlitos (Soldevila, 1983), y a la sedimentología y datación de la Cuarcita del Criadero (Gal-

lardo Millán *et al.*, 1994; Lorenzo *et al.*, 1997; Villas *et al.*, 1999; Lorenzo y Gutiérrez-Marco, 2009). En los sinclinales de Valdeazogues-Puertollano y en la parte oriental del sinclinal de Guadalmez (Solana del Pino), Palero Fernández (1991, 1992) describe la sucesión silúrica y en el de Corral de Calatrava destacan los artículos de García Palacios *et al.* (1996a, 1996b), Štorch *et al.* (1998) y Loydell *et al.* (2009, 2023a). Finalmente, en Sierra Morena Oriental (sinclinal de Los Pedroches) se publicaron algunos datos silúricos por parte de Ríos Aragüés (1978), Gutiérrez-Marco y Pineda Velasco (1988) y Rey *et al.* (2005). El último de los artículos aporta el estudio sedimentológico de una supuesta transgresión del “Aeroniense” donde se considera como silúrica una parte de las unidades del Hirnantiano.

La enorme cantidad de datos estratigráficos y de toda índole derivados de la sucesión silúrica centroibérica apareció consignada en diversas síntesis, tales como las de Truyols y Julivert (1983), Gutiérrez-Marco *et al.* (1990), San José *et al.* (1992), Gutiérrez-Marco *et al.* (1998, 2001, 2019), Gumié *et al.* (1998, 2002), Robardet y Gutiérrez-Marco (2002), Robardet (2002, 2003); Kříž *et al.* (2003); Martínez Poyatos *et al.* (2004b) y Palacios Medrano *et al.* (2010). La modelización de la cuenca silúrica y una primera propuesta de unidades tectosedimentarias para la región surcentroibérica fue esbozada por Portero García y Dabrio González (1988).

Desde el punto de vista paleontológico, los principales trabajos publicados versan sobre graptolitos, entre los que cabe mencionar los primeros ejemplares ilustrados procedentes de la región de Almadén (Hernández- Sampelayo, 1926; más su monografía póstuma de 1960 con graptolitos de varias localidades surcentroibéricas); el encendido debate en torno a los mismos yacimientos de graptolitos identificados de forma distinta por Henke y Hundt (1926) y Haberfelner (1931) o la mención cuestionable a la “fauna sárdica” de graptolitos con identificaciones de Romariz *et al.* (1971) en el sinclinal de Guadarranque, que fueron ilustrados más tarde por Gil Cid *et al.* (1976). Los datos taxonómicos y bioestratigráficos más modernos sobre graptolitos en el área de trabajo son los publicados por Štorch (1998a, 1998b) y Loydell *et al.* (2009), centrados en una parte de la sucesión Telychiense y Sheinwoodiense de Corral de Calatrava, donde se describieron varias especies nuevas. A ellos se une el descubrimiento de graptolitos huecos y en preservación tridimensional dentro de la Cuarcita del Criadero de Almadén (Lorenzo y Gutiérrez-Marco, 2009).

Entre la fauna no graptolítica del Silúrico, García Palacios y Rábano (1996) identificaron un trilobites telychiense en el sinclinal de Corral de Calatrava, sitio que también brindó el segundo hallazgo de conodontos conservados en la superficie de las pizarras negras ampelíticas (Loydell *et al.*, 2009), tras su descubrimiento en el sinclinal de Guadarranque (Sarmiento y Rodríguez Núñez, 1991). La presencia de euriptéridos en estas mismas facies fue citada por Rábano *et al.* (1989), en tanto que Kříž (2005) describe bivalvos procedentes de nódulos del Telychiense del sinclinal de Guadalmez, y Lorenzo y Gutiérrez-Marco (2024) resumen los hallazgos de elementos disociados de filocáridos en toda la región.

Lorenzo (2015) expone una visión integradora de la contribución bioestratigráfica de los graptolitos al conocimiento de la sucesión silúrica para el conjunto del área surcentroibérica. A pesar del largo historial de citas de graptolitos contenidas en los estudios precedentes, las identificaciones taxonómicas disponibles adolecen de una gran falta de actualización y rigor, por haber sido realizadas por numerosos geólogos y paleontólogos no especialistas en épocas muy dispares. Como únicos paleontólogos involucrados en el estudio de muestras, para trabajos realizados en las primeras épocas, están los alemanes Rudolf Hunt y Hermann Jaeger, al austriaco Erich Haberfelner, al francés André Philippot y el portugués Carlos Romariz, aunque las aportaciones del primero y los dos últimos presentan un grado de fiabilidad limitado. A ellos podría añadirse la identificación rutinaria de muestras paleontológicas para el proyecto MAGNA, principalmente a cargo de profesores de la Universidad de Oviedo (Jenaro L. García-Alcalde, Miguel Arbizu) y uno de los firmantes (Juan Carlos Gutiérrez-Marco). Esta tendencia se ha invertido con la colaboración en los últimos veinticinco años de especialistas renombrados en graptolitos silúricos como Petr Štorch (Praga, R. Checa) y David Loydell (Portsmouth, UK), así como con la intervención de especialistas extranjeros en otros grupos fósiles, con los que se preparan artículos en ostrácodos (Vincent Perrier, Lyon, Francia), cefalópodos (Paolo Serventi, Módena, Italia) y tubícolas problemáticos (Olev Vinn, Tartu, Estonia), prosiguiendo la colaboración iniciada en el estudio del Silúrico del Dominio Obejo-Valsequillo (Lorenzo *et al.*, 2020; Perrier *et al.*, 2023).

Marco geológico

Desde el punto de vista geológico, los materiales silúricos estudiados se encuadran en la parte meridional de la Zona Centroibérica (Fig. 1), al norte de la banda de cizalla Puente Génave-Castelo de Vide (Martín Parra *et al.*, 2006), y dentro del Dominio de los Pliegues Verticales de Díez Balda *et al.* (1990), renombrado como Dominio del Complejo Esquisto-grauváquico por Martínez Catalán *et al.* (2004).

A pesar de la enorme extensión que abarcan los afloramientos paleozoicos en la región surcentroibérica, los materiales silúricos tan solo se conservan en los pliegues variscos más meridionales, los únicos que no se vieron afectados por la casi completa erosión de sus núcleos silúrico-carboníferos (ver figura 2.46 en Martínez Poyatos *et al.*, 2004b). La distribución de las estructuras que preservan la sucesión silúrica está representada en la Fig. 2, y comprende los siguientes sinclinales: Cañaveral-Monfragüe, Guadarranque, Herrera del Duque, Corral de Calatrava, Almadén, Valdeazogues -Puertollano, Santa Cruz de Mudela, Guadalmez, Cáceres, Sierra de San Pedro y Los Pedroches.

De los tres grandes conjuntos litológicos en los que se dividen los materiales silúricos, ya citados en la introducción, ninguno de ellos se ordena en unidades litoestratigráficas definidas formalmente, con arreglo a las recomenda-

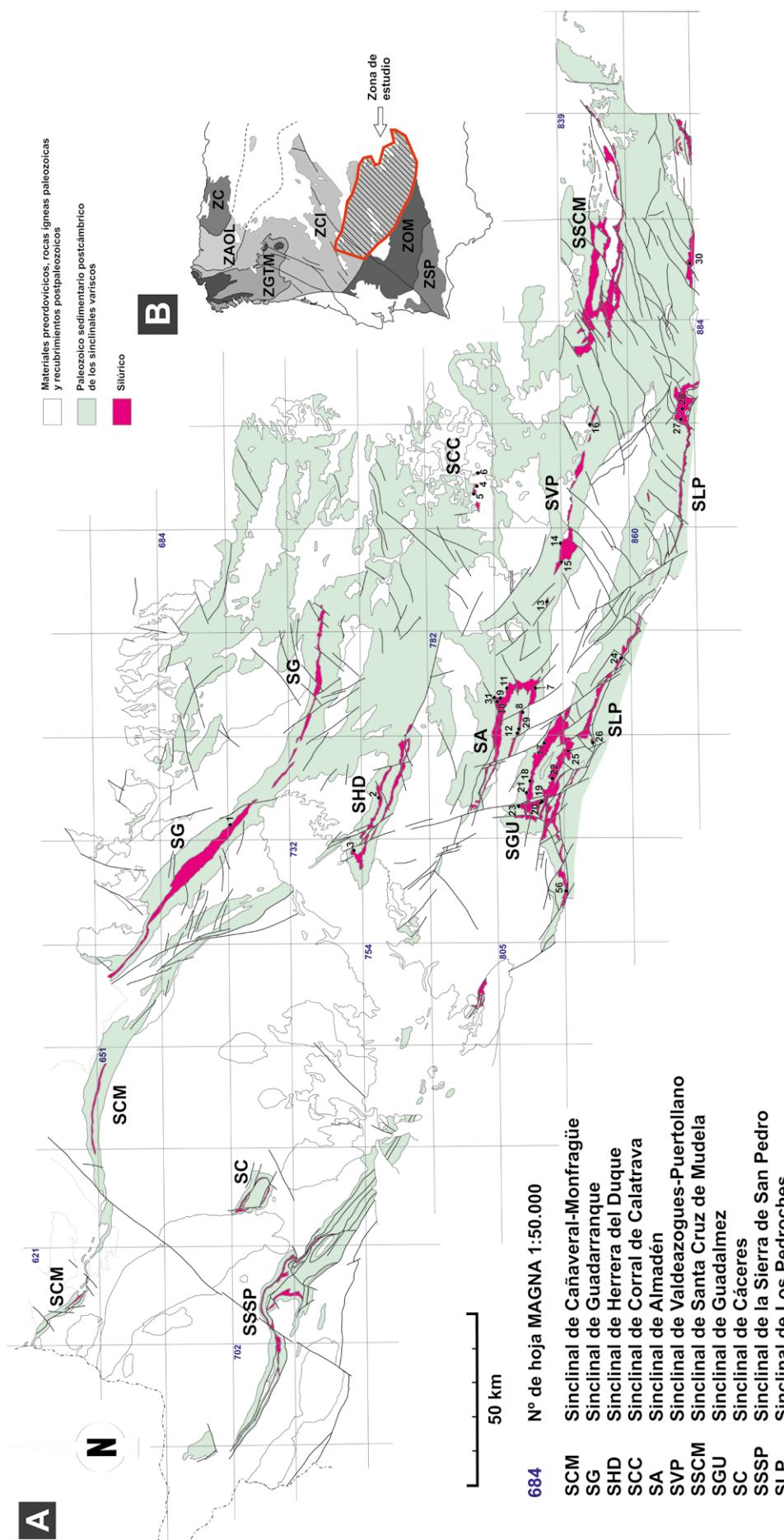


Fig. 2. A. Localización del área de estudio en la región surcentroibérica. B. Mapa geológico esquemático del sector estudiado, con la ubicación de las localidades con graptolitos seleccionadas (números 1-31). La situación detallada de cada una de ellas se describe en el Apéndice 1. La cuadrícula corresponde a la distribución de hojas a escala 1:50.000.

ciones de la Guía Estratigráfica Internacional (Salvador, 1994; Reguant y Ortiz, 2001). Además, el gran número de trabajos locales desarrollados por multitud de autores en distintas épocas, normalmente centrados en escasas secciones de una o dos estructuras, y con resultados extrapolados en cartografías posteriores, ha dado lugar a muchas denominaciones estratigráficas de carácter operativo, pero de aplicabilidad general limitada o incluso nula. Estas designan en su mayoría tramos singulares de ciertas secciones, como “capas de transición” (Bochmann, 1956), “unidad pelítica superior” (Ransweiler, 1968), “areniscas malva” (Lauret, 1974), “serie arenosa masiva” (Lozac'h y Vidal, 1976) o “pizarras bandeadas” (Gil Cid *et al.*, 1976), entre otros ejemplos. Junto a ellas, coexisten otras unidades con nombre consolidado, que por lo general responden a una larga tradición minera, como la “Cuarcita del Criadero” de Almadén, o las “ampelitas/pizarras negras graptolíticas”, con una litología y contenido paleontológico característico, a techo de aquella. No obstante, las modernas síntesis estratigráficas del Silúrico surcentroibérico, recogen la introducción reciente de diversos nombres de formaciones (o divisiones con nombre propio y rango litoestratigráfico equivalente) que abarcan el rango completo del Sistema (Fig. 3). El hecho de que ninguna de ellas haya sido definida formalmente está influido por la escasa representatividad de muchas secciones dentro del contexto de unos litosomas de gran extensión, cuya área de sedimentación trasciende, en ciertos casos, incluso el ámbito surcentroibérico y se prolonga por el conjunto del suroeste de Europa y norte de África. Nos referimos, por ejemplo, a las unidades arenosas contemporáneas o posteriores al rebote isostático relacionado con la glaciaciación Hirnantiana y a las sapropelitas negras depositadas a lo largo de los diversos pulsos transgresivos globales del Llandovery y Wenlock.

Los materiales más antiguos que componen la sucesión

silúrica son esencialmente arenosos y se encuadran en la denominada Cuarcita del Criadero y equivalentes (= cuarcita “Valentiense”, “de Castellar”, “del Llandovery”, “de Torrealver”, “del Jabonero”, entre otras). Se trata de una formación arenoso-cuarcítica de hasta 45-50 m de potencia media, que alberga las clásicas mineralizaciones cinabríferas del yacimiento de Almadén y que, durante mucho tiempo, se consideró como exclusivamente silúrica. No obstante, los trabajos más recientes han mostrado que la parte inferior puede tener localmente una edad Ordovícico terminal (Gutiérrez-Marco *et al.*, 2002), acreditada por el hallazgo de fósiles hirnantienses (Villas *et al.*, 1999; Bernárdez *et al.*, 2014), que permiten una correlación con el miembro intermedio (cuarcita Las Majuelas) de la Formación Gualija (Fig. 4, García Palacios *et al.*, 1996a).

Por encima de la Cuarcita del Criadero, y con un contacto gradual muy rápido (normalmente mecanizado por su diferente competencia litológica), se sitúa una sucesión de 10-150 m de pizarras negras graptolíticas que suele aflorar de forma discontinua, debido a la erosión actual y a los frecuentes recubrimientos recientes. Estas facies de pizarras negras, esencialmente masivas, se citan comúnmente en la literatura geológica como “ampelitas con *graptolites*”, aludiendo el primer término a su uso en los viñedos como abono alumínico (del griego *ampelos* = vid). Rodríguez Núñez *et al.* (1989) propusieron denominar a la unidad como Formación Guadarranquejo, con corte tipo ubicado en el sinclinal de Guadarranque, desde donde pasó adoptarse gradualmente en toda la región surcentroibérica (Gutiérrez-Marco *et al.*, 1998; Robardet y Gutiérrez-Marco, 2002; Loydell *et al.*, 2009, entre otros). Los abundantes restos fósiles de graptolitos y otros grupos pelágicos han permitido datar y correlacionar con suma precisión el desarrollo sedimentario de la unidad en las distintas secciones estudiadas (Fig. 5).

		Guadarranque	Herrera del Duque	Almadén-Guadalmez	Los Pedroches	Sierra de San Pedro
DEVÓNICO INFERIOR	Rodríguez Núñez (1989) Rodríguez Núñez <i>et al.</i> (1989)	Pieren Pidal (1985) Pardo Alonso y García-Alcalde (1996) Pardo Alonso (1997)	Almela <i>et al.</i> (1962) Pardo Alonso y García-Alcalde (1996) Pardo Alonso (1997)	Henke (1926) Butenweg (1968, 2008)	Soldevila Bartoli (1992)	
SILURIICO	DEVÓNICO INFERIOR Areniscas de Cerro Herrumbre	Pizarras de Valdenmedio Cuarcita Doradillo	Alternancias Argilítico-arenosas Cuarcita de Las Cuevas	Alternancias Argilítico-arenosas	Capas de San Pablo Cuarcita basal	
Ludlow	Pridoli Areniscas de Las Cabezuelas	Alternancia de La Corchada	Alternancia Escudo	Alternancias Volcano-sedimentarias	Capas de San Pablo	Pizarras de Valdelasmanos
Wenlock	Fm. Guadarranque					
Llandovery	Fm. Guadarranquejo	Pizarras negras graptolíticas	Pizarras negras graptolíticas	Pizarras negras graptolíticas	Cuarcita del Criadero	Cuarcita del Jabonero
ORDOVÍCICO SUPERIOR	Fm. Gualija	Pelitas con fragmentos	Pizarras de Muro	Pizarras Chavera	Pizarras de Valdesauce	

Fig. 3. Correlación entre términos litoestratigráficos utilizados por diferentes autores en las principales áreas variscas de la región surcentroibérica, al norte del eje de Los Pedroches.

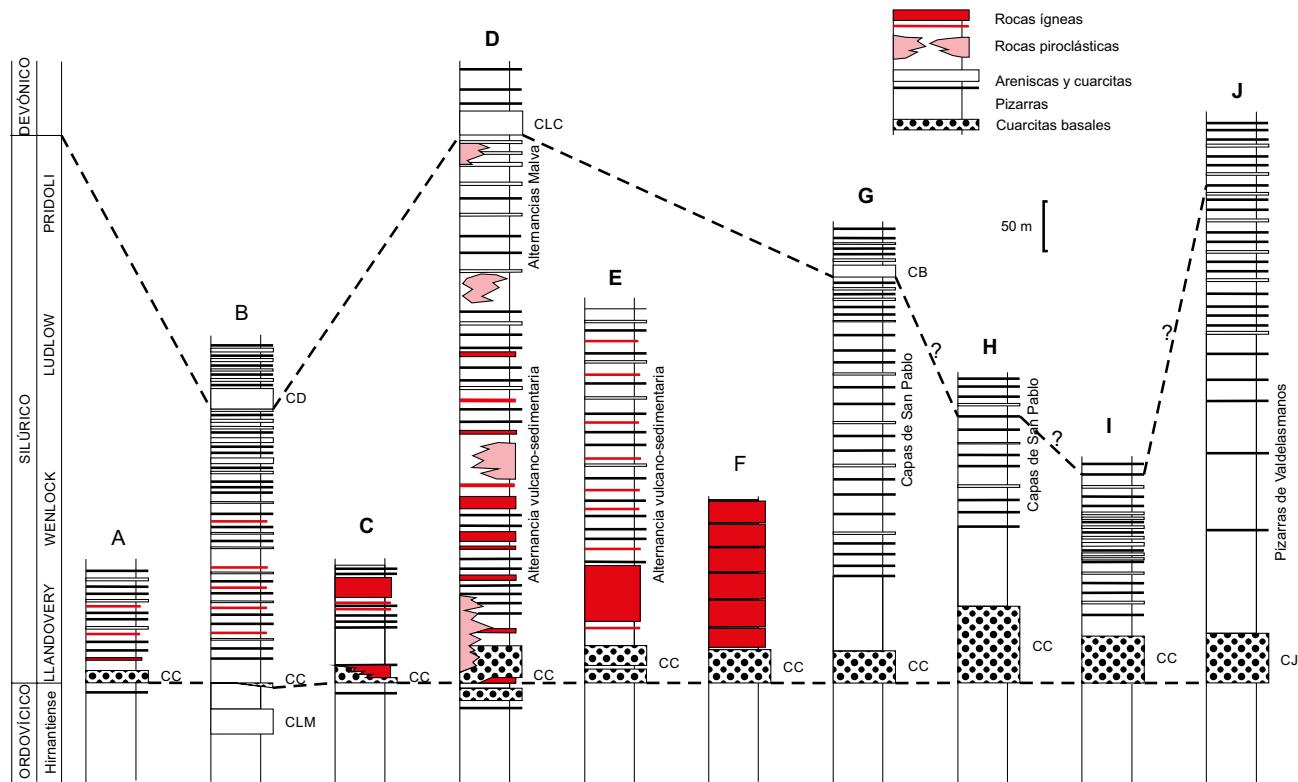


Fig. 4. Esquema de correlación entre las distintas secciones silúricas de la región surcentroibérica con hincapié en la nomenclatura de las unidades cuarcíticas y alternancias superiores reconocidas en distintos ámbitos. La posición del límite Ordovícico-Silúrico se ha situado, a falta de datos paleontológicos, en la base de la Cuarcita del Criadero, excepto en la división tripartita del sinclinal de Almadén. Estructuras (sinclinales o ámbitos varicos): A, Cañaveral-Monfragüe; B, Guadarranque-Herrera del Duque; C, Corral de Calatrava; D, Almadén-Guadalmez; E, Valdeazogues-Puertollano; F, Solana del Pino-este de Puertollano; G, Sierra Morena oriental; H, Santa Cruz de Mudela; I, Cáceres; J, Sierra de San Pedro. Abreviaturas para unidades cuarcíticas de referencia: CB, Cuarcita Basal; CC, Cuarcita del Criadero; CD, Cuarcita Doradillo; CJ, Cuarcita del Jabonero; CLC, Cuarcita de Las Cuevas; CLM, Cuarcita de Las Majuelas.

En contacto gradual sobre la unidad de pizarras negras fosilíferas se sitúa una potente alternancia de pizarras, areniscas y cuarcitas, localmente con intercalaciones de rocas ígneas, que oscila entre 200-400 m de espesor que, excepcionalmente, puede alcanzar los 1000 m (Fig. 4). Debido a que sus características litológicas (predominio de arenas o intercalación de tramos más o menos continuos o potentes, bien cuarcíticos o pizarrosos) varían para cada estructura o conjunto de estructuras, no es posible establecer el dominio de aplicabilidad de las numerosas denominaciones locales con las que aparece citada en la literatura regional. Por ello, la designamos informalmente como “Alternancia de pizarras, arenas y cuarcitas”, cuya parte alta solo puede reconocerse en las estructuras sinclinales donde el nivel de erosión actual ha permitido la conservación de materiales devónicos datados. En este sentido, el escaso contenido paleontológico se restringe a contados hallazgos silúricos en intercalaciones pizarrosas localizadas en su parte inferior (Rodríguez-Núñez, 1989) y a braquíópodos y trilobites del Lochkoviense en algunos niveles situados en el tercio superior (Pardo Alonso, 1998). Sin embargo, la posición del límite Silúrico-Devónico no ha podido ser precisada en ninguna sección por la ausencia generalizada de restos fósiles en la parte media y superior de la unidad.

La inclusión de materiales volcánicos y subvolcánicos, en el conjunto de la sucesión silúrica surcentroibérica, es

frecuente en determinadas estructuras como en los sinclinales de Almadén y Valdeazogues-Puertollano, así como en la parte oriental del sinclinal de Guadalmez, pero está generalizada para las dos unidades superiores en gran parte de la región estudiada.

Bioestratigrafía

En este trabajo se resume la lista y distribución estratigráfica de los graptolitos identificados en más de un centenar de secciones, o afloramientos aislados, distribuidos por toda el área de estudio. Cabe destacar que las secciones más completas y fosilíferas se sitúan en los sinclinales de Corral de Calatrava, Guadalmez, Almadén y Guadarranque (Fig. 2).

La Figura 5 combina la columna estratigráfica sintética con el rango vertical de 119 especies identificadas plenamente o en nomenclatura abierta, distribuidas en 15 biozonas entre el Aeroniense (Llandovery) y el Ludfordiense (Ludlow). El esquema bioestratigráfico adoptado es el del Silúrico peri-Gondwánico tipificado por la sucesión del sininforme de Praga (Štorch, 2023), excepto para la biozona basal del Telychiense. Esta ha sido nominada en función del graptolito *Spirograptus guerichi*, adaptada al nuevo Estratotípico Global de Límite de este Piso, ubicado en España (Gutiérrez-Marco *et al.*, 2024a, 2024b; Loydell *et*

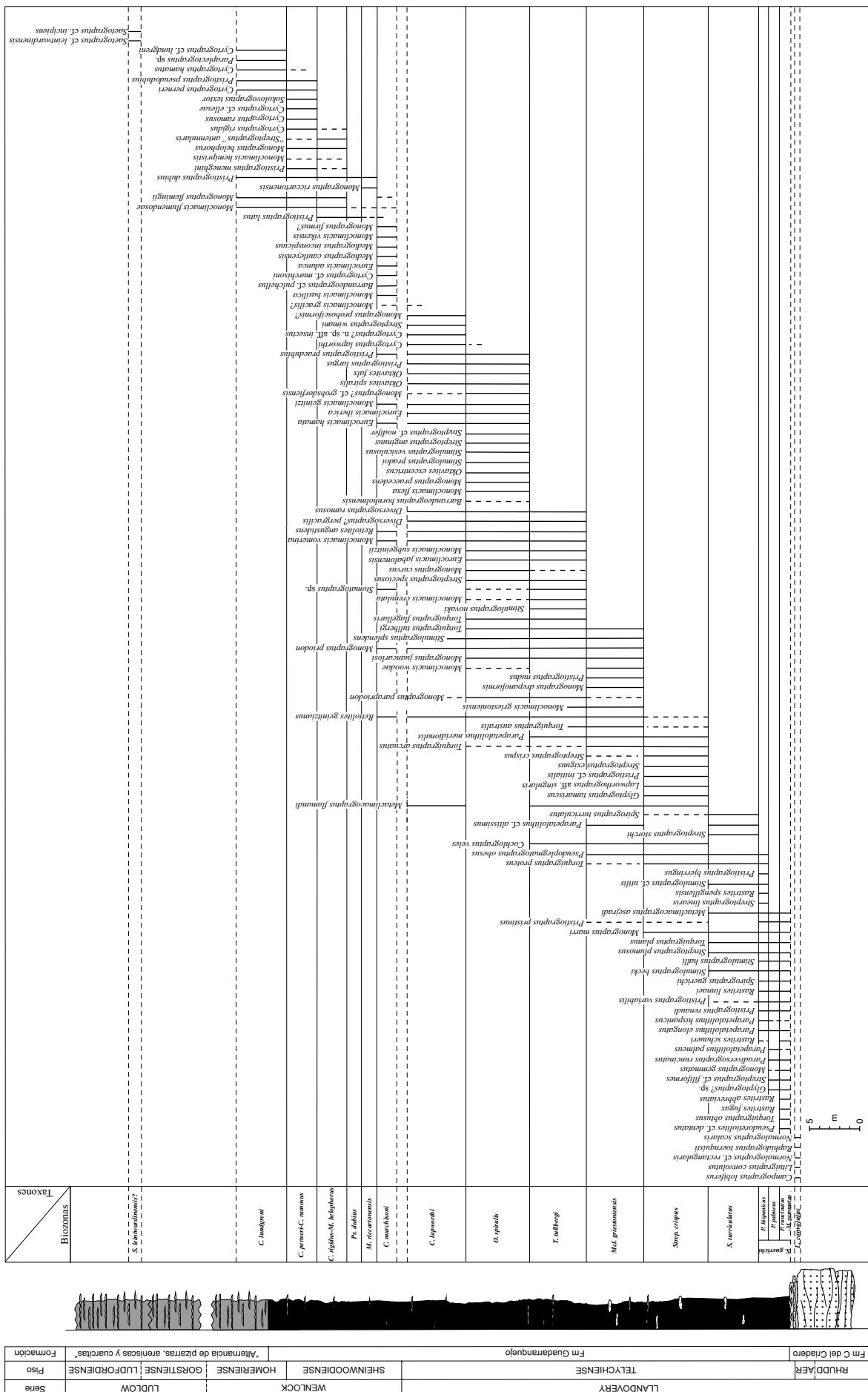


Fig. 5. Distribución estratigráfica de las especies de graptolitos identificadas, en relación con la columna sintética del Silúrico de la región surcentroibérica y la biozonación de graptolitos utilizada en el presente trabajo (Fig. 10).

al., 2025). En Bohemia, los niveles basales de la biozona equivalente (Biozona de *Rastrites limnaei*) muestran facies desfavorables para graptolitos (Štorch, 2023).

Los graptolitos son muy escasos en la Cuarcita del Criadero, debido al ambiente energético y al bajo potencial de preservación en unos sedimentos dominados por arenas de grano fino a medio. Únicamente se hallan con cierta frecuencia en las facies de areniscas tableadas inmediatas al techo de la unidad, generalmente en estado de moldes en relieve que conservan retazos de materia carbonosa (Fig. 6S) (García Palacios *et al.*, 1996a). Más raros son los tubarios piritizados encontrados en las areniscas de la parte alta (Fig. 6B) (Gutiérrez-Marco y Pineda Velasco, 1988) y, sobre todo en nódulos piritosos, donde los graptolitos presentan un estado de conservación excepcional vinculado con procesos de piritización multifásica (Fig. 6A) (Lorenzo y Gutiérrez-Marco, 2009; Gutiérrez-Marco *et al.*, 2014).

Las facies más adecuadas para la preservación de graptolitos las ofrece tanto la Formación Guadarranquejo, como las intercalaciones de pizarras negras localizadas en la parte inferior de las Alternancias suprayacentes (= Formación Guadarranque de Rodríguez Núñez *et al.*, 1989), donde estos fósiles llegan a ser muy abundantes. Dependiendo de los niveles estratigráficos y las circunstancias de alteración de las pizarras negras, podemos encontrarnos desde tubarios conservados como películas carbonosas oscuras y aplastadas, que resaltan cuando la matriz arcillosa se altera a colores grisáceos más claros (Figs. 6L; 7A-B; 8E, M; 9F, H, M, P), otros piritizados conservados en relieve (Fig. 8K), hasta el caso más frecuente de preservación que son los moldes aplastados en pizarras oscuras con pérdida del peridermo carbonoso original, y donde el hueco dejado por la degradación del tubario se llenó por minerales de arcilla de alteración blanquecina (cloritas, pirofilitas: por ejemplo Figs. 6F, H, J, O; 7D-J, L, M, P; 8A, B, F-J, L, N; 9B-D, G, I-L, O, Q). En pizarras con fuerte alteración de la pirita diagénética, los huecos de los tubarios aplastados se impregnan de hidróxidos de hierro de tonalidades pardo-anaranjadas, que destacan tanto sobre pizarras oscuras (Figs. 6G, M, Q; 9A), como sobre pizarras alteradas a colores claros, donde los graptolitos contrastan fuertemente (Figs. 6K; 7K, N).

Una piritización o litificación temprana indujo la conservación tridimensional de los tubarios registrados en el interior de algunos nódulos contenidos en determinados tramos de las pizarras negras que, por lo general, son poco fosilíferos. Estos graptolitos se hallan siempre en estado de moldes externos, con el interior ausente o relleno por una masa amorfa arcillosa, más o menos ferruginizada. En estos casos, para su estudio se recurre a la realización de moldes en látex (Fig. 8C).

En cuanto a la orientación de los graptolitos en los nódulos y en el plano de sedimentación de las lutitas negras, puede variar, desde aleatoria (ausencia de energía durante la sedimentación) a orientada por corrientes, formando acumulaciones más o menos densas (Figs. 6L; 9C). En cualquier caso, la mayoría de los tubarios aparecen fragmentados, siendo raro el registro de colonias de más de una decena de centímetros, así como ejemplares completos en sus dos extremos. La fragmentación de los graptolitos pue-

de haber ocurrido en vida, dentro de ambientes energéticos o, más probablemente, por la disgregación de los tubarios en fase bioestratinómica.

En los planos de estratificación de pizarras y areniscas, los tubarios de los graptolitos suelen presentarse aplastados lateralmente o con varios grados de conservación escaliforme. Este último aspecto, que muestra frontalmente las aberturas tecales, es común entre formas biseriales del Aeroniense como *Normalograptus* y *Raphidograptus*, cuyos tubarios tienen una sección transversal redondeada. Las colonias espiraladas a contorsionadas de cierta anchura (*Spirograptus*, *Torquigograptus*, *Oktavites*, *Cyrtograptus*, etc.) se suelen conservar comprimidas en un solo plano (Figs. 6O; 7G, I, M; 8L; 9H, J, O, Q). Ello se relaciona con una preservación al estilo “plástico de cocina” (*clingfilm*), que involucra el recubrimiento de estas formas complejas por un tapiz bacteriano, y su compactación súbita en un solo plano por el peso de los sedimentos acumulados encima, sin mediación de sedimento intersticial (Jones *et al.*, 2002).

A parte de las deformaciones tafonómicas, los yacimientos estudiados compendian secciones con escasa evidencia de deformación tectónica. Dentro de la decena de grandes estructuras estudiadas, existen multitud de lugares donde las formaciones graptolíticas aparecen deformadas, bien en relación con fallas o zonas de cizalla, o bien con las charnelas de pliegues con esquistosidad de plano axial. En estas situaciones, los fósiles de graptolitos, en caso de existir, resultan indeterminables. En otros casos, el contexto tectónico de algunos yacimientos involucra una deformación moderada que no impide la identificación de los graptolitos, traducida en pequeñas expansiones cuando S_0 y S_1 resultan localmente subparalelas, o cuando se marca una lineación tectónica que coincide con el acortamiento o estiramiento de los tubarios de ciertas especies (Fig. 9B).

Como paso previo a la presentación de los resultados bioestratigráficos, cabe añadir que la nomenclatura y clasificación genérica de las distintas especies se ha actualizado conforme a la última revisión del volumen de graptolitos del *Treatise on Invertebrate Paleontology*, referido al infraorden Neograptina (Maletz, 2023b; Maletz y Loydell, 2023; Lenz *et al.*, 2023).

A parte de los graptolitos, sólo la Formación Guadarranquejo contiene un cierto registro paleontológico de otros grupos, por lo general carentes de interés bioestratigráfico, salvo algunos conodontos citados por Sarmiento y Rodríguez Núñez (1991) y Loydell *et al.* (2009). El resto de los fósiles incluye diversas formas de braquíopodos (rinconeliformes, linguliformes y craniiformes), moluscos (cefalópodos, bivalvos y gasterópodos), artrópodos (filocáridos, euriptéridos, trilobites y ostrácodos), raros equinodermos pelmatozoos y grupos minoritarios como cornulítidos, macaeridios (anélidos) o cnidarios (*Sphenothallus*, *Kolihaia*). Si bien los cefalópodos son frecuentes en casi todas las zonas estudiadas a partir de la Biozona de *Oktavites spiralis*, la sección de Corral de Calatrava es la única donde los fósiles de diversos grupos de invertebrados muestran una cierta abundancia.

Nuestros resultados bioestratigráficos destierran definitivamente, para la zona de estudio, la existencia de “mezclas” entre asociaciones de graptolitos de distinta edad.



Fig. 6. Graptolitos del Aeroniense y Telychiense: biozona de *Lituograptus convolutus* (A, B, C, D, S) y *Spirograptus guerichi* (G, subzona de *P. runcinatus*-“M” *gemmatus*; I, K, Q, subzona de *P. palmeus*; F, H, J, N, O, P, subzona de *P. hispanicus*; E, L, M, R, sin subzona definida). A. *Normalograptus scalaris* (Hisinger). Loc. 31, MGM-1079S. B. *Pseudoglyptograptus* sp. Loc. 28, MGM-1074S. C. *Campograptus lobiferus* (M'Coy). Loc. 16, MGM-1237S. D. *Lituograptus convolutus* (Hisinger). Loc. 16, MGM-1242S. E. *Metaclimacograptus asejradi* Legrand. Loc. 30, MGM-1082S. F. *Parapetalolithus hispanicus* (Haberfelner). Loc. 1, MGM-1127S. G. *Rastrites cf. fugax* Barrande. Loc. 5, MGM-1365S. H. *Pristiograptus renaudi* (Philippot). Loc. 1, MGM-1172S. I. *Parapetalolithus palmeus* (Barrande). Loc. 17, MGM-1140S. J. *Stimulograptus halli* (Barrande). Loc. 1, MGM-1252S. K. *Streptograptus cf. filiformis* Chen. Loc. 17, MGM-1227S. L. *Pristiograptus variabilis* (Perner). Loc. 17, MGM-1174S. M. *Paradiversograptus cf. runcinatus* Lapworth. Fragmento distal de la colonia. Loc. 30, MGM-1654S. N. *Stimulograptus beckii* (Barrande). Loc. 1, MGM-1249S. O. *Spirograptus guerichi* Loydell, Storch & Melchin. Loc. 1, MGM-1340S. P. *Streptograptus linearis* Chen. Loc. 4, MGM-1225S. Q. *Torquograptus planus* (Barrande). Loc. 9, MGM-1320S. R. *Monograptus gemmatus* (Barrande). Loc. 18, MGM-1291S. S. *Rhaphidograptus toernquisti* (Elles & Wood). Loc. 17, MGM-1111S. La escala gráfica equivale a 3 mm.

Esta hipótesis había sido postulada por Henke y Hundt (1926) y por Hernández Sampelayo (1960) para diversos yacimientos del área de Almadén, Corral de Calatrava y Sierra Morena oriental, cuyos datos pervivieron en numerosas publicaciones posteriores. A este respecto, Haberfeller (1931) ya había criticado duramente las “extrañas asociaciones de graptolitos” observadas por Henke y Hundt (1926), donde se mezclaban especies de niveles muy dispares del Silúrico, demostrando que implicaban identificaciones taxonómicas erróneas. Sin embargo, la posibilidad de que en una misma muestra pudieran concurrir especies características de distintas biozonas, es una constante en los trabajos sobre graptolitos silúricos del área ibero-armoricana, donde incluso se ha aludido a circunstancias paleogeográficas especiales en áreas alejadas de los estratotipos británicos (Philippot, 1950; Philippot y Riba, 1952; Romariz, 1962, 1969). Diversos trabajos posteriores probaron que en todas aquellas localidades francesas, portuguesas y españolas donde se habían postulado “dislocaciones estratigráficas” en el registro de los graptolitos, en realidad contenían asociaciones “normales”, de edades concretas, con mezcla de graptolitos mal identificados.

A continuación, se describen las biozonas o subzonas de graptolitos silúricos identificadas en la región surcentroibérica (Figs. 5 y 10). El criterio para reconocerlas se basa, casi siempre, en la presencia de su taxón nominal, cuya extensión vertical define cada biozona concreta. En su ausencia, algunas biozonas se han definido por el intervalo comprendido entre la desaparición y aparición de los taxones nominales de las biozonas inferior y superior a la biozona deducida, respectivamente. También se puede establecer una biozona por la presencia de taxones conocidos únicamente en parte de ella, incluso en ausencia de su taxón nominal.

Entre las biozoras analizadas, la única del Aeroniense representada con seguridad es la de *Lituograptus convolutus*. Las biozoras del Telychiense son las de *Spirograptus guerichi* (con sus tres subzonas de *Paradiversograptus runcinatus*-*Monograptus gemmatus*, *Parapetalolithus palmeus* y *Parapetalolithus hispanicus*), *Spirograptus turriculatus*, *Streptograptus crispus*, *Monoclimacis griestoniensis*, *Torquograptus tullbergi*, *Oktavites spiralis* y *Cyrtograptus lapworthi*. En el Sheinwoodiense se reconocen las biozoras de *Cyrtograptus murchisoni*, *Monograptus riccartonensis*, *Monograptus belophorus*-*Cyrtograptus rigidus* y *Cyrtograptus perneri*-*Cyrtograptus ramosus*. Finalmente, el Homeriense y el Ludfordiense se hallan representados, respectivamente, por las biozoras de *Cyrtograptus lundgreni* y de *Saetograptus leintwardinensis*(?) (Fig. 5).

En el Apéndice 1 se detallan las localidades fosilíferas estudiadas y numeradas en la Fig. 2.

Biozonas del Llandovery

De los tres pisos que componen esta Serie, el Telychiense es el más completo en términos de biozoras de graptolitos. Los depósitos correspondientes al Rhuddaniense y Aeroniense comprenden facies arenosas poco favorables para la conservación de fósiles, excepto ciertos niveles lo-

calizados en la parte alta de la Cuarcita del Criadero, donde se dieron condiciones muy especiales de preservación de graptolitos durante el Aeroniense.

Biozona de Lituograptus convolutus. Corresponde a los únicos graptolitos aeronienses registrados en el área de trabajo, en las secciones de la estación de Chillón-Este (nº 17 en la Fig. 2), del arroyo del Lápiz (nº 9) y en la de la confluencia de los ríos Guadiana-Jabalón (nº 5), además de en las localidades de la Cañada de Cantohincado (nº 16) y Los Toriles (nº 31).

Se caracteriza por la presencia de *Lituograptus convolutus* (Hisinger) (Fig. 6D), *Campograptus lobiferus* (McCoy) (Fig. 6C), *Raphidograptus toernquisti* (Elles & Wood) (Fig. 6B, S), *Normalograptus scalaris* (Hisinger) (Fig. 6A), *Pristiograptus* sp., *Rastrites* sp. y *Metaclimacograptus* sp. La asociación está restringida a las intercalaciones pizarrosas y limolíticas de la parte más alta de la Cuarcita del Criadero, donde alternan con niveles arenosos y cuarcíticos laminados de espesor centimétrico.

Cabe destacar que las localidades centroibéricas correspondientes a la Biozona de *L. convolutus* muestran una diversidad de graptolitos extremadamente baja en comparación con otros registros mundiales, especialmente los de Bohemia (Štorch, 1998c, 2023). Esto es debido al desarrollo, en la región surcentroibérica, de facies arenosas de muy poca profundidad, compatibles con la interpretación paleoambiental de Štorch (1998a).

Biozona de Spirograptus guerichi. Corresponde a la base del Telychiense que, en la mayoría de las secciones estudiadas, coincide bien con el inicio de la sedimentación de las pizarras negras graptolíticas o, más raramente, con los niveles de tránsito entre éstas y la Cuarcita del Criadero. No obstante, el registro de esta biozona es esporádico, porque normalmente se halla muy afectada por la laminación tectónica inherente al gran contraste litológico entre ambas unidades. Esta mecanización del contacto puede afectar a la biozona en su totalidad o a alguna de las tres subzonas integrantes. Desde el punto de vista bioestratigráfico, la biozona se caracteriza por la aparición y extensión vertical de la forma nominal *Spirograptus guerichi* Loydell, Štorch & Melchin (Fig. 6O).

Subzona de Paradiversograptus runcinatus-Monograptus gemmatus. Se documenta en muy pocas localidades de la región estudiada, donde aparece restringida a los niveles de tránsito entre la Cuarcita del Criadero y la Formación Guadarranquejo de las secciones Guadamez-Norte (nº 18 en la Fig. 2), estación de Chillón-Este (nº 17) y la confluencia entre los ríos Guadiana y Jabalón (nº 5). Desde el punto de vista bioestratigráfico, además de por la presencia de *S. guerichi*, la subzona se caracteriza por la coexistencia de sus formas nominales *Monograptus gemmatus* (Barrande) (Fig. 6R) y *Paradiversograptus runcinatus* (Lapworth) (Fig. 6M), que se presentan asociadas a *Stimulograptus beckii* (Barrande), *Sti. halli* (Barrande), *Streptograptus plumosus* (Baily), *Strep. cf. filiformis* Chen, *Torquograptus obtusus* (Schauer), *T. planus* (Barrande), *Monograptus marri* Perner, *Pristiograptus variabilis* (Per-

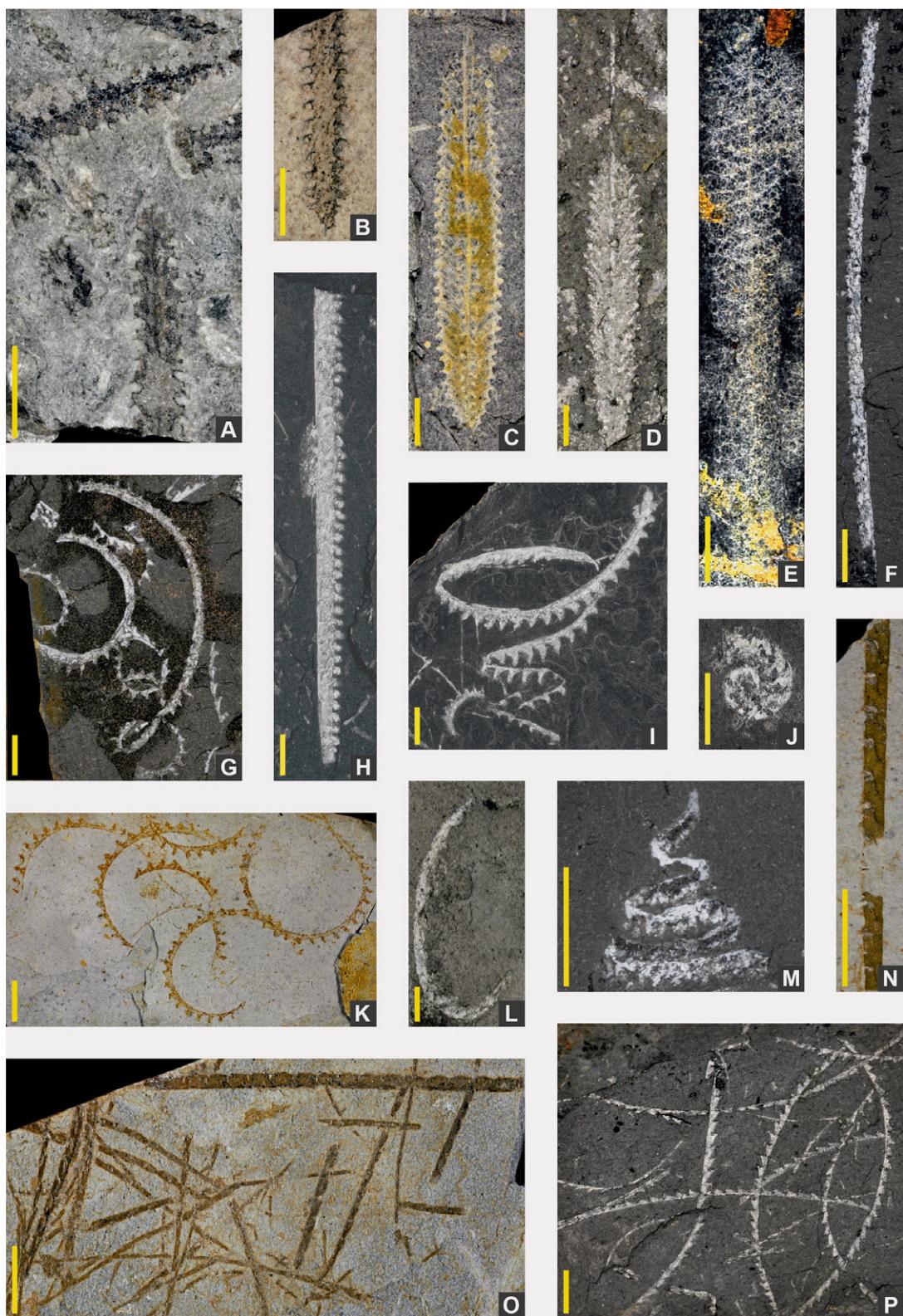


Fig. 7. Graptolitos del Telychiense: biozonas de *Spirograptus guerichi*, subzona de *P. hispanicus* (H, I), *Spirograptus turriculatus* (L, M), *Streptograptus crispus* (E, J, P), *Monoclimacis griestoniensis* (B, D, F, K, N, O), *Torquigraptus tullbergi* (C), *Oktavites spiralis* (G) y sin zona definida (A) A y B. *Metaclimacograptus flamandi* (Legrand). A. Loc. 27, MGM-1106S; B. Loc. 27, MGM-1105S. C y D. *Parapetalolithus meridionalis* (Legrand). C. Loc. 19, MGM-1132S; D. Loc. 25, MGM-1139S. E. *Pseudoplegmatograptus obesus* (Lapworth). Loc. 9, MGM-1076S. F. *Monoclimacis woodae* Zalasiewicz, Loydell & Štorch. Loc. 4, MGM-1376S. G. *Torquigraptus australis* Štorch. Loc. 4, MGM-1314S. H. *Monograptus marri* Perner. Loc. 1, MGM-1297S. I. *Torquigraptus proteus* (Barrande). Loc. 1, MGM-1323S. J. *Cochlograptus veles* (Richter). Loc. 4, MGM-1213S. K. *Torquigraptus tullbergi* (Bouček). Loc. 19, MGM-1321S. L. *Streptograptus cf. plumosus* (Baily). Loc. 4, MGM-1235S. M. *Spirograptus turriculatus* (Barrande). Loc. 4, MGM-1356S. N y O. *Monoclimacis griestoniensis* (Nicol). N. Loc. 19, MGM-1390S; O. Loc. 24, MGM-1392S. P. *Torquigraptus arcuatus* (Bouček). Loc. 27, MGM-1310S. La escala gráfica equivale a 3 mm, excepto en la L (= 1 mm).



Fig. 8. Graptolitos del Telychiense-Wenlock: biozonas de *Torquigraptus tulbergi* (C), *Oktavites spiralis* (E, G, I, M, K, L, O), *Cyrtograptus lapworthi* (B, N), *Cyrtograptus murchisoni* (A, D) y sin zona definida (F, H, J, P). A. *Retiolites geinitzianus* (Barrande). Loc. 4, MGM-1147S. B. *Retiolites angustidens* Elles & Wood. Loc. 4, MGM-1141S. C. *Stomatograptus* sp. (latex). Loc. 3, MGM-1167S. D. *Pristiograptus praedubius* (Bouček). Loc. 4, MGM-1176S. E. *Streptograptus* cf. *nodifer* (Törnquist). Loc. 18, MGM-1226S. F. *Monograptus priodon* (Bronn.) Loc. 4, MGM-1306S. G. *Monograptus curvus* Manck. Loc. 4, MGM-1068S. H. *Oktavites falx* (Suess). Loc. 4, MGM-1359S. I. *Stimulograptus splendens* Štorch. Loc. 19, MGM-1263S. J y M. *Diversograptus ramosus* Manck. J. Loc. 4, MGM-1409S; M. Loc. 18, MGM-1418S. K. *Monograptus juancarlosi* Štorch. Loc. 1, MGM-1298S. L. *Oktavites spiralis* (Geinitz). Loc. 4, MGM-1346S. N. *Euroclimacis ibérica* Štorch. Loc. 4, MGM-1379S. O. *Euroclimacis jabalonensis* Loydell, Štorch & Gutiérrez-Marco. Loc. 18, MGM-1389S. P. *Euroclimacis* cf. *hamata* Loydell, Štorch & Gutiérrez-Marco. Loc. 7, MGM-1388S. La escala gráfica equivale a 3 mm, excepto en la C (= 1 mm).

ner) (Fig. 6L), *P. renaudi* (Philippot), *P. pristinus* Přibyl, *Rastrites linnaei* Barrande, *R. cf. fugax* Barrande (Fig. 6G), *R. schaueri* Štorch & Loydell, *R. abbreviatus* Lapworth, *Metaclimacograptus asejradi* Legrand (Fig. 6E), *Parapetalolithus elongatus* (Bouček & Přibyl), *Glyptograptus* sp. y *Pseudoretiolites cf. dentatus* Bouček & Münch (Fig. 5).

En la biozonación avalónica de las Islas Británicas (Loydell, 1994), *Par. runcinatus* y *M. gemmatus* caracterizan subzonas consecutivas en la base de la Biozona de *S. guerichi*. Sin embargo, tanto en la Cordillera Ibérica (Gutiérrez-Marco y Štorch, 1998) como en la zona de estudio, ambas especies coexisten en los mismos niveles y componen una única subzona. Esta no llega a diferenciarse en el sinclinal del Valle del norte de Sevilla, donde *M. gemmatus* se registra en los dos tercios inferiores de la Biozona de *S. guerichi*, y *Par. runcinatus* se sitúa por debajo de la primera aparición de *Parapetalolithus* (Loydell et al., 2015).

- *Subzona de Parapetalolithus palmeus*. Las secciones donde se ha podido identificar esta subzona son las del arroyo del Lápiz (nº 9, Fig. 2), estación de Chillón-Este (nº 17) y confluencia de los ríos Guadiana y Jabalón (nº 5). En la asociación concurren prácticamente las mismas especies que en la subzona precedente, destacando la aparición de la forma nominal *Parapetalolithus palmeus* (Barrande) (Fig. 6I). Además de ésta se registran *S. guerichi*, *Sti. becki*, *Sti. halli*, *Strep. plumosus*, *Strep. cf. filiformis* (Fig. 6K), *T. planus* (Fig. 6Q), *M. marri*, *M. gemmatus*, *P. variabilis*, *P. renaudi*, *P. pristinus*, *R. linnaei*, *Parad. runcinatus*, *Metacl. asejradi*, *Parap. elongatus* y *Glyptograptus* sp.

- *Subzona de Parapetalolithus hispanicus*. Se ha reconocido en las localidades PN-1 del corte del Puerto de San Vicente (nº 1, Fig. 2) y GM GRE, en el sinclinal de Guadalmez (nº 22), así como en las secciones del río Jabalón (nº 4) y del arroyo del Lápiz (nº 9). Esta subzona terminal de la Biozona de *S. guerichi* se caracteriza por la aparición de *Parapetalolithus hispanicus* (Haberfelner) (Fig. 6F) y, localmente, de otros taxones como *Streptograptus linearis* Chen (Fig. 6P), *Pseudoplegmatograptus obesus* (Lapworth), *Pristiograptus bjerringus* (Bjerreskov), *Stimulograptus cf. utilis* Loydell, *Rastrites spengillensis* Rickards y *Torquigraptus proteus* (Barrande) (Fig. 7I). De las subzonas precedentes continúan su representación las especies *Parap. elongatus*, *Metacl. asejradi*, *P. renaudi* (Fig. 6H), *P. variabilis*, *P. pristinus*, *R. linnaei*, *R. cf. schaueri*, *S. guerichi* (Fig. 6O), *Sti. becki* (Fig. 6N), *Sti. halli* (Fig. 6J), *Strep. plumosus*, *T. planus* y *M. marri* (Fig. 7H).

Biozona de Spirograptus turriculatus. Corresponde a la parte terminal del stage slice “Te1” de Cramer et al. (2011), y ha sido identificada en las secciones del río Jabalón (nº 4, Fig. 2) y arroyo del Lápiz (nº 9). La base de la biozona está marcada por la aparición de su especie índice *Spirograptus turriculatus* (Barrande) (Fig. 7M), que reemplaza a *S. guerichi*. En su gran mayoría, la asociación comprende especies que prosiguen su representación desde la biozona precedente, como *Metacl. asejradi*, *P. variabilis*, *M. marri*, *Sti. becki*, *Sti. cf. utilis*, *Strep. plumosus* (Fig. 7L), *T. planus*, *T. proteus* y *Ps. obesus*. La especie *Streptograptus*

storchi Loydell es exclusiva de esta biozona, donde también se documenta la primera aparición de *Parapetalolithus cf. altissimus* (Elles & Wood).

Aunque *S. turriculatus* había sido citado profusamente en la región surcentroibérica (Gutiérrez Marco y Pineda Velasco, 1988; Rodríguez-Núñez et al., 1989 y Štorch et al., 1998b), han podido revisarse la mayor parte de los yacimientos y se ha comprobado que, en casi todos los casos, había sido confundido con *S. guerichi*, una especie más antigua y muy parecida morfológicamente.

Biozona de Streptograptus crispus. Al igual que la división bioestratigráfica precedente, la caracterización de esta biozona se restringe a unas pocas localidades. En concreto, ha sido reconocida en la cantera del Molinillo (nº 23, Fig. 2), El Centenillo (muestra EC SE-1G) (nº 27) y en las secciones del río Jabalón (nº 4) y arroyo del Lápiz (nº 9). Se caracteriza por la primera aparición de la especie *Streptograptus crispus* (Lapworth), que coincide también con la de *Torquigraptus arcuatus* (Bouček) (Fig. 7P), *T. australis* Štorch, *Cochlograptus veles* (Richter) (Fig. 7J), *Pristiograptus cf. initialis* Kirste, *Streptograptus exiguis* (Nicholson), *Lapworthograptus aff. singularis* (Törnquist), *Parapetalolithus meridionalis* (Legrand) (Figs. 7C-D), *Glyptograptus tamariscus* (Nicholson), *Metaclimacograptus flamandi* (Legrand) y *Retiolites geinitzianus* (Barrande). De biozonas inferiores prosiguen su registro especies de rango temporal amplio como *T. proteus*, *M. marri*, *P. cf. pristinus*, *S. cf. turriculatus* y *Ps. obesus* (Fig. 7E), tras haber sobrevivido al Evento Utilis de extinción (Loydell, 1994; Štorch, 1995b).

Biozona de Monoclimacis griestoniensis. Corresponde a la parte terminal del stage slice “Te2” de Cramer et al. (2011), y es una de las biozonas más ampliamente reconocidas en la región surcentroibérica, habiéndose documentado en numerosas localidades como en las de las cercanías de Santa Eufemia (Córdoba) (GM PO(S) y GM PO (CENT), nº 25, Fig. 2), al este de Santa Elena (19-34 9803-GM, nº 28) y El Centenillo (nº 27), y en las secciones del río Jabalón (nº 4), arroyo del Lápiz (nº 9), Guadalmez Norte (nº 18), estación de Belalcázar (nº 19) y Puente Querbrada (nº 24).

Se caracteriza por la aparición del género *Monoclimacis* y, más concretamente, por la de la especie índice *Monoclimacis griestoniensis* (Nicol) (Figs. 7N, O). La asociación se compone de *Monoclimacis woodae* Zalasiewicz, Loydell & Štorch (Fig. 7F), *Monograptus juancarlosi* Štorch, *M. priodon* (Bronn), *M. drepanoformis* Toghill & Strachan, *M. cf. parapriodon* Bouček, *Stimulograptus splendens* Štorch, *Torquigraptus australis*, *T. arcuatus*, *T. tullbergi* (Bouček), *Streptograptus crispus* (Lapworth), *Pristiograptus nudus* (Lapworth), *Cochlograptus veles*, *Metaclimacograptus flamandi* (Figs. 7A-B), *Parapetalolithus meridionalis* (Legrand) y *Retiolites geinitzianus*. Por otro lado, en la Biozona de *Mcl. griestoniensis* se registra la última aparición de especies de amplio rango como *P. pristinus*, *T. proteus*, *Parapet. cf. altissimus* y *Ps. obesus* (Fig. 5).

Biozona de Torquigraptus tullbergi. Esta biozona se ha caracterizado en las secciones del río Jabalón (nº 4, Fig. 2), arroyo del Lápiz (nº 9), Guadalmez Norte (nº 18), estación de Belalcázar (nº 19) y Puente Quebrada (nº 24), en las localidades de Valdecaballeros (nº 3), al este de Almadén (AL-193, nº 12), cerca de Brazatortas (PT OB-3, nº 15), al este de Santa Elena (19-34 9805-GM y 19-34 9807-GM, nº 28) y en el interior de la mina de Almadén (nº 29).

La asociación de graptolitos se caracteriza por la aparición de *Torquigraptus tullbergi* (Bouček) (Fig. 7K) y *Monoclimacis crenulata* (Elles & Wood), junto con *Torquigraptus flagellaris* (Törnquist), y *M. parapriodon*. También se hallaron formas de amplia distribución vertical como *M. priodon*, *M. juancarlosi*, *T. cf. arcuatus*, *Metaclim. flamandi*, *Ret. geinitzianus*, *Parapet. meridionalis*, *Stim. splendens* y *Cochl. veles*; además de otras que hacen su primera aparición en la biozona, como *Stimulograptus novaki* (Bouček), *Streptograptus speciosus* (Tullberg), *Monograptus curvus* Manck, *Monoclimacis vomerina* (Nicholson), *Retiolites angustidens* Elles & Wood y representantes de los géneros *Diversograptus* (*D. pergracilis*? Bouček), *D. ramosus* Manck) y *Stomatograptus* (*Stomatograptus* sp.) (Fig. 8C). De manera ocasional, en la parte baja de la biozona se registran los últimos representantes de *Mcl. griestoniensis* y *T. australis* (Fig. 7G). Cerca del techo de la biozona inician su representación *Euroclimacis jabalonensis* Loydell, Štorch & Gutiérrez-Marco, *Monoclimacis subgeinitzi* Fu y *Oktavites* sp. (Loydell et al., 2009).

Biozona de Oktavites spiralis. Esta biozona ha sido identificada en las secciones de arroyo Guadarranquejo (nº 1, Fig. 2), río Jabalón (nº 4), Guadalmez Norte (nº 18), estación de Belalcázar (nº 19) y Puente Quebrada (nº 24) y, además, localidades puntuales cerca de Santa Eufemia (GM EU-2, nº 26), y al sur de Peñalsordo (GM-H, nº 20; D-3, nº 21).

La base de esta biozona se marca por la aparición de la especie nominal *Oktavites spiralis* (Geinitz) (Fig. 8L) junto con *O. falx* (Suess) (Fig. 8H), que continúan representadas en la Biozona de *Cyrtograptus lapworthi*. El resto de la asociación se compone de *Oktavites excentricus* (Bjerreskov), *Monograptus praecedens* Bouček, *M. parapriodon*, *M. juancarlosi* (Fig. 8K), *M. curvus* (Fig. 8G), *M. priodon* (Fig. 8F), *M.? cf. grobsdorfensis* (Hemmann), *Stimulograptus splendens* (Fig. 8I), *Stim. pradoloi* Loydell, Štorch & Gutiérrez-Marco, *Stim. vesiculosus* (Perner), *Pristiograptus praedubius* (Bouček), *P. largus* (Perner), *Monoclimacis geinitzi* (Bouček), *Mcl. subgeinitzi*, *Mcl. vomerina*, *Mcl. woodae*, *Mcl. flexa* Loydell, Štorch & Gutiérrez-Marco, *Mcl. cf. crenulata*, *Euroclimacis iberica* Štorch, *E. hamata* Loydell, Štorch & Gutiérrez-Marco, *E. jabalonensis* (Fig. 8O), *Streptograptus anguinus* (Přibyl), *Strep. speciosus*, *Strep. cf. nodifer* (Törnquist) (Fig. 8E), *Torquigraptus flagellaris*, *T. tullbergi*, *T. cf. arcuatus*, *Diversograptus ramosus* (Figs. 8J, M), *D.? pergracilis*, *Barrandeograptus bornholmensis* (Laursen), *Retiolites angustidens* y *R. geinitzianus*. En la parte más alta de la Biozona destaca la primera aparición del género *Cyrtograptus*, representado por *C. lapworthi* Tullberg.

Biozona de Cyrtograptus lapworthi. Solo se ha identificado en las proximidades de Valdeazogues (Localidad PT VAZ-14, nº 13, Fig. 2) y en la sección de Retamar (nº 14), ambas en el sinclinal de Valdeazogues-Puertollano, además de en la sección del río Jabalón (Corral de Calatrava, nº 4).

Esta biozona es difícil de delimitar porque la mayoría de las especies extienden su rango desde la biozona precedente. En la región surcentroibérica se la distingue únicamente por la presencia de *C. lapworthi*, *Streptograptus wimani* (Bouček) y una nueva especie de *Cyrtograptus*. Esta última fue citada como *Cyrtograptus?* sp. nov. por Loydell et al. (2009) y tiene un cierto parecido con *C. insectus* Bouček, con la que fue confundida en trabajos previos (ver Biozona de *C. insectus*? en Štorch et al., 1998). Además de estos graptolitos, la asociación la integran *M. priodon*, *M. aff. probosciformis* Bouček, *Mcl. vomerina*, *Mcl. geinitzi*, *E. iberica* (Fig. 8N), *E. hamata*, *P. praedubius*, *P. largus*, *D. ramosus*, *R. angustidens* (Fig. 8B), *R. geinitzianus*, *Pseudoretiolites* sp. y los últimos representantes de *Metaclim. flamandi*, *O. spiralis*, *O. falx*, *M.? cf. grobsdorfensis*, *M. parapriodon*, *Stim. splendens* y *D.? pergracilis*.

Laguna estratigráfica de las Biozonas de *Cyrtograptus insectus* y de *Cyrtograptus centrifugus*. Las biozonas terminales del Telychiense no han podido identificarse en ninguna de las localidades estudiadas. Loydell et al. (2009) señalan la existencia de una laguna estratigráfica entre la parte media de la Biozona de *C. lapworthi* y la base de la Biozona de *C. murchisoni* en la sección de Corral de Calatrava, que se correspondería con un brusco descenso eustático previo al límite Llandovery - Wenlock. Dicha laguna estaría generalizada en toda la región, ya que el primer registro de *C. murchisoni* Carruthers se sitúa casi siempre muy cerca (0-50 cm) de los últimos representantes de *O. spiralis* (Geinitz).

Biozonas del Wenlock

De los dos pisos que componen esta Serie, únicamente ha sido posible caracterizar casi todo el Sheinwoodiense mediante las correspondientes biozonas de graptolitos, localizadas en la parte alta de la Formación Guadarranquejo y en la parte inferior de las Alternancias arenosas suprayacentes. Los depósitos del Homeriense comprenden, por lo general, facies de alternancias de arenas y pizarras, poco favorables para la conservación de los graptolitos, excepto en contadas intercalaciones de pizarras negras en las que se ha identificado la primera de las biozonas del Homeriense, la Biozona de *Cyrtograptus lundgreni*.

Biozona de Cyrtograptus murchisoni. Esta biozona se documenta en las proximidades de Santa Eufemia (Localidad GM EU-4, nº 26, Fig. 2), y cerca de Almadenejos (Localidades AL AM-1 y AL AM-3, nº 7), así como en la sección de Retamar (nº 14).

Se caracteriza principalmente por la aparición de *Cyrtograptus cf. murchisoni* Carruthers y *Euroclimacis adunca* (Bouček) (Fig. 9N), además de otros elementos característicos como *Monoclimacis basilica* (Lapworth), *Mcl.*

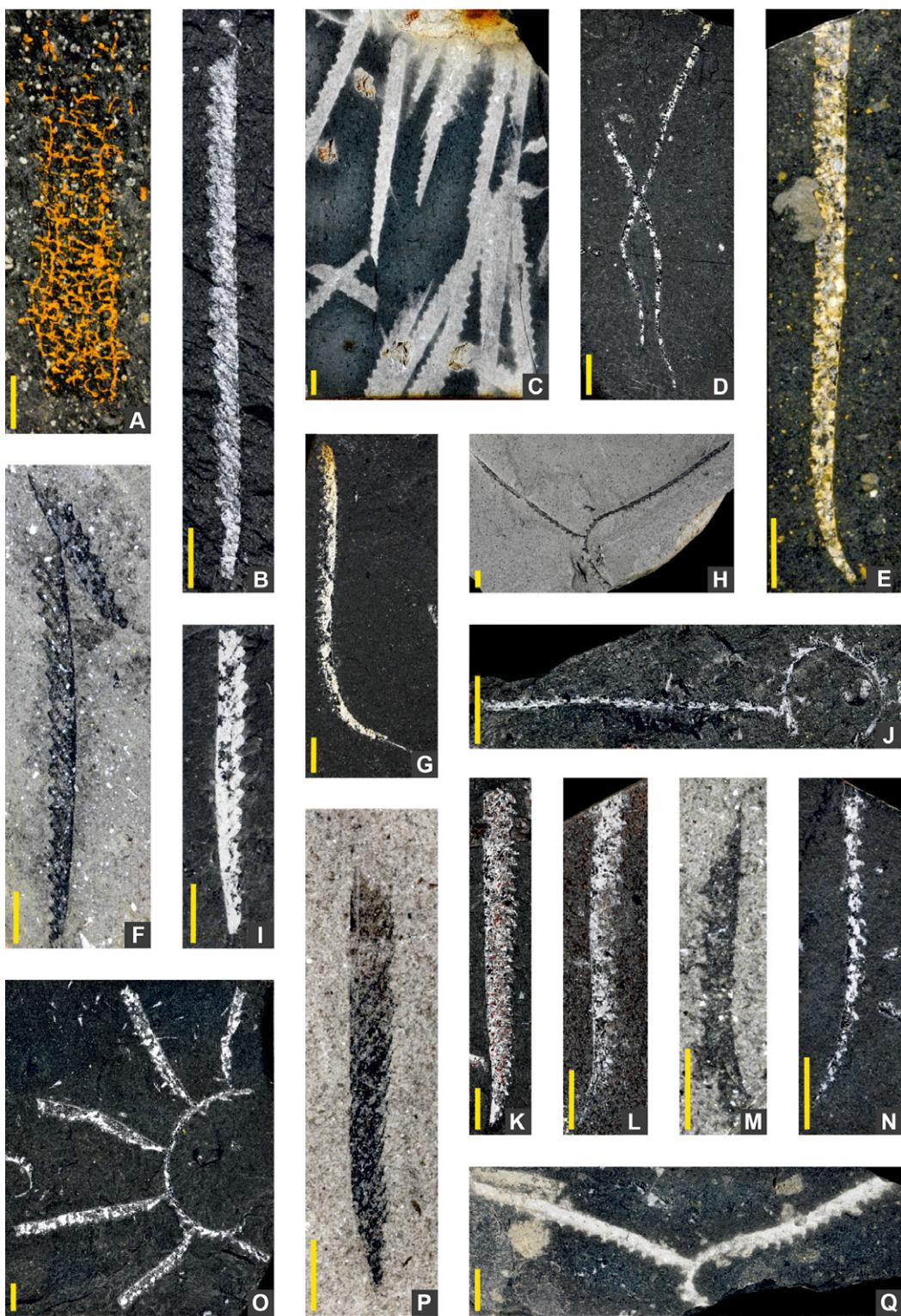


Fig. 9. Graptolitos del Wenlock-Ludlow: biozonas de *Cyrtograptus murchisoni* (N), *Monograptus belophorus*-*Cyrtograptus rigidus* (D, G, I), *Cyrtograptus perneri*-*Cyrtograptus ramosus* (A, E, L, O), *Cyrtograptus lundgreni* (H, J, K) y sin zona definida (B, C, F, M, P, Q). A. *Sokolovograptus textor* (Bouček & Munch). Loc. 14, MGM-1159S. B. *Pristiograptus latus* (Bouček). Loc. 1, MGM-1178S. C. *Pristiograptus meneghini* (Gortani). Loc. 2, MGM-1181S. D. “*Streptograptus*” *antennularis* (Meneghini). Loc. 4, MGM-1221S. E. *Monoclimacis flumendosae* (Gortani). Loc. 10, MGM-1405S. F. *Pristiograptus pseudodubius* (Bouček). Loc. 24, MGM-1183S. G. *Monograptus belophorus* (Meneghini). Loc. 4, MGM-1272S. H. *Cyrtograptus* cf. *lundgreni* Tullberg, colonias carentes de la región proximal, con fragmentos del cladio tecal. Loc. 17, MGM-1427S. I. *Pristiograptus dubius* (Suess). Loc. 4, MGM-1194S. J. *Cyrtograptus perneri* Bouček. Loc. 4, MGM-1286S. K. *Monograptus flemingii* (Salter). Loc. 4, MGM-1285S. L. *Monograptus* cf. *riccartonensis* Lapworth. Loc. 4, MGM-1288S. M. *Saetograptus* cf. *lentwardinensis* (Lapworth). Loc. 24, MGM-1215S. N. *Euroclimacis adunca* (Bouček). Loc. 4, MGM-1382S. O. *Cyrtograptus ramosus* Bouček. Loc. 4, MGM-1436S. P. *Saetograptus* cf. *incipiens* (Wood), conservación oblicua dorsal. Loc. Alange (Badajoz). MGM-1219S. Q. *Cyrtograptus rigidus* Tullberg, tubario con cladio en conexión. Loc. 2, MGM-1423S. La escala gráfica equivale a 3 mm, excepto en A (= 1 mm).

vikensis? Bassett & Rickards, *Mediograptus cautleyensis* (Rickards) y *Med. inconspicuus* (Bouček). En casi toda la biozona, a excepción de su techo, son frecuentes y abundantes los ejemplares de *Monograptus priodon*, *Mcl. vomerina*, *Mcl. geinitzi*, *E. hamata* (Fig. 8P), *Pristiograptus praedubius* (Fig. 8D), *Retiolites geinitzianus* (Fig. 8A) y *R. angustidens*, parte de los cuales se continúan desde el Telychiense, así como *Barrandeograptus cf. pulchellus* (Tullberg), *Monograptus firmus?* Bouček, *M. flemingii* (Salter) y *Monoclimacis flumendosae* (Gortani). En el techo de la biozona se constata el primer registro local de *Pristiograptus latus* (Bouček) (Fig. 9B), pero no una biozona diferenciada de *M. firmus*, como existe en el Silúrico británico (Zalasiewicz *et al.*, 2009; Loydell, 2012) y en Lituania (Loydell *et al.*, 2003) o, como una subzona separada, como se ha observado en el Wenlock de Bohemia (Štorch, 2023). Loydell *et al.* (2009) interpretaron esta ausencia de *Monograptus firmus* Bouček, en el horizonte previo a la aparición brusca de *M. riccartonensis* en la sección del río Jabalón, como indicativa de un pequeño hiato sedimentario equivalente en duración a la Biozona (o subzona) de *M. firmus*.

Biozonas de Monograptus riccartonensis y de Pristiograptus dubius. Estas biozonas se registran muy esporádicamente en el conjunto del área estudiada, donde han logrado determinarse de manera aislada en la sección del río Jabalón (nº 4, Fig. 2) del sinclinal de Corral de Calatrava, en la que parecen detectarse los primeros graptolitos registrados con posterioridad al Evento Murchisoni de extinción (Štorch, 1995b).

La Biozona de *Monograptus riccartonensis* se caracteriza por el registro de la forma nominal, *M. riccartonensis* Lapworth, acompañada por *P. dubius*. La desaparición en la sección de *M. riccartonensis* y la prosecución de una asociación monótona de *Pristiograptus* (*P. dubius* y *P. latus*) son citados por Štorch *et al.* (1998) y Loydell *et al.* (2009) como posibles indicadores de la Biozona de *Pristiograptus dubius*.

Biozona de Cyrtograptus rigidus-Monograptus belophorus. Esta biozona se ha identificado en las secciones del arroyo Guadarranquejo (nº 1, Fig. 2), arroyo de La Colada (nº 2), río Jabalón (nº 4), Retamar (nº 14), estación de Chillón oeste (nº 17) y cerca de Almadenejos (Loc. 4, nº 11).

Se caracteriza por la aparición, conjunta o separada, de *Cyrtograptus rigidus* Tullberg y *Monograptus belophorus* (Meneghini) (Fig. 9G), siendo la segunda especie mucho más abundante que la primera. Adicionalmente, se reconocen en la asociación *Monograptus flemingii*, *M. riccartonensis* Lapworth, *Pristiograptus latus*, *P. meneghini* (Gortani) (Fig. 9C), *P. dubius* (Suess) (Fig. 9I), *Monoclimacis flumendosae*, *Mcl. hemipristis* (Meneghini) y “*Streptograptus*” *antennularius* (Meneghini) (Fig. 9D). La biozona está bastante difundida en el área de estudio, siempre en facies de pizarras negras.

Biozona de Cyrtograptus perneri-Cyrtograptus ramosus. Se reconoce en las secciones arroyo de La Colada (nº 2, Fig. 2), río Jabalón (nº 4), Retamar (nº 14) y estación

de Chillón oeste (nº 17), así como en la localidad Casa del Pilero, en el sinclinal de Almadén (nº 10).

Se distingue por la aparición de *Cyrtograptus perneri* Bouček (Fig. 9O) y *C. ramosus* Bouček, junto a otras especies de distribución estratigráfica amplia, como *Monograptus flemingii*, *Pristiograptus dubius*, *P. meneghini*, *P. pseudodubius* (Bouček) (Fig. 9F) y *Monoclimacis flumendosae* (Fig. 9E), además de raros registros de *Cyrtograptus cf. ellesae* Gortani y *Sokolovograptus textor* (Bouček & Münch) (Fig. 9A). *Monoclimacis hemipristis*, “*Streptograptus*” *antennularius*, *M. belophorus* y *M. riccartonensis* (Fig. 9L) siguen representados en esta biozona en algunas localidades. La aparición de *C. rigidus* (Fig. 9Q) y *C. cf. hamatus* en un mismo horizonte fosilífero plantea la posible identificación errónea de una de las dos formas.

Biozona de Cyrtograptus lundgreni. La identificación del Homeriense con base a graptolitos se limita, en la zona de trabajo, a la biozona basal de este Piso. El resto de la sucesión no contiene graptolitos de esta edad, y las pizarras negras son reemplazadas paulatinamente por sedimentos de mayor tamaño de grano, donde los fósiles son cada vez más escasos o no se registran.

La biozona se ha identificado en las secciones del río Jabalón (nº 4, Fig. 2), Puente Morena (nº 6), Retamar (nº 14) y estación de Chillón oeste (nº 17), así como Almadén (Localidad AL AV-4, nº 8). Se determina localmente en función del hallazgo de fragmentos de *Cyrtograptus cf. lundgreni* Tullberg (Fig. 9H) o de *C. hamatus* (Baily), en una asociación dominada por las siguientes formas que inician su registro en el Sheinwoodiense: *C. perneri* (Fig. 9J), *Monograptus flemingii* (Fig. 9K), *Pristiograptus dubius*, *P. pseudodubius* (Bouček) y *Monoclimacis flumendosae*. Esto implica que, ante la ausencia de las especies índice de esta biozona y de las dos precedentes, muchas secciones con graptolitos del Wenlock centroibérico no puedan delimitarse a nivel de piso dentro del rango Sheinwoodiense medio - Homeriense inferior. La reducida diversidad de graptolitos representada en la Biozona de *C. lundgreni* de la región estudiada, contrasta enormemente con las asociaciones asignadas a la misma en otras áreas mundiales, que propician incluso su división en subzonas (Jaeger, 1991; Štorch, 1994, 2023; Štorch *et al.*, 2025).

Biozonas del Ludlow

Las referencias a graptolitos del Ludlow son bastante excepcionales en el área de trabajo, y en su mayoría corresponden a identificaciones erróneas de especies del Gorstiense o incluso del Ludfordiense que, o bien aparecen mezcladas con asociaciones más antiguas, o bien se citan en yacimientos que tras su revisión se revelaron como de edad Telychiense. Se trata de simples menciones a especies como *Neodiversograptus nilssoni* (Lapworth), *Saetograptus varians* (Wood), *Crinitograptus crinitus?* (Wood), *Lobograptus scanicus* (Tullberg) o *Bohemograptus bohemicus* (Barrande), citadas en los trabajos de Mallada (1875a, 1875b), Egoscue y Mallada (1876), Cortázar (1880), Gómez de Llarena (1916), Hernández-Sampelayo

	Series	Pisos	Subd.	ZCI meridional	Peri-Gondwana (Europa)	
aprox. 419,6 Ma	PRIDOLI	RADOTINIENSE	Pr2	Sin datos	<i>Skalograptus transgrediens</i>	
					<i>Wolynograptus perneri</i>	
aprox. 422,7 Ma		JAROVIENSE	Pr1		<i>Slovinograptus beatus</i>	
					<i>Wolynograptus bouceki</i>	
aprox. 425 Ma					<i>Skalograptus lochkovensis</i>	
					<i>Uncinatogr. pridoliensis</i>	
aprox. 426,7 Ma					<i>Skalograptus parvithimus–Skalograptus ultimus</i>	
aprox. 430,6 Ma	LUDLOW	LUDFORDIENSE	Lu3	Saetograptus leintwardinensis	<i>Pristiograptus fragmentalis</i>	
			Lu2		<i>Psml. latilobus–Slovinogr. balticus</i>	
			Lu1		<i>Neocuculogr. kozlowski</i>	
		GORSTIENSE	Go2		<i>Neocuculogr. inexpectatus</i>	
			Go1		<i>Bohemograptus tenuis</i>	
aprox. 432,9 Ma		WENLOCK	HOMERIENSE		<i>Saetograptus leintwardinensis</i>	
			Ho3		<i>Lobograptus scanicus–Saetograptus chimaera</i>	
			Ho2		<i>Saetograptus fritschi</i>	
			Ho1		<i>Lobograptus progenitor</i>	
			Sh3		<i>Neodiversograptus nilssonii</i>	
aprox. 438,6 Ma			SHEINWOODIENSE	Sin datos	<i>Colonograptus ludensis–Colonograptus gerhardi</i>	
					<i>Colonograptus deubeli–Colonograptus praedeubeli</i>	
					<i>Gothograptus nassa–Pristiograptus frequens</i>	
aprox. 440,5 Ma	LLANDOVERY	TELYCHIENSE	Te5	Hiato	<i>Pristiograptus parvus</i>	
					<i>Monograptus flemingii</i>	
			Te4	<i>Cyrtograptus lundgreni</i>	<i>Testograptus testis</i>	
			Te3		<i>Cyrtograptus lundgreni</i>	
			Te2	<i>Cyrtograptus permeri–Cyrtograptus ramosus</i>	<i>Cyrtograptus permeri–Cyrtograptus ramosus</i>	
			Te1		<i>Cyrtograptus rigidus–Monograptus belophorus</i>	
			Sh3	<i>Pristiograptus dubius</i>	<i>Cyrtograptus rigidus</i>	
			Sh2		<i>Monograptus belophorus</i>	
			Sh1	<i>Sin datos</i>	<i>Pristiograptus dubius–Pristiograptus latus</i>	
aprox. 443,1 Ma		AERONIENSE	<i>Monograptus riccartonensis</i>		<i>Monograptus riccartonensis</i>	
					<i>Hiato</i>	
			<i>Cyrtograptus murchisoni</i>	<i>Monograptus firmus</i>	<i>Monograptus firmus</i>	
					<i>Cyrtograptus murchisoni</i>	
			Te5	<i>Cyrtograptus centrifugus</i>	<i>Cyrtograptus centrifugus</i>	
			Te4		<i>Cyrtograptus insectus</i>	
			Te3	<i>Cyrtograptus lapworthi</i>	<i>Cyrtograptus lapworthi</i>	
			Te2		<i>Oktavites spiralis</i>	
			Te1	<i>Torquigrapthus tullbergi</i>	<i>Oktavites spiralis</i>	
			Ae3		<i>Torquigrapthus tullbergi</i>	
			Ae2	<i>Monoclimacis griestoniensis</i>	<i>Monoclimacis griestoniensis</i>	
			Ae1		<i>Streptograptus crispus</i>	
			Rh3	<i>Streptograptus crispus</i>	<i>Streptograptus crispus</i>	
			Rh2		<i>Spirograptus turriculatus</i>	
			Rh1	<i>Rastrites linnaei</i>	<i>Spirograptus turriculatus</i>	
					<i>Rastrites linnaei</i>	
				<i>Parapet. hispanicus</i>	<i>Lituograptus rastrum</i>	
					<i>Stimulograptus sedwickii</i>	
				<i>Parapet. palmeus</i>	<i>Lituograptus convolutus</i>	
					<i>Petalolithus folium</i>	
				<i>Parad. runcinatus–"M." gemmatus</i>	<i>Demirastrites simulans</i>	
					<i>Demirastrites pectinatus</i>	
				<i>Demirastrites triangulatus</i>	<i>Demirastrites triangulatus</i>	
					<i>Coronograptus cyphus</i>	
				<i>Sin datos</i>	<i>Cystograptus vesiculosus</i>	
					<i>Parakidograptus acuminatus</i>	
					<i>Akidograptus ascensus</i>	

Fig. 10. Biozonas de graptolitos reconocidas en la región surcentroibérica (izquierda), y su correlación con el esquema biocronológico de las cuencas peri-gondwánicas europeas (derecha, tomado de Storch, 2023). La datación de los límites cronoestratigráficos de series y pisos está tomada de Melchin *et al.* (2020) y Cohen *et al.* (2025); las abreviaturas de los “Stage Slices” como subdivisión de los pisos, son las de Cramer *et al.* (2011). Los pisos de la serie Pridoli son, por el momento, informales, y se adaptan de Manda *et al.* (2023). Debido al mínimo espacio disponible, no se han representado las tres subzonas reconocidas dentro de la Biozona de *Spirograptus guerichi* (Fig. 5). Las dos superiores serían correlacionables con las zonas de *Parapetalolithus palmeus* y *P. hispanicus* de Bohemia, y la inferior corresponde aquí a la subzona de *Paradiversograptus runcinatus–"Monograptus" gemmatus*.

(1926), Henke y Hundt (1926) y Almela *et al.* (1962). Sigue lo mismo en áreas próximas a las aquí analizadas, donde el único artículo que ilustra graptolitos del Ludlow corresponde a Gutiérrez-Marco *et al.* (1997), en concreto un ejemplar de *Saetograptus leintwardinensis* (Lapworth) registrado en Alange (Badajoz). Por su interés, hemos procedido a una revisión de este yacimiento y se ha identificado un nuevo taxón, *Saetograptus cf. incipiens* (Wood) (Fig. 9P).

Dentro de la zona estudiada, el registro confirmado de graptolitos del Ludlow se limita a un nivel aislado del flanco norte del sinclinal de Los Pedroches, donde aparece una asociación monoespecífica de *Saetograptus cf. leintwardinensis* (Lapworth), identificada en la sección de Puente Quebrada (San Benito) (nº 24, Fig. 2). Según Štorch *et al.* (2014), dicha especie (Fig. 9M) tiene prioridad taxonómica sobre *S. linearis* (Bouček), otra forma citada con alguna frecuencia en la bibliografía ibérica de graptolitos.

Saetograptus leintwardinensis define una biozona homónima en la base del Ludfordiense (= inicio del stage slice "Lu1" de Cramer *et al.*, 2011).

Correlación bioestratigráfica

Los graptolitos planctónicos son los fósiles guía que se utilizan internacionalmente para el establecimiento de las divisiones cronoestratigráficas a todos los niveles dentro del Silúrico (4 series y 8 pisos: Melchin *et al.*, 2020; Štorch *et al.*, 2025). La biozonación estándar (Koren *et al.*, 1996) ha sido modificada a escala regional para adecuarse a los datos locales, lo que ha dado lugar a variaciones en el esquema de biozoras para los distintos ámbitos paleobiogeográficos (ver, entre otros, Zalasiewicz *et al.*, 2009; Loydell, 2012; Maletz, 2023a; Štorch, 2023; con referencias previas). En el caso de la región surcentroibérica, la biozonación utilizada es la de la región peri-gondwánica europea, que sigue el esquema patrón de biozoras adoptado en la cuenca de Praga (Štorch, 2023; con referencias previas), que fue adoptado por vez primera para la Península Ibérica por Gutiérrez-Marco y Štorch (1998), Štorch (1998a, b) y Štorch *et al.* (1998). Su correspondencia con la biozonación estándar revisada (Melchin *et al.*, 2020) se detalla en Štorch *et al.* (2025). En el caso de la biozona más antigua del Telychiense, preferimos denominarla con arreglo a la extensión de *Spirograptus guerichi*, por corresponder a la biozona nominal que se utiliza en el resto del mundo, cuyo estratotipo global de límite (GSSP) ha sido establecido en España (Gutiérrez-Marco *et al.*, 2024a). En Europa central, la biozona equivalente es la de *Rastrites linnaei*, que adopta la larga tradición de la escala bohémica (Štorch, 2023; Strossová, 2024; Strossová *et al.*, 2024).

En la se presenta una síntesis del marco cronoestratigráfico y bioestratigráfico general para el Sistema Silúrico, junto con las biozoras de graptolitos reconocidas en el presente estudio en la parte meridional de la Zona Centroibérica. La distribución vertical de especies permite caracterizar 15 biozoras y tres subzonas, así como siete intervalos sin registro graptolítico que suelen coincidir con el desarrollo de litologías poco favorables para la preser-

vación de estos fósiles, o bien con condiciones sedimentarias muy someras y energéticas, en especial en las alternancias de predominio arenoso dominantes en el Ludlow y Pridoli. No obstante, dos (o tres?) de estos intervalos corresponden en realidad a hiatos sedimentarios localizados en el techo del Telychiense y dentro del Sheinwoodiense, respectivamente, que fueron caracterizados con gran precisión en la sección del río Jabalón en Corral de Calatrava (Loydell *et al.*, 2009).

Si comparamos la sucesión silúrica de la región surcentroibérica con otras áreas del Macizo Ibérico, se observa que la mayor parte del registro graptolítico se halla comprendido entre la biozona basal del Telychiense y la biozona basal del Homeriense. Esto presenta notables similitudes con las sucesiones graptolíticas desarrolladas en la Cordillera Ibérica y zonas Cantábrica y Asturooccidental-Leonesa, y difiere mucho con el registro bastante completo del Silúrico en facies equivalentes de sapropelitas negras, que caracteriza la Zona de Ossa Morena (Robardet y Gutiérrez-Marco, 2002; Gutiérrez-Marco *et al.*, 2021; Štorch, 2023; Gutiérrez-Marco *et al.*, 2024b).

Aspectos paleoecológicos y paleobiogeográficos

Los parámetros de distribución de los graptolitos holoplancónicos han propiciado diversos modelos en función de la temperatura, profundidad del hábitat y dinámica oceánica (Cooper *et al.*, 2012, 2023; Maletz, 2023c; Štorch *et al.*, 2025, entre otros). Durante mucho tiempo, las viscosas facies de pizarras negras graptolíticas de la región estudiada se interpretaron como depositadas en cuencas anóxicas cerradas, tal vez profundas o, en casos extremos, incluso abisales. Sin embargo, las condiciones anóxicas del fondo pueden darse en contextos mucho más someros, cuando hay estratificación de masas de agua por temperatura y densidad, o bien por su proximidad a áreas de afloamiento (*upwelling*), con gran productividad orgánica. En estas condiciones la materia orgánica, acumulada en exceso en el fondo marino, consume todo el oxígeno en su degradación, generando ambientes anóxicos a disaeróbicos, con ausencia de faunas bentónicas o endobentónicas.

Štorch (1998a) establece tres paleoecosistemas graptolíticos para las facies de pizarras negras del Silúrico de la plataforma perigondwánica en función de la profundidad y la cantidad de nutrientes. El primero de ellos corresponde a las asociaciones acumuladas en las facies de plataforma profunda y talud superior, donde la biodiversidad es moderada a alta y está dominada por formas cosmopolitas, que permiten correlaciones muy precisas a larga distancia. El segundo paleoambiente se sitúa en la plataforma, donde las condiciones anóxicas se generan prácticamente en la interfase sedimento-agua, lo que permite la proliferación de graptolitos pelágicos de diversidad moderada, así como macrofósiles nectónicos, nectobentónicos y epibentónicos (euriptéridos, filocáridos, nautiloideos, conodontozoóforos, ostrácodos, bivalvos, braquíopodos, crinoideos). El tercer escenario reúne una asociación de graptolitos epipelágicos de baja biodiversidad, capaces de alcanzar los ambientes bien oxigenados y energéticos de la plataforma somera.

Las dos últimas asociaciones descritas por Štorsch (1998a) aparecen representadas en el área de trabajo de este estudio. Los graptolitos del Aeroniense, derivados de los niveles superiores de la Formación Cuarcita del Criadero y unidades equivalentes, corresponden claramente a formas de aguas superficiales que ingresan en la plataforma somera y se hallan dominadas por colonias biseriales de *Normalograptus* y *Rhaphidograptus*, con escasa a nula representación de tubarios uniserials. La rápida transgresión marina que sigue a la Formación Cuarcita del Criadero favorece la llegada de asociaciones más variadas vinculadas con áreas de *upwelling* que incrementan mucho la productividad en todo el sector, con máximos de biodiversidad para las biozonas de *Spirograptus guerichi* y *Oktavites spiralis* del Telychiense. Aún con todo, las asociaciones de graptolitos son las típicas de plataforma, con rastrítidos, parapetalolítidos, torquigráptidos y *Oktavites* en el Telychiense, y algunos cirtográptidos en el Wenlock. Las fluctuaciones de los niveles de oxígeno cerca del fondo permiten, episódicamente, la instalación de comunidades bentónicas adaptadas a condiciones disaeróbicas (braquiópodos “de papel”, bivalvos de concha fina, ostrácodos y raros trilobites), en tanto que los abundantes restos decefalópodos y filocáridos nectónicos evidencian ambientes bien oxigenados a cierta distancia del fondo. Tan sólo en la sección del río Jabalón (Corral de Calatrava), se observa, excepcionalmente, la intercalación de niveles lumaquélidos delgados (10-30 cm), de continuidad lateral decamétrica y naturaleza margosa, que se forman en el Sheinwoodiense por la acumulación de conchas de braquiópodos y cornulítidos. No obstante, lo habitual es el desarrollo de medios sapropelíticos con ausencia generalizada de bioturbación, en cuyas condiciones anóxicas influyeron tanto la estratificación de masas de agua dentro de la plataforma, como una elevada productividad orgánica, que consumía todo el oxígeno en la putrefacción de los componentes orgánicos acumulados en el fondo. Es por ello que la presencia de organismos bentónicos como trilobites, bivalvos, macacerídios, cnidarios y ciertos braquiópodos resulta anecdótica, y puede ser debida tanto al transporte de escleritos a larga distancia, como a la adaptación de raras formas a un modo de vida epiplanctónico, tal vez como epizoos de algas flotantes de tipo sargazo (cornulítidos, gasterópodos, algunos braquiópodos).

Las asociaciones graptolíticas de diversidad moderada predominan en la región durante buena parte del Telychiense y Sheinwoodiense, sin que se reconozcan formas propias de ambientes mesopelágicos. Sin embargo, a partir del Sheinwoodiense y, sobre todo, en el Homeriense, se produce un retorno a las asociaciones monótonas de aguas superficiales, dominadas por grandes *Pristiograptus*, monográptidos de tecas ganchudas y algunos *Monoclimacis*, que dan paso a una fauna todavía más empobrecida y restringida virtualmente a formas de *Pristiograptus* del grupo *dubius*. En estas condiciones, las únicas referencias bioestratigráficas provienen del registro esporádico de *Cyrtograptus* (en el Wenlock) y de *Saetograptus* (en el Ludlow). El carácter progresivamente más somero de la sedimentación se evidencia por la sustitución de las pizarras negras por otras de tonalidades grisáceas, con abundantes

micas detríticas, que hacia techo van intercalando laminaciones arenosas y horizontes cada vez más espesos de areniscas.

Finalmente, y desde el punto de vista paleobiogeográfico, la región estudiada se situaría en la periferia del macrocontinente de Gondwana durante el Silúrico, en latitudes que pasaron progresivamente de más elevadas a intermedias (de 60° S a 30° S según Torsvik y Cocks, 2017). El predominio de facies extensivas de areniscas y pizarras negras graptolíticas, depositadas en ambientes de plataforma marina somera en toda la región estudiada, es común a un área más amplia que incluye el suroeste de Europa y parte del norte de África. Este factor, unido al predominio de especies cosmopolitas entre los organismos planctónicos, impide delimitar divisiones paleobiogeográficas menores, que en todo caso se adscriben a la llamada “provincia mediterránea” de graptolitos (Štorsch, 1998a).

Consideraciones finales y conclusiones

En este trabajo se analiza la bioestratigrafía de la sucesión silúrica, a partir de los datos proporcionados por los graptolitos de un extenso sector del Macizo Ibérico, que comprende el sector español de la Zona Centroibérica meridional, ubicado al norte de Zona de Cizalla Puente Génave-Castelo de Vide. El estudio en el que se basa (Lorenzo, 2015) abarcó unas 130 secciones y localidades puntuales (que suman más de 380 niveles fosilíferos) repartidas en seis provincias pertenecientes a tres comunidades autónomas: Extremadura (Cáceres, Badajoz), Castilla-La Mancha (Ciudad Real, Toledo) y Andalucía (Córdoba, Jaén). De todas ellas, para el presente trabajo se ha seleccionado una treintena de los lugares con mayor representatividad estratigráfica e interés paleontológico.

El grupo fósil en el que se centraron los estudios fueron los graptolitos, por su preciso potencial para la datación cronoestratigráfica y la correlación bioestratigráfica. Entre los fósiles de invertebrados no graptolitos, tan solo una pequeña parte ha podido ser identificada taxonómicamente y no aporta datos estratigráficos relevantes. Se trata de raros artrópodos como euriptéridos, filocáridos, ostrácodos y trilobites; moluscos (cefalópodos, gasterópodos y bivalvos), braquiópodos (rinconeliformes y linguliformes), equinodermos (osículos de crinoideos), cnidarios, anélidos (macacerídios), cornulítidos, conodontos e icnofósiles. Con excepción de los graptolitos y otros organismos pelágicos como loscefalópodos, la proporción de restos de otros grupos es muy minoritaria en las ubicuas facies de pizarras negras graptolíticas. El ambiente de depósito de estas facies suele corresponder a medios euxínicos, siendo este carácter independiente de la profundidad (Štorsch, 1998a; Finney *et al.*, 2007; Boucot y Chen, 2009). La anoxia estaría vinculada a la presencia de masas de agua estratificada y a fenómenos de sobreabundancia de materia orgánica (“blooms” de microplancton), cuya putrefacción provoca el déficit de oxígeno que, entre otros efectos, impide la vida bentónica.

El estudio taxonómico de los graptolitos ha revelado la presencia, en la zona de estudio, de más de cien especies pertenecientes, al menos, a treinta y dos géneros. El análisis

de la bibliografía regional, combinado con la revisión de las localidades fosilíferas previamente descritas, ha permitido descartar varias decenas de taxones mencionados por autores previos en el conjunto de la región surcentroibérica.

Desde el punto de vista bioestratigráfico, se ha caracterizado una sola biozona del Aeroniense (la de *Lituograptus convolutus*), dado que los materiales pre-telychienses se desarrollan en facies casi exclusivamente arenosas. Las pizarras negras que le suceden contienen abundantes asociaciones de graptolitos del Telychiense, abarcando las biozonas de *Spirograptus guerichi* (con sus tres subzonas de *Paradiversograptus runcinatus*-*Monograptus gemmatus*, *Parapetalolithus palmeus* y *Parapetalolithus hispanicus*), *Spirograptus turriculatus*, *Streptograptus crispus*, *Mono-climacis griestoniensis*, *Torquigraptus tullbergi*, *Oktavites spiralis* y *Cyrtograptus lapworthi*. En las pizarras negras del Sheinwoodiense se reconocen las biozonas de *Cyrtograptus murchisoni*, *Monograptus riccartonensis*, *Pristiograptus dubius*, *Cyrtograptus rigidus*-*Monograptus bełophorus* y *Cyrtograptus perneri*-*Cyrtograptus ramosus*. Finalmente, el Homeriense y el Ludfordiense se hallan representados, respectivamente, por las biozonas de *Cyrtograptus lundgreni* y de *Saetograptus leintwardinensis*(?) que corresponden, respectivamente, al final del depósito de las sapropelitas negras (diacrónico en el área estudiada) y a una intercalación puntual de estas litologías en las alternancias arenosas de la parte alta de la sucesión.

Teniendo en cuenta el número de registros de las biozonas en la mayoría de las secciones estudiadas, cabe destacar que, durante el Llandovery, las biozonas de *Oktavites spiralis* y *Torquigraptus tullbergi* son las que alcanzan una mayor dispersión y diversidad de especies; de manera análoga en el Wenlock con la Biozona de *Cyrtograptus perneri*-*Cyrtograptus ramosus* ocurre lo mismo.

El reconocimiento de quince biozonas y tres subzonas de graptolitos facilita la correlación directa del Silúrico surcentroibérico con el esquema bioestratigráfico del ámbito peri-Gondwánico, tipificado por la sucesión del sinforme de Praga (Štorch, 2023). La única excepción la constituye la biozona basal del Telychiense, que en Bohemia muestra facies desfavorables para graptolitos en su parte inferior (Biozona de *Rastines linnaei*, aquí reemplazada por la Biozona global de *Spirograptus guerichi*).

Agradecimientos y financiación

A Carlos Alonso (Universidad Complutense de Madrid), por las fotografías de graptolitos, y a los revisores científicos Dres. Rodolfo Gozalo (Universitat de València) y Fernando E. López (CONICET-Universidad Nacional de San Juan). El presente estudio ha sido financiado, en su última fase, por el proyecto PDI2021-125585NB-I00 del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades – Agencia Estatal de Investigación y es también una contribución al programa de investigación científica en los Geoparques mundiales de la UNESCO Volcanes de Calatrava y Villuercas-Ibores-Jara.

Contribución de autores

Los dos autores han contribuido de manera equitativa

al texto y a la producción del manuscrito. SL realizó las figuras.

Referencias

- Alía Medina, M., Capote, R., Hernández Enrile, J.L., 1971. Rasgos geológicos y tectónicos de la Sierra Morena oriental y sus estribaciones meridionales en la transversal de Moral de Calatrava (Ciudad Real) a Villanueva del Arzobispo (Jaén). 1º Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica, Madrid, 1: 3-15.
- Almela, A., 1959. Esquema geológico de la zona de Almadén (Ciudad Real). Boletín del Instituto Geológico y Minero de España, 70: 315-330.
- Almela, A., Febrel, T., 1960. La roca frailesca de Almadén, un episodio tobáceo en una formación basáltica del Siluriano superior. Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, 59: 41-72.
- Almela, A., Alvarado, M., Coma, J., Felgueroso, C., Quintero, I., 1962. Estudio geológico de la región de Almadén. Boletín del Instituto Geológico y Minero de España, 73: 195-327.
- Arbey, F., Tamain, G., 1971. Existence d'une glaciation siluro-ordovicienne en Sierra Morena (Espagne). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série D, 177: 1291-1294.
- Ballestra, G., Becker-Wahl, C., Germann, A., Höfges, J., Hoffmann, M., Kumpa, M., Marker, A., Neidhöfer, R., Ruth, H.G., Schilling, E., Wilcke, J., Walter, R., 1982. La geología del Sinclinal de Guadarranque. (Contribuciones al conocimiento del Precámbrico y Paleozoico Inferior de los Montes de Guadalupe, España Central, III). Münstersche Forschungen zur Geologie und Paläontologie, 56: 45-68.
- Bernáldez, F., Rúa Figueroa, R., 1861. Memoria sobre las minas de Almadén y Almadenejos. Madrid, Imprenta Nacional, 325 p.
- Bernárdez, E., Colmenar, J., Gutiérrez-Marco, J.C., Rábano, I., Zamora, S., 2014. New peri-Gondwanan records of the Hirnantia Fauna in the latest Ordovician of Spain. En: Gondwana 15 North meets South, Abstracts Book, (R.J. Pankhurst, P. Castiñeiras, S. Sánchez Martínez, Eds.). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 15.
- Blachère, H., 1978. Etude géologique et minière de la région de Chillon-El Borracho (synclinal d'Almaden). Ciudad Real/Espagne. Thèse 3ème cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay, 163 p.
- Bochmann, H.G., 1956. Stratigraphie und Tektonik der zentralen Extremadura im Bereich von Cáceres und der östlichen Sierra de San Pedro (Spanien). Dissertation der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, 195 p. (Inéd.). [Resúmenes publicados en: Münstersche Forschungen zur Geologie und Paläontologie, (Walter, Ed., 1977). 42: 10-13, Anlage 3 y en: Franz Lotze (1903-1971). The doctoral theses of his students in Spain and Portugal. Abridged versions, (J.F. von Raumer, Ed., 2008). Instituto Universitario de Geología “Isidro Parga Pondal”. O Castro, serie Nova Terra, 36:53-56].
- Boucot, A.J., Chen, X., 2009. Fossil plankton depth zones. Palaeoworld, 18: 213–234. <https://doi.org/10.1016/j.palwor.2009.05.002>
- Butenweg, P., 1968. Geologische Untersuchungen im Ostteil der Sierra Morena nordöstlich von La Carolina. (Prov. Jaén, Spanien). Münstersche Forschungen zur Geologie und Paläontologie, 6, 126 p.
- Butenweg, P., 2008. Geological investigations in the eastern Sierra Morena northeast of La Carolina (Prov. Jaén, Spain) – a summary. En: Franz Lotze (1903-1971). The doctoral theses of his students in Spain and Portugal. Abridged versions, (J.F.

- von Raumer, Ed.). Instituto Universitario de Geología “Isidro Parga Pondal”. O Castro, serie Nova Terra, 36: 57-61.
- Capote del Villar, R., Hernández Enrile, J.L., 1969. Estudio geológico de la región Santa Cruz de Mudela-Despeñaperros. Memoria Inédita, Junta de Energía Nuclear, Madrid, 89 p.
- Carballeira, J., Pol, C., Duque, J., 1985. Tempestitas del Ordovícico Superior en el sinclinal de Cañaveral (Cáceres). Trabajos de Geología, Oviedo, 15: 87-97.
- Charpentier, J.L., 1976. Géologie et Métallogénie de la Sierra Carolina (Jaén, Espagne). Thèse 3ème cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay, 156 p.
- Ciry, G., 1936. Contribution à l'étude géologique de la région d'Almaden. Boletín de la Sociedad Española de Historia Natural, 36: 295-300.
- Cohen, K., Harper, D., Gibbard, P., Car, N., 2025. The international stratigraphic chart this decade. Episodes, 48 (1): 105-115. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2025/025001>
- Comba, J.A. (Coord.), 1983. Libro Jubilar José María Ríos. Geología de España, Tomo 1. IGME, Madrid, 656 p.
- Cooper, R.A., Rigby, S., Loydell, D.K., Bates, D.E.B., 2012. Palaeoecology of the Graptoloidea. Earth-Science Reviews, 112: 23-41. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.01.001>
- Cooper, R.A., Rigby, S., Bates, D.E.B., Maletz, J., 2023. Palaeoecology of the Pterobranchia (Cephalodiscida and Graptolithina). En: Treatise on Invertebrate Paleontology, Part V, Hemichordata, Second Revision, including Enteropneusta, Pterobranchia (Graptolithina), (P.A. Selden, W.I. Ausich, Eds. y J. Maletz, Coord). The University of Kansas, Paleontological Institute, Lawrence, Kansas, 548 p.
- Corretgé, L.G., García de Figuerola, L.C., 1971. Rasgos geológicos de la región comprendida entre el sinclinal de Cañaveral y la Sierra de San Pedro (Cáceres). I Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica, Madrid, 1: 183-195.
- Corretgé, L.G., Suárez, O., Tena-Dávila, M., 1982. Los granitos, rocas volcánicas y rocas volcanoclásticas del sinclinal de Cáceres. Trabajos de Geología, Univ. de Oviedo, 12: 251-271.
- Cortázar, D., 1880. Reseña física y geológica de la provincia de Ciudad Real. Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España, 7: 289-330.
- Cramer, B.D., Brett, C.E., Melchin, M.J., Männik, P., Kleffner, M.A., McLaughlin, P.I., Loydell, D.K., Munnecke, A., Jeppsson, L., Corradini, C., Brunton, F.R., Saltzman, M.R., 2011. Revised correlation of Silurian Provincial Series of North America with global and regional chronostratigraphic units and $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ chemostratigraphy. Lethaia, 44: 185-202. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.2010.00234.x>
- Dallmeyer, R.D., Martínez García, E. (Eds.), 1990. PreMesozoic Geology of Iberia. Berlin, Springer-Verlag, 416 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-83980-1>
- Díez Balda, M.A., Vegas, R., González-Lodeiro, F., 1990. Central-Iberian Zone. Autochthonous sequences. Structure. En: Pre-Mesozoic Geology of Iberia, (R.D. Dallmeyer y E. Martínez-García, Eds.). Springer-Verlag, 172-188. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-83980-1>
- Egozcue, J., Mallada, L., 1876. Memoria geológico-minera de la provincia de Cáceres. Memorias de la Comisión del Mapa Geológico de España, 4, 368 p.
- Finney, S.C., Berry, W.B.N., Cooper, J.D., 2007. The influence of denitrifying seawater on graptolite extinction and diversification during the Hirnantian (latest Ordovician) mass extinction event. Lethaia, 40: 281-291. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.2007.00027.x>
- Gallardo Millán, J.L., Higueras, P., Molina, J.M., 1994. Análisis estratigráfico de la “Cuarcita de Criadero” en el Sinclinal de Almadén. Boletín Geológico y Minero de España, 105: 135-145.
- García Palacios, A., Rábano, I., 1996. Hallazgo de trilobites en pizarras negras graptolíticas del Silúrico inferior (Telychiense, Llandovery) de la Zona Centroibérica (España). Geogaceta, 20 (1): 239-241.
- García Palacios, A., Gutiérrez-Marco, J.C., Herranz Araújo, P., 1996a. Edad y correlación de la “Cuarcita de Criadero” y otras unidades cuarcíticas del límite Ordovícico-Silúrico en la Zona Centroibérica meridional (España y Portugal). Geogaceta, 20 (1): 19-22.
- García Palacios, A., Štorch, P., Gutiérrez-Marco, J.C., 1996b. Graptolite biostratigraphy of Silurian black shales near Corral de Calatrava (Central Iberian Zone, Spain). The James Hall Symposium: Second International Symposium on the Silurian System, Rochester. Program and Abstracts, 54.
- Gibbons, W., Moreno, T. (Eds.), 2002. The Geology of Spain. Geological Society of London, 632 p. <https://doi.org/10.1144/GOSPP>
- Gil Cid, M.D., Gutiérrez Elorza, M., Romariz, C., Vegas, R., 1976. El Ordovícico y Silúrico del sinclinal de Guadarranque-Gualija (Prov. de Cáceres, España). Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, 60: 17-29.
- Gómez de Llarena, M., 1916. Bosquejo Geográfico-Geológico de los Montes de Toledo. Trabajos del Museo Nacional de Ciencias Naturales (Geología), 15, 74 p.
- Gonzalo y Tarín, J., 1879. Reseña físico-geológica de la provincia de Badajoz. Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España, 6: 389-412.
- Groth, J., 1911. Sur le Primaire de la Sierra Morena. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris), 150: 231-232.
- Gumieli P., Campos, R., Monteserín, V., 1998. Mapa Geológico y de Recursos Minerales del Sector Central de Extremadura (a escala 1:100.000). Junta de Extremadura, Mérida, 99 p.
- Gumieli, P., Campos, R., Monteserín, V., Bellido, F., Quesada, C., Lombardero, M., 2002. Mapa Geológico y de Recursos Minerales del Sector Centro-Occidental de Extremadura (escala 1:100.000). Junta de Extremadura, Mérida, 140 p.
- Gumieli, P., Campos, R., Segura, M., Monteserín, V., 2003. Guía Geológica del Parque Natural de Monfragüe. Consejería de Agricultura y Medio Ambiente, Junta de Extremadura, Mérida, 94 p.
- Gumieli, P., Arias, M., Monteserín, V., Segura, M., 2010. Modelo geológico 3D de la estructura en sinfórm de Monfragüe: un valor añadido al patrimonio geológico del parque Nacional. Boletín Geológico y Minero, 121 (1): 15-28.
- Gutiérrez-Marco, J.C., Pineda Velasco, A., 1988. Datos bioestratigráficos sobre los materiales silúricos del subsuelo de El Centenillo (Jaén). Comunicaciones del II Congreso Geológico de España, Granada, 1: 91-94.
- Gutiérrez-Marco, J.C., Štorch, P., 1998. Graptolite biostratigraphy of the Lower Silurian (Llandovery) shelf deposits of the Western Iberian Cordillera, Spain. Geological Magazine, 135 (1): 71-92. <https://doi.org/10.1017/S0016756897007802>
- Gutiérrez-Marco, J.C., San José, M.A., Pierren, A., 1990. Chapter IV, 2.1.3: Post-Cambrian Palaeozoic Stratigraphy, Central Iberian Zone. En: Pre-Mesozoic Geology of Iberia, (R.D. Dallmeyer y E. Martínez García, Eds.). Springer Verlag, Berlin, 160-171.
- Gutiérrez-Marco, J.C., Porro Mayo, T., Herranz Araújo, P., Pierren Pidal, A., 1997. Dos nuevos yacimientos con graptolitos silúricos en la región de Alange (Badajoz). Geogaceta, 21: 131-133.
- Gutiérrez-Marco, J.C., Robardet, M., Piçarra, J.M., 1998. Silu-

- rian Stratigraphy and Paleogeography of the Iberian Peninsula (Spain and Portugal). En: Proceedings Sixth International Graptolite Conference & 1998 Field Meeting of the IUGS Subcommission on Silurian Stratigraphy, (J.C. Gutiérrez-Marco y I. Rábano, Eds.). Temas Geológico-Mineros ITGE, 23: 13-44.
- Gutiérrez-Marco, J.C., Rábano, I., Sarmiento, G.N., Robardet, M., 2001. Fósiles del Silúrico español. Memorias de las VII Jornadas Aragonesas de Paleontología. "La Era Paleozoica. El Desarrollo de la Vida Marina". Institución "Fernando El Católico" (Excma. Diputación de Zaragoza), 95-123.
- Gutiérrez-Marco, J.C., Robardet, M., Rábano, I., Sarmiento, G.N., San José Lancha, M.A., Herranz Araújo, P., Pieren Pidal, A.P., 2002. Chapter 4, Ordovician. En: The Geology of Spain, (W. Gibbons and T. Moreno, Eds.). The Geological Society, London, 31–49. <https://doi.org/10.1144/GOSPP>
- Gutiérrez-Marco, J.C., Rábano, I., Lorenzo, S., 2012. El patrimonio paleontológico del Paleozoico marino de la región de Almadén (Ciudad Real). De Re Metallica, 19: 27-42.
- Gutiérrez-Marco, J.C., Lorenzo, S., Piçarra, J.M., 2014. Graptolitos con conservación tridimensional en el Silúrico centroibérico. En: Yacimientos excepcionales de fósiles ibéricos. Libro Homenaje al Dr. Antonio Perejón Rincón, (J.A. Gámez Vintaned, Ed.). Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural, 2^a ép., 12: 63-72.
- Gutiérrez-Marco, J.C., Piçarra, J.M., Meireles, C.A., Cázar, P., García-Bellido, D.C., Pereira, Z., Vaz, N., Pereira, S., Lopes, G., Oliveira, J.T., Quesada, C., Zamora, S., Esteve, J., Colmenar, J., Bernárdez, E., Coronado, I., Lorenzo, S., Sá, A.A., Dias da Silva, I., González Clavijo, E., Díez Montes, A., Gómez Barreiro, J., 2019. Early Ordovician–Devonian passive margin stage in the Gondwanan units of the Iberian Massif. Chapter 3 En: The Geology of Iberia: a Geodynamic Approach. Vol. 2, The Variscan Cycle, (C. Quesada y J.T. Oliveira, Eds. y J.F. Simancas, Coord.). Regional Geology Reviews, 75. Springer Nature Switzerland AG, Basel, 75-98. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10519-8_3
- Gutiérrez-Marco, J.C., Loydell, D.K., Štorch, P., 2021. The Silurian section of the Valle syncline (Sierra Norte de Sevilla UNESCO Global Geopark, Spain) as an international standard for graptolite biostratigraphy. En: Paleontological Heritage and Geoconservation in the European UNESCO Geoparks, (D.A. Grigorescu, Ed.). Geoconservation Research, 4 (1): 131-135. <https://doi.org/10.30486/gcr.2020.1908691.1032>
- Gutiérrez-Marco, J.C., Loydell, D.K., Štorch, P., Frýda, J., 2024a. El Pintado (Geoparque Mundial de la UNESCO Sierra Morena de Sevilla), séptimo Estratotipo Global de Límite ubicado en España y primero de Andalucía (GSSP Telychiense, Llandover: Sistema Silúrico). *Geogaceta*, 76: 3-6. <https://doi.org/10.55407/geogaceta104708>
- Gutiérrez-Marco, J.C., Romero, S., Pereira, S., Štorch, P., 2024b. The Ordovician–Silurian boundary beds in the El Pintado section (Sierra Morena de Sevilla Global UNESCO Geopark, SW Spain). *Geologica Balcanica*, 53 (3): 37-43. <https://doi.org/10.52321/GeolBalc.53.3.37>
- Haberfelner, E., 1931. Eine Revision der Grapholithen der Sierra Morena (Spanien). Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft, 43: 19-66. [Traducido al español por B. Meléndez y M.R. Fernández en 1952: Revisión de los graptolitos de Sierra Morena. Publicaciones Extranjeras sobre Geología de España, 6: 41-105].
- Hafenrichter, M., 1979. Paläontologisch-ökologische und lithofazielle Untersuchungen des "Ashgill-Kalkes" (Jungordovizium) in Spanien. Arbeiten der Paläontologisches Institut Würzburg, 3, 139 p.
- Hafenrichter, M., 1980. The lower and upper boundary of the Ordovician system of some selected regions (Celtiberia, Eastern Ossa-Morena) in Spain. Part II: "The Ordovician-Silurian boundary in Spain". Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen, 160 (1): 138-148. <https://doi.org/10.1127/njgpa/160/1980/138>
- Henke, W., 1926. Beitrag zur Geologie der Sierra Morena nördlich von La Carolina (Jaén). Mit einer Palaeontologisch-stratigraphischer Beitrag von A. Born. Abhandlungen der senckenbergischen naturforschenden Gesellschaft, 39 (2): 199-204. [Traducido al español por B. Meléndez y M.R. Fernández en 1953: Aportación a la geología de Sierra Morena en la parte norte de "La Carolina" (Jaén). Con un informe paleontológico-estratigráfico por A. Born. Publicaciones Extranjeras sobre Geología de España, 7 (2): 71-99].
- Henke, W., Hundt, R., 1926. Bericht über einige Graptolithenfunde in der Sierra Morena. Abhandlungen der senckenbergischen naturforschenden Gesellschaft, 39 (2): 205-213. [Traducido al español por B. Meléndez y M.R. Fernández en 1952: Informe sobre algunos hallazgos de graptolitos en Sierra Morena. Publicaciones Extranjeras sobre Geología de España, 6: 27-39].
- Hernández-Sampelayo, P., 1926. Yacimientos de graptólidos en la zona de Almadén. Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural, 26 (8): 435-438.
- Hernández-Sampelayo, P., 1942. Explicación del Nuevo Mapa Geológico de España, Tomo II. El Sistema Siluriano. Memorias del Instituto Geológico y Minero de España, 45: 1-592 (fascículo 1), 595-848 (fascículo 2).
- Hernández-Sampelayo, P., 1960. Graptólidos españoles (Recopilado por Rafael Fernández Rubio). Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, 57: 3-78.
- Jaeger, H., 1991. Neue Standard-Graptolithenzonenfolge nach der 'Grossen Krise' an der Wenlock/Ludlow-Grenze (Silur). Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen, 182: 303-354. <https://doi.org/10.1127/njgpa/182/1991/303>
- Jones, H., Zalasiewicz, J., Rickards, B., 2002. Clingfilm preservation of spiraliform graptolites: Evidence of organically sealed Silurian seafloors. *Geology*, 30: 343-346. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<343:CPOSGE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<343:CPOSGE>2.0.CO;2)
- Julivert, M., Truyols, J., 1974. Nuevos datos sobre el Ordovícico del sinclinal de Guadarranque (Cáceres). *Breviora Geologica Asturica*, 18 (4): 57-61.
- Julivert, M., Fontboté, J.M., Ribeiro, A., Conde, L., 1980. Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares (Memoria). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. 113 p.
- Kappes, A., 1991. Erläuterungen zur Geologischen Kartierung des Gebietes N' Corral de Calatrava in der östlichen Sierra Morena (Zentral-Spanien). Diplomarbeit, Universität Würzburg, 144 p. (Inéd.).
- Kelch, H.J., 1957. Stratigraphie und Tektonik der zentralen Extremadura im Bereich der westlichen Sierra de San Pedro, Spanien. Dissertation der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, 116 p. (Inéd.). [Resúmenes publicados en: Münstersche Forschungen zur Geologie und Paläontologie, (Walter, Ed., 1977). 42: 6-9, Anlage 2 y en: Franz Lotze (1903-1971). The doctoral theses of his students in Spain and Portugal. Abridged versions, (J.F. von Raumer, Ed., 2008). Instituto Universitario de Geología "Isidro Parga Pondal". O Castro, serie Nova Terra, 36: 67-72].
- Kettel, D., 1968. Zur Geologie der östlichen Sierra Morena im

- Grenzbereich der Provinzen Jaén, Ciudad Real und Albacete (Spanien). *Münstersche Forschungen zur Geologie und Paläontologie*, 8: 1-159.
- Kindelán, J.A., 1955. Nota sobre la diferenciación del Ordoviciense de los Montes de Toledo. *Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España*, 37: 93-109.
- Kindelán, J., Cantos, J., Hernández-Pacheco, F., 1949. Mapa y Explicación de la Hoja N° 704 (Cáceres) del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (Primera Serie). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 68 p.
- Koren, T.N., Lenz, A.C., Loydell, D.K., Melchin, M.J., Štorch, P., Teller, L., 1996. Generalized graptolite zonal sequence defining Silurian time intervals for global palaeogeographic studies. *Lethaia*, 29: 59-60. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.1996.tb01837.x>
- Kříž, J., 2005. Telychian (Llandovery, Silurian) Bivalves from Spain. *Palaeontology*, 48 (3): 455-477. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4983.2005.00474.x>
- Kříž, J., Degardin, J.M., Ferretti, A., Hansch, W., Gutiérrez-Marco, J.C., Paris, F., Piçarra d'Almeida, J.M., Robardet, M., Schönlau, H.P., Serpagli, E., 2003. Silurian stratigraphy and paleogeography of Gondwanan and Perunican Europe. En: Silurian lands and seas. Paleogeography outside of Laurentia, (E. Landing y M.E. Johnson, Eds.). New York State Museum Bulletin, 493: 105-178.
- Kuss, H., 1878. Mémoire sur les Mines et Usines d'Almaden. *Annales des Mines* (7^a serie), 13: 39-151.
- Lauret, J., 1974. Recherches géologiques et minières dans la région d'Almaden-Almadenejos (Espagne). Inédit. Thèse 3ème cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay, 149 p.
- Lenz, A.C., Bates, D.E.B., Kozlowska, A., Maletz, J., 2023. Family Retiolitidae. En: Treatise on Invertebrate Paleontology, Part V, Hemichordata, Second Revision, including Enteropneusta, Pterobranchia (Graptolithina), (P.A. Selden y W.I. Ausich, Eds. y J. Maletz, Coord.). The University of Kansas, Paleontological Institute, Lawrence, Kansas, 387-417.
- Le Play, M.F., 1834. Observations sur l'Estramadure et le nord d'Andalousie, et essai d'une carte géologique de cette contrée. *Annales des Mines*, 3^a serie 5: 175-236.
- López Díaz, F., 1991. Características de la primera fase (distensiva) hercínica en la Sierra de San Pedro (Cáceres-Badajoz). *Cuadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 16: 53-63.
- Lorenzo, S., 2015. Bioestratigrafía del Silúrico de la Zona Centroibérica meridional (España). Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 605 p. (inédito)
- Lorenzo, S., Gutiérrez-Marco, J.C., 2009. Occurrence and 3D-preservation of Llandovery graptolites in the Criadero Quartzite of the Almadén mining district (Spain). En: Time and life in the Silurian: a multidisciplinary approach, (M.G. Corriga y S. Piras, Eds.). *Rendiconti della Società Paleontologica Italiana*, 3 (3): 311-312.
- Lorenzo, S., Gutiérrez-Marco, J.C., 2016. Las Reales Minas de Almadén (Ciudad Real) en la historia de la Geología y Paleontología españolas. *Geotemas*, 16 (2): 255-258. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.1944.55680>
- Lorenzo, S., Gutiérrez-Marco, J.C., 2024. El registro de filocáridos (Arthropoda, Malacostraca) en el Silúrico del centro-suroeste de la península Ibérica. En: Libro de Resúmenes 39 Jornadas de la Sociedad Española de Paleontología, (B. Moncunill-Solé, A. Blanco, A. Grandal d'Anglade, G. González-Fortes, L. Santos Fidalgo, R. Bao, Eds.). A Coruña. Palaeontological Publications, 5: 60.
- Lorenzo, S., Gutiérrez-Marco, J.C., Rábano, I., 2009. Silurian geoheritage of the Almadén Mining Park (central Spain). En: Time and life in the Silurian: a multidisciplinary approach, (M.G. Corriga y S. Piras, Eds.). *Rendiconti della Società Paleontologica Italiana*, 3 (3): 313-314.
- Lorenzo, S., Gutiérrez-Marco, J.C., Perrier, V., Serventi, P., 2020. Yacimientos paleontológicos del Silúrico superior de Hinojosa del Duque (provincia de Córdoba, Dominio de Obejo-Valsequillo, suroeste de España). *Geogaceta*, 67: 75-78.
- Loydell, D. K., 1994. Early Telychian changes in graptolite diversity and sea level. *Geological Journal*, 29: 355-368. <https://doi.org/10.1002/gj.3350290404>
- Loydell, D.K., 2012. Graptolite biozone correlation charts. *Geological Magazine*, 149 (1): 124-132. <https://doi.org/10.1017/S0016756811000513>
- Loydell, D.K., Männling, P., Nestor, V., 2003. Integrated biostratigraphy of the lower Silurian of the Aizpute-41 core, Latvia. *Geological Magazine*, 140: 205-229. <https://doi.org/10.1017/S0016756802007264>
- Loydell, D.K., Sarmiento, G.N., Štorch, P., Gutiérrez-Marco, J.C., 2009. Graptolite and conodont biostratigraphy of the upper Telychian-lower Sheinwoodian (Llandovery-Wenlock) strata, Jabalón river section, Corral de Calatrava, central Spain. *Geological Magazine*, 146: 187-198. <https://doi.org/10.1017/S0016756808005840>
- Loydell, D.K., Frýda, J., Gutiérrez-Marco, J.C., 2015. The Aeronian/Telychian (Llandovery, Silurian) boundary, with particular reference to sections around the El Pintado reservoir, Seville Province, Spain. *Bulletin of Geosciences*, 90 (4): 743-794. <https://doi.org/10.3140/bull.geosci.1564>
- Loydell, D.K., Gutiérrez-Marco, J.C., Štorch, P., 2023. The Sommerodde (Telychian, Silurian) positive carbon isotope excursion: why is its magnitude so variable?. *Journal of the Geological Society*, 180 (5), 11 p. <https://doi.org/10.1144/jgs2023-037>
- Loydell, D.K., Gutiérrez-Marco, J.C., Štorch, P., Frýda, J., 2025. The replacement Global Stratotype Section and Point (GSSP) of the Telychian Stage of the Llandovery Series, Silurian System, at El Pintado, Spain. *Episodes*, 48 (2): 199-211. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2025/025009>
- Lozac'h, Y., Vidal, M., 1976. Etude géologique de la terminaison occidentale de la vallée de l'Alcudia, province de Badajoz. Espagne. Thèse 3ème cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay, 160 p. (Inédito).
- Machens, E., 1954. Stratigraphie und Tektonik der südöstlichen Iberischen Meseta im Bereich des oberen Guadiana. Dissertation der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, 173 p. (Inédito). [Resúmenes publicados en: *Münstersche Forschungen zur Geologie und Paläontologie*, (Walter, Ed., 1977). 42: 37-39, Anlage 12 y en: Franz Lotze (1903-1971). The doctoral theses of his students in Spain and Portugal. Abridged versions, (J.F. von Raumer, Ed., 2008). Instituto Universitario de Geología "Isidro Parga Pondal". O Castro, serie Nova Terra, 36: 81-84].
- Malaise, C., 1897. Découverte de graptolithes à Almaden, province de Ciudad-Real, Espagne. *Bulletin de la Société Géologique de Belgique*, 24: 26.
- Maletz, J., 2023a. Biostratigraphy. En: Treatise on Invertebrate Paleontology, Part V, Hemichordata, Second Revision, including Enteropneusta, Pterobranchia (Graptolithina), (P.A. Selden y W.I. Ausich, Eds. y J. Maletz, Coord.). The University of Kansas, Paleontological Institute, Lawrence, Kansas, 103-117.
- Maletz, J., 2023b. Infraorder Neograptina. En: Treatise on Invertebrate Paleontology, Part V, Hemichordata, Second Revision, including Enteropneusta, Pterobranchia (Graptolithina), (P.A. Selden y W.I. Ausich, Eds. y J. Maletz, Coord.). The University of Kansas, Paleontological Institute, Lawrence, Kansas, 103-117.

- University of Kansas, Paleontological Institute, Lawrence, Kansas, 367-379.
- Maletz, J., 2023c. Graptolites – survival in the palaeozoic seas. *Historical Biology*, 36 (9): 1804-1814. <https://doi.org/10.1080/08912963.2023.2231975>
- Maletz, J., Loydell, D.K., 2023. Family Monograptidae. En: *Treatise on Invertebrate Paleontology*, Part V, Hemichordata, Second Revision, including Enteropneusta, Pterobranchia (Graptolithina), (P.A. Selden y W.I Ausich, Eds. y J. Maletz, Coord.). The University of Kansas, Paleontological Institute, Lawrence, Kansas, 427-459.
- Mallada, L., 1875a. Sinopsis de las especies fósiles que se han encontrado en España. Introducción. Terreno Paleozoico. Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España, 2: 1-160.
- Mallada, L., 1875b. Notas sobre la composición geológica de la provincia de Cáceres. *Anales de la Sociedad Española de Historia Natural*, 2 (Actas): 91-98.
- Mallada, L., 1884. Reconocimiento geológico de la provincia de Jaén. Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España, 11: 1-55.
- Manda, S., Slavík, L., Štorch, P., Tasáryová, Z., Čáp, P., 2023. Division of the Přídolí Series in Central Bohemia: graptolite and conodont biostratigraphy, faunal changes, and geochemical record. *Newsletters on Stratigraphy*, 56 (1): 89-123. <https://dx.doi.org/10.1127/nos/2022/0695>
- Márquez Triguero, E., 1961. Estratigrafía del Paleozoico en la región del río Guadalmez: aportación a la geología de Sierra Morena en la parte norte del Valle de los Pedroches. *Estudios Geológicos*, 17: 187-201.
- Martín Parra, L.M., González Lodeiro, F., Martínez Poyatos, D., Matas, J., 2006. The Puente Génave-Castelo de Vide Shear Zone (southern Central Iberian Zone, Iberian Massif): geometry, kinematics and regional implications. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 177 (4): 191-202. <https://doi.org/10.2113/gssgbull.177.4.191>
- Martínez Catalán, J.R., Martínez Poyatos, D., Bea, F., 2004. Zona Centroibérica. Introducción. En: *Geología de España*, (J.A. Vera, Ed.). Sociedad Geológica de España e Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 68-69.
- Martínez Poyatos, D.J., 2002. Estructura del borde meridional de la Zona Centroibérica y su relación con el contacto entre las zonas Centroibérica y de Ossa-Morena. Ediciós do Castro, A Coruña, serie Nova Terra, 18, 295 p. <https://hdl.handle.net/10481/28660>
- Martínez Poyatos, D., Díez Balda, M.A., Mavaya, J., González Lodeiro, F., Martínez Catalán, J.R., Vegas, R., 2004a. El acortamiento varisco inicial (Dominio del Complejo Esquisto-grauváquico, Estructura). En: *Geología de España*, (J.A. Vera, Ed.). Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 84-87.
- Martínez Poyatos, D., Gutiérrez-Marco, J.C., Pardo Alonso, M.V., Rábano, I., Sarmiento G., 2004b. La secuencia paleozoica postcámbrica (Dominio del Complejo Esquisto-grauváquico, Estratigrafía). En: *Geología de España*, (J.A. Vera, Ed.). Sociedad Geológica de España e Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 81-83.
- Melchin, M.J., Sadler, P.M., Cramer, B.D., 2020. The Silurian Period. En: *Geologic Time Scale 2020*, vol. 2, (F.M. Gradstein, J.G. Ogg y A.G. Smith, Eds.). Elsevier, Amsterdam, 695-732. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824360-2.00021-8>
- Menéndez, S., Rábano, I., 2010. Fósiles de Extremadura en la colección paleontológica histórica del Museo Geominero (Instituto Geológico y Minero de España, Madrid): catálogo y puesta en valor. *Boletín Geológico y Minero*, 121 (2): 169-178.
- Palacios Medrano, T., Jensen, S., Eguiluz, L., Apalategui, O., Martí Mus, M., Martínez-Torres, L.M., Carracedo, M., Gil Ibarguchi, J.I., Sarriónandia, F., Lobo, P.J., Junguitu, I., 2010. Mapa y memoria del Mapa Geológico de Extremadura a escala 1:250.000. Consejería de Industria, Energía y Medio Ambiente, Junta de Extremadura. Mérida, 218 p.
- Palero Fernández, F., 1991. Evolución geotectónica y yacimientos minerales de la región del valle de Alcudia (Sector Meridional de la Zona Centroibérica). Tesis Doctoral, Univ. Salamanca, 827 p.
- Palero Fernández, F., 1992. La sucesión paleozoica y estructura del sinclinal de Solana del Pino. *Estudios Geológicos*, 48 (5-6): 341-352. <https://doi.org/10.3989/egeol.92485-6401>
- Pardo Alonso, M.V., 1997. Geología del Devónico meridional de la Zona Centroibérica. Tesis Doctoral, Univ. Oviedo, 472 p. (inédita).
- Pardo Alonso, M.V., 1998. Update on the Silurian-Devonian transition in the Almadén area, Central-Iberian Zone, Spain. En: *Proceedings Sixth International Graptolite Conference & 1998 Field Meeting of the IUGS Subcommission on Silurian Stratigraphy*, (J.C. Gutiérrez-Marco y I. Rábano, Eds.). Temas Geológico-Mineros ITGE, 23: 110-114.
- Pardo Alonso, M.V., García-Alcalde, J.L., 1996. El Devónico de la Zona Centroibérica. *Revista Española de Paleontología*. N° extraordinario en homenaje a J. Truyols, 72-81. <https://doi.org/10.7203/sjp.23927>
- Péran, M., 1971. Contribution à l'étude de la géologie de la région de Venta de los Santos (Jaén), Espagne. Thèse 3ème cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay, 73 p.
- Perrier, V., Perrichon, G., Nesme, F., Groos-Uffenorde, H., Lorenzo, S., Gutiérrez-Marco, J.C., 2023. Ecologically distinct myodocope ostracod faunas from a single horizon in the late Silurian of Spain. *Revue de Micropaléontologie*, 80, 16 p. <https://doi.org/10.1016/j.revmic.2023.100729>
- Philippot, A., 1950. Les Graptolites du Massif Armoricain, Étude Stratigraphique et Paléontologique. *Mémoires de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne*, 8: 1-295.
- Philippot, A. y Riba, O., 1952. Sur la faune graptolitique de la Sierra d'Albarracín (Chaîne Ibérique). *Comptes Rendus Sommaires des Séances de la Société Géologique de France*, 1952(5): 74-75.
- Pieren Pidal, A., 1985. Estudio estratigráfico de los materiales anteordovícicos del anticlinorio de Agudo-Valdemanco y de los materiales paleozoicos del sinclinal de Herrera del Duque. Tesis de Licenciatura, Univ. Complutense de Madrid, 225 p. (inédito).
- Pieren Pidal, A., 1986. Mobilité du bassin sedimentaire au Silurien inférieur dans le synclinal de Herrera del Duque (Badajoz, España). *Comptes Rendus 11ème Réunion Annuel des Sciences de la Terre*, Clermont-Ferrand, 1: 148.
- Pieren Pidal, A., Gutiérrez-Marco, J.C., 1990. Datos bioestratigráficos de los materiales silúricos del sinclinal de Herrera del Duque (Badajoz). *Geogaceta*, 8: 58-61.
- Portero García, J.M., Dabrio González, C., 1988. Evolución tectosedimentaria del Ordovícico y el Silúrico de los Montes de Toledo meridionales y Campo de Calatrava. *Comunicaciones del II Congreso Geológico de España*, Granada, 1: 161-164.
- Poupon, G., 1971. Contribution à l'étude géologique de la région d'Aldeaquemada (Jaén) Espagne. Thèse 3ème cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay, 60 p. (Inédito).
- Prado, C. de, 1855. Mémoire sur la Géologie d'Almaden, d'une partie de la Sierra Morena et des Montagnes de Tolède. *Bulletin de la Société Géologique de France* (2^a série), 12: 182-204.

- Prost-Dame, V., 1980. Géologie et gitologie de la région de Castuera, Province de Badajoz (Espagne). Thèse 3ème cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay, 288 p. (Inédito).
- Puschmann, H., 1967. Das Paläozoikum im gebiet zwischen San Benito und Torrecampo (Sierra Morena/Spanien). *Geologie en Mijnbouw*, 46 (11): 383-391.
- Puschmann, H., 1970. Das Paläozikum der nördlichen Sierra Morena am Beispiel der Mulde von Herrera del Duque (Spanien). *Geologie*, 19 (3): 309-329.
- Quesada, C., Oliveira, J.T. (Eds.), 2019. The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach, Volume 2 – The Variscan Cycle (J.F. Simancas, Coord.). *Regional Geology Reviews*, Springer, 544 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-10519-8>
- Rábano, I., Paris, F., Gutiérrez-Marco, J.C., Robardet, M., Rodríguez Núñez, V.M., 1989. Restos de grandes euryptéridos (Arthropoda, Chelicerata) en las facies ampelíticas del Silúrico ibero-armoricano (SO de Europa). Resúmenes V Jornadas de Paleontología. Universitat de València, 121-123.
- Ransweiler, M., 1968. Stratigraphie und Tektonik der Extremadura im Bereich der Orte Herrera del Duque, Helechosa und Villarta de los Montes (Mittelspanien). Dissertation der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, 100 p. (Inédito). [Resúmenes publicados en: Münstersche Forschungen zur Geologie und Paläontologie, (Walter, Ed., 1977), 42: 26-28, Anlage 9 y en: Franz Lotze (1903-1971). The doctoral theses of his students in Spain and Portugal. Abridged versions, (J.F. von Raumer, Ed., 2008). Instituto Universitario de Geología “Isidro Parga Pondal”. O Castro, serie Nova Terra, 36: 107-110].
- Ramírez y Ramírez, E., 1955. El sinclinal de Guadarranque (Cáceres). Contribución al estudio de la estratigrafía del Silúrico hispano. *Estudios Geológicos*, 11: 409-436.
- Raumer, J.F. von (Ed.), 2008. Franz Lotze (1903-1971). The doctoral theses of his students in Spain and Portugal. Abridged versions. Instituto Universitario de Geología “Isidro Parga Pondal”. O Castro, serie Nova Terra, 36: 1-307.
- Redlin, K., 1955. Stratigraphie und Tektonik in der mittleren Sierra Morena im Bereich des Valle de Alcudia (Spanien). Dissertation der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, 192 p. (Inédito). [Resúmenes publicados en: Münstersche Forschungen zur Geologie und Paläontologie, (Walter, Ed., 1977), 42: 40-42, Anlage 13 y en: Franz Lotze (1903-1971). The doctoral theses of his students in Spain and Portugal. Abridged versions, (J.F. von Raumer, Ed., 2008). Instituto Universitario de Geología “Isidro Parga Pondal”. O Castro, serie Nova Terra, 36: 117-122].
- Reguant, S., Ortiz, R., 2001. Guía Estratigráfica Internacional. Versión abreviada. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13 (3-4): 271-293.
- Rey, J., Hidalgo, M.C., Martínez-López, J., 2005. Upper Ordovician–Lower Silurian transgressive-regressive cycles of the Central Iberian Zone (NE Jaén, Spain). *Geological Journal*, 40: 477-495. <https://doi.org/10.1002/gj.1022>
- Richter, P., 1967. Stratigraphie und Tektonik in der Sierra de San Andrés (östliche Sierra Morena/Spanien). *Münstersche Forschungen zur Geologie und Paläontologie*, 3: 1-144.
- Ríos Aragüés, S., 1978. Evolución tectónica y guías de prospección en el distrito filoniano plumbífero de la Carolina-Santa Elena (Sierra Morena oriental, Jaén, España). *Boletín Geológico y Minero*, 89 (6): 550-561.
- Robardet, M., 2002. Alternative approach to the Variscan Belt in southwestern Europe: Preorogenic paleobiogeographical constraints. En: *Variscan-Appalachian dynamics: The building of the late Paleozoic basement*, (J.R. Martínez Catalán, R.D. Hatcher, F. Arenas, F. Díaz García, Eds.). Geological Society of America Special Paper 364: 1-15. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2364-7.1>
- Robardet, M., 2003. The Armorica “microplate”: fact or fiction? Critical review of the concept and contradictory palaeobiogeographical data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology*, 195: 125-148. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00305-5](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00305-5)
- Robardet, M., Gutiérrez-Marco, J.C., 2002. Silurian. En: *The Geology of Spain*, (W. Gibbons y T. Moreno, Eds.). The Geological Society, London, 51-66. <https://doi.org/10.1144/GOSPP>
- Robardet, M., Vegas R., Paris, F., 1980. El techo del Ordovícico en el centro de la Península Ibérica. *Studia Geologica Salmanticensia*, 16: 103-121.
- Rodríguez Núñez, V.M., 1989. Los materiales silúricos del sinclinal de Guadarranque (provincias de Cáceres, Badajoz y Ciudad Real). Tesis de Licenciatura. Univ. Complutense, Madrid, 198 p. (inédito).
- Rodríguez Núñez, V.M., Gutiérrez-Marco, J.C., Sarmiento, G.N., 1989. Rasgos bioestratigráficos de la sucesión silúrica del sinclinal de Guadarranque (provincias de Cáceres, Badajoz y Ciudad Real). *Coloquios Paleontología*, 42: 83-106.
- Romariz, C., Arche, A., Barba, A., Gutiérrez Elorza, M., Vegas, R., 1971. The mediterranean graptolitic fauna of the Wenlockian in the Iberian Peninsula. *Boletim da Sociedade Geológica de Portugal*, 18: 57-61.
- Sáenz García, C., 1947. Notas y datos de estratigrafía española. 35. Importantes yacimientos fosilíferos del Silúrico de Cáceres. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 45: 383-386.
- Salvador, A. (Ed.), 1994. International stratigraphic guide. A guide to stratigraphic classification, terminology, and procedure. Second Edition. International Subcommission on Stratigraphic Classification of IUGS International Commission on Stratigraphy. The Geological Society of America, Boulder, xvi + 214 p.
- Sarmiento, G.N., Rodríguez Núñez, V.M., 1991. Conodontos tel-ychienses (Silúrico inferior) del Sinclinal de Guadarranque (Zona Centroibérica, Macizo Hespérico). *Revista Española de Paleontología*, Nº Extraordinario, 151-156. <https://doi.org/10.7203/sjp.25112>
- Saupé, F., 1971a. Stratigraphie et pétrographie du “Quartzite du Criadero” (Valentien) à Almaden (Province de Ciudad Real, Espagne). *Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, 73: 139-147.
- Saupé, F., 1971b. La série ordovicienne et silurienne d’Almaden (Province de Ciudad Real, Espagne). Point des connaissances actuelles. *Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, 73: 355-365.
- Saupé, F., 1973. La géologie du gisement de mercure d’Almadén (Province de Ciudad Real, Espagne). Thèse Docteur ès-Sciences, Univ. Nancy I. Sciences de la Terre, Mémoire 29, 342 p.
- Schmidt, H.J., 1957. Stratigraphie und Tektonik der nördlichen Extremadura im Bereich der Flüsse Tajo und Alagón, Spanien. Dissertation der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, 116 p. (Inédito). [Resúmenes publicados en: Münstersche Forschungen zur Geologie und Paläontologie, (Walter, Ed., 1977), 42: 3-5, Anlage 1 y en: Franz Lotze (1903-1971). The doctoral theses of his students in Spain and Portugal. Abridged versions, (J.F. von Raumer Ed., 2008). Instituto Universitario de Geología “Isidro Parga Pondal”. O Castro, serie Nova Terra, 36: 141-144].

- Soldevila, J., 1983. Estudio geológico-estructural de la terminación occidental del sinclinal de Almadén. Boletín Geológico y Minero de España, 94 (2): 93-105.
- Soldevila, J., 1992. La sucesión paleozoica en el sinform de la Sierra de San Pedro (provincias de Cáceres y Badajoz, SO de España). Estudios Geológicos, 48 (5-6): 363-379. <https://doi.org/10.3989/egeol.92485-6403>
- Sos Baynat, V., 1955. Geología y morfología de las sierras de las Villuercas (Cáceres). Estudios Geográficos, 16 (61): 689-746.
- Štorch, P., 1994. Graptolite biostratigraphy of the Lower Silurian (Llandovery and Wenlock) of Bohemia. Geological Journal, 29: 137-165. <https://doi.org/10.1002/gj.3350290204>
- Štorch, P., 1995a. Upper Silurian (upper Ludlow) graptolites of the *N. inexpectatus* and *N. kozlowskii* biozones from Kosov Quarry near Beroun (Barrandian area, Bohemia). Bulletin of the Czech Geological Survey, 70 (4): 65-90. <https://hdl.handle.net/11104/0041742>
- Štorch, P., 1995b. Biotic crises and post-crisis recoveries recorded by Silurian planktonic graptolite faunas of the Barrandian area (Czech Republic). Geolines, 3: 59-70. <https://hdl.handle.net/11104/0041769>
- Štorch, P., 1998a. Biostratigraphy palaeobiogeographical links and environmental interpretation of the Llandovery and Wenlock graptolite faunas of peri-Gondwanan Europe. En: Proceedings Sixth International Graptolite Conference & 1998 Field Meeting of the IUGS Subcommission on Silurian Stratigraphy, (J.C. Gutiérrez-Marco y I. Rábano, Eds.). Temas Geológico-Mineros ITGE, 23: 126-129.
- Štorch, P., 1998b. New data on Telychian (Upper Llandovery, Silurian) graptolites from Spain. Journal of the Czech Geological Society, 43 (3): 113-141.
- Štorch, P., 1998c. Graptolites of the *Pribylograptus leptotheca* and *Lituigraptus convolutus* biozones of Tmaň (Silurian, Czech Republic). Journal of the Czech Geological Society, 43 (4): 209-272.
- Štorch, P., 2023. Graptolite biostratigraphy and biodiversity dynamics in the Silurian System of the Prague Synform (Barrandian area, Czech Republic). Bulletin of Geosciences, 98 (1): 1-78. <https://doi.org/10.3140/bull.geosci.1862>
- Štorch, P., Gutiérrez-Marco, J.C., Sarmiento, G.N., Rábano, I., 1998. Upper Ordovician and Lower Silurian of Corral de Calatrava, southern part of the Central Iberian Zone. En: Proceedings Sixth International Graptolite Conference & 1998 Field Meeting of the IUGS Subcommission on Silurian Stratigraphy, (J.C. Gutiérrez-Marco y I. Rábano, Eds.). Temas Geológico-Mineros ITGE, 23: 319-325.
- Štorch, P., Manda, Š., Loydell, D.K., 2014. The Early Ludfordian *leintwardinensis* graptolite Event and the Gorstian-Ludfordian boundary in Bohemia (Silurian, Czech Republic). Palaeontology, 57 (5): 1003-1043. <https://doi.org/10.1111/pala.12099>
- Štorch, P., Loydell, D.K., Melchin, M.J., Goldman, D., 2025. Graptolites in biostratigraphy: the primary tool for subdivisions and correlations of Ordovician, Silurian, and Lower Devonian offshore marine successions. Newsletters on Stratigraphy, 58. <https://doi.org/10.1127/nos/2024/0810>
- Strossová, Z., 2024. Lower Telychian (Silurian) species of *Parapetalolithus* from the *linnaei*, *turriculatus* and *crispus* bio-zones in the Prague Synform: taxonomy in the lights of astogeny and intraspecific variability. Bulletin of Geosciences, 99 (1): 43-71. <https://doi.org/10.3140/bull.geosci.1889>
- Strossová, Z., Kovář, V., Štorch, P., 2024. Qualitative and quantitative analysis of the graptolite assemblage in the *linnaei* Biozone (Silurian, lowermost Telychian) at Želkovice, Prague Synform (Czech Republic). Palaeontologia Electronica, 27 (3): a58. <https://doi.org/10.26879/1425>
- Tamain, G., 1964. Mise en évidence de mouvements taconiques dans le Sud-Est de la Sierra Morena (Espagne). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série D, 258: 977-979.
- Tamain, G., 1971. L'Ordovicien est-marienque (Espagne). Sa place dans la province méditerranéenne. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 73: 403-416.
- Torsvik, H.T., Cocks, L.R.M., 2017. Earth history and paleogeography. Cambridge University Press, Cambridge, 317 p. <https://doi.org/10.1017/9781316225523>
- Truyols, J., Julivert, M., 1983. El Silúrico en el Macizo Ibérico. En: Libro Jubilar José María Ríos, Geología de España, (J.A. Comba, Coord.). IGME, Madrid, 1: 246-265.
- Vera, J.A. (Ed.), 2004. Geología de España. Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 884 p.
- Verneuil, E. de, Barrande, J., 1855. Description des fossiles trouvés dans les terrains silurien et dévonien d'Almaden, d'une partie de la Sierra Morena et des Montagnes de Tolède. Bulletin de la Société Géologique de France (2), 12: 964-1025.
- Villas, E., Lorenzo, S., Gutiérrez-Marco, J.C., 1999. First record of a Hirnantia Fauna from Spain, and its contribution to the Late Ordovician palaeogeography of northern Gondwana. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 89: 187-197. <https://doi.org/10.1017/S0263593300007124>
- Walter, R. (Ed.), 1977. Zwei geologische Traversen durch die südliche Iberische Meseta, Spanien. Mit Beiträgen von W. Assmann, H.-G. Bochmann, R. Höllinger, H. Kalthoff, H.-J. Kelch, L. Laus, R. Maass, E. Machens, R. Merten, M. Ransweiler, K. Redlin, H.-J. Schmidt, O. Suhr und K. Weggen. Münstersche Forschungen zur Geologie und Paläontologie, 42, 55 p.
- Zalasiewicz, J.A., Taylor, L., Rushton, A.W.A., Loydell, D.K., Rickards, R.B., Williams, M., 2009. Graptolites in British stratigraphy. Geological Magazine, 146: 785-850. <https://doi.org/10.1017/S0016756809990434>

APÉNDICE 1. Situación de las localidades con graptolitos citadas en el texto. Los números corresponden a la representación de cada una de ellas en la Figura 2.

- 1. Sección del sur del puerto de San Vicente (Llandovery), sinclinal de Guadarranque-Gualija. A 9 km al noreste de Alía (Cáceres)
- 2. Sección del arroyo de La Colada (Llandovery-Wenlock), sinclinal de Herrera del Duque. A 3 km al sur de Herrera del Duque (Badajoz)
- 3. Localidad Valdecaballeros (Llandovery), sinclinal de Herrera del Duque. Se sitúa a unos 8 km al suroeste de Valdecaballeros (Badajoz)
- 4. Sección del río Jabalón (Llandovery-Wenlock), sinclinal de Corral de Calatrava. A 4 km al noreste de esta última localidad.
- 5. Sección de la confluencia de los ríos Guadiana-Jabalón (Llandovery), sinclinal de Corral de Calatrava. Está a unos 1.000 m al este de dicha confluencia y a 4,5 km al norte de Corral de Calatrava (Ciudad Real).
- 6. Sección de Puente Morena (Llandovery-Wenlock), sinclinal de Corral de Calatrava. A 5,5 km al noreste de Corral de Calatrava (Ciudad Real).
- 7. Localidades de Almadenejos (Llandovery-Wenlock), sinclinal de Almadén. A 500 m al este-sureste de Almadenejos (Ciudad Real).

- 8. Sección del arroyo Avilero (Wenlock), sinclinal de Almadén. A 4 km al este de Almadén (Ciudad Real).
- 9. Sección del arroyo del Lápiz (Llandovery), sinclinal de Almadén. Está a unos 10 km al noreste de Almadén (Ciudad Real).
- 10. Localidad Casa del Pielero (Wenlock), sinclinal de Almadén. A unos 9,5 km al noreste de Almadén (Ciudad Real)
- 11. Localidad Loc. 4, sección de la Ribera del arroyo de Gargantiel (Wenlock), sinclinal de Almadén. A unos 350 m al norte de Gargantiel (Ciudad Real).
- 12. Localidad Al-193 (Llandovery), sinclinal de Almadén. Está a menos de 500 m al oeste de Almadén (Ciudad Real).
- 13. Localidades de Valdeazogues (Llandovery?-Wenlock), sinclinal de Valdeazogues-Puertollano. Se sitúa a 1 km aproximadamente al noroeste del pueblo de Valdeazogues (Ciudad Real).
- 14. Sección de Retamar (Llandovery-Wenlock), sinclinal de Valdeazogues-Puertollano. En la circunvalación de Retamar, a unos 8 km al oeste de Puertollano (Ciudad Real).
- 15. Localidades de Ojailén-Brazartotas (Llandovery), sinclinal de Valdeazogues-Puertollano. A 500 m al norte de Brazartotas (Ciudad Real).
- 16. Localidad Cañada de Cantojincado (Llandovery), sinclinal de Valdeazogues-Puertollano. A unos 2 km al sureste de La Alameda (Ciudad Real).
- 17. Secciones de la estación de Chillón (Llandovery-Wenlock), sinclinal de Guadalmez. Están a unos 9 km al sur de Chillón (Ciudad Real) y a 7 km al sur-suroeste de Almadén (Ciudad Real).
- 18. Sección de Guadalmez norte (Llandovery), sinclinal de Guadalmez. Está a unos 3 km al nor-noroeste del pueblo de Guadalmez (Ciudad Real).
- 19. Localidad Estación de Belalcázar (Llandovery), sinclinal de Guadalmez. A unos 8 km al oeste de Guadalmez (Ciudad Real).
- 20. Localidad GM-H (Llandovery), sinclinal de Guadalmez. Próximo al anterior, a casi 1 km al norte.
- 21. Localidad D3 (Llandovery), sinclinal de Guadalmez. A 8 km al oeste-noroeste de Guadalmez (Ciudad Real).
- 22. Localidad GM GRE (Llandovery), sinclinal de Guadalmez. 5 km al SSE de Guadalmez (Ciudad Real)
- 23. Localidad Cantera del Molinillo (Llandovery), sinclinal de Guadalmez. Está a 5 km al sur de Capilla (Badajoz).
- 24. Sección de Puente Quebrada (Llandovery-Ludlow), flanco norte del sinclinorio de Los Pedroches. Está a 7 km al suroeste de San Benito (Ciudad Real).
- 25. Localidades GM PO (Llandovery), flanco norte del sinclinorio de Los Pedroches. A 6,5 km al norte de Santa Eufemia (Córdoba).
- 26. Localidades GM EU (Llandovery-Wenlock), flanco norte del sinclinorio de Los Pedroches. Están a menos de un kilómetro al este de Santa Eufemia (Córdoba).
- 27. Localidades de El Centenillo (Llandovery), flanco norte del sinclinorio de Los Pedroches. A unos 9 km al oeste-noroeste de El Centenillo (Jaén).
- 28. Localidades 9803, 9805, 9807 de la hoja nº 862 del MAGNA (Llandovery), flanco norte del sinclinorio de Los Pedroches. Están a unos 6 km al oeste-noroeste de El Centenillo (Jaén).
- 29. Mina de Almadén (Llandovery), sinclinal de Almadén. Interior de la mina subterránea de Almadén (Ciudad Real), en la cota 87 sobre la planta 14 (galería de cabeza del “Macizo de la Rampa”, aprox. -320 m).
- 30. Localidad 863 Vilches (Llandovery), flanco norte del sinclinorio de Los Pedroches. A unos 14,5 km al noroeste de Santisteban del Puerto (Jaén) y a 21 km al noreste de Vilches (Jaén).
- 31. Localidad Los Toriles, flanco norte del sinclinal de Almadén. A unos 11 km al noreste de Almadén (Ciudad Real).

MANUSCRITO RECIBIDO: 04-06-2025

REVISIÓN RECIBIDA: 16-07-2025

ACEPTACIÓN DEL MANUSCRITO REVISADO: 19-11-2025

REVISORES Y REVISORAS DEL VOLUMEN 38, NÚMEROS 1 Y 2 (AÑO 2025)***REVIEWERS OF VOLUME 38, ISSUES 1 AND 2 (2025 YEAR)***

La Revista de la Sociedad Geológica de España agradece a las personas que han participado en la revisión de los trabajos que componen los dos números del Volumen 38 su esfuerzo y dedicación en la revisión de los manuscritos encomendados. Su trabajo ha mejorado indudablemente la calidad de la Revista.

Adolfo Maestro González (Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC)

Andrés Folguera (Universidad de Buenos Aires)

Brais Currás Refojos (Centro de Ciencias Humanas y Sociales, CCHS-CSIC)

Carlos Odriozola Lloret (Universidad de Sevilla)

Darío Chinchilla Benavides (Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC)

David González Álvarez (Instituto de Ciencias del Patrimonio, INCIPIT-CSIC)

Emmanuelle Meunier (Archeodunum Investigations Archéologiques, Francia)

Enrique Cerrillo Cuenca (Universidad Complutense de Madrid)

Enrique Peñalver Mollá (Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC)

Fernando Enrique López (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET)

Ildefonso Armenteros Armenteros (Universidad de Salamanca)

Francisco Javier Sánchez-Palencia Ramos (Instituto de Historia, IH-CSIC)

Juan Diego Martín Martín (Universidad de Barcelona)

Julio Garrote Revilla (Universidad Complutense de Madrid)

Lorena Ortega (Universidad Complutense de Madrid)

Margarita Fernández Mier (Universidad de Oviedo)

Pablo Arias Cabal (Universidad de Cantabria)

Pablo Gabriel Silva Barroso (Universidad de Salamanca)

Pedro Martínez Pagán (Universidad Politécnica de Cartagena)

Rodolfo Gozalo Gutiérrez (Universidad de Valencia)

Salvador Domínguez Bella (Universidad de Cádiz)

Santos Barrios Sánchez (Universidad de Salamanca)

Yolanda Peña Cervantes (Universidad Nacional de Educación a Distancia, UNED)

AUTORES Y AUTORAS DEL VOLUMEN 38, NÚMEROS 1 Y 2 (AÑO 2025)***AUTHORS OF VOLUME 38, ISSUES 1 AND 2 (2025 YEAR)***

Aitor Hevia-Carrillo (Universidad Nacional de Educación a Distancia, UNED)
Andrés Díez Herrero (Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC)
Carlos Camuñas Palencia (Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC)
Carlos Pascual-Arribas (Investigador independiente de España)
Carmen Pro Muñoz (Universidad de Extremadura)
David Álvarez-Alonso (Universidad Complutense de Madrid)
Elia Quirós Rosado (Universidad de Extremadura)
Félix Pérez-Lorente (Universidad de La Rioja)
Isabel María Sánchez Ramos (Universidad Pablo de Olavide)
Isabel Rábano (Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC)
Jaime Bonachea Pico (Universidad de Cantabria)
Javier Fernández Lozano (Universidad de León)
Jesús F. Jordá Pardo (Universidad Nacional de Educación a Distancia, UNED)
Jongyun Jung (Chonnam National University, República de Korea)
José María Vázquez-Rodríguez (Universidad Nacional de Educación a Distancia, UNED)
Juan Carlos Gutiérrez-Marco (Instituto de Geociencias, IGEO-CSIC-UCM)
Juan R. Bahamonde (Universidad de Oviedo)
Mª Ángeles Perucha Atienza (Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC)
María de Andrés-Herrero (Universidad Complutense de Madrid)
María Teresa de Tena Rey (Universidad de Extremadura)
Miguel Ángel Rodríguez-Pascua (Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC)
Miguel Herrera Durán (Investigador independiente de España)
Moussa Masrour (Université Ibn Zohr, Marruecos)
Nieves Hernández-Medrano (Investigadora independiente de España)
Pilar Carral González (Universidad Autónoma de Madrid)
Roberto Matías Rodríguez (Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero, SEDPGYM)
Rodrigo Andrés Bercianos (Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC)
Saturnino Lorenzo (Universidad de Castilla La Mancha)
Victorino Mayoral Herrera (Instituto de Arqueología de Mérida, IAM-CSIC)

NORMAS DE PUBLICACIÓN EN LA REVISTA DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

La Revista de la Sociedad Geológica de España es una **publicación semestral de acceso abierto** de la Sociedad Geológica de España que da cabida a trabajos de investigación científica, en español o en inglés, en relación con cualquier área de las Ciencias de la Tierra. Los trabajos de geología de la Península Ibérica y áreas próximas son particularmente bienvenidos, además de los relacionados con la Historia de la Geología, el Patrimonio Geológico, y temáticas similares. Los trabajos de revisión o recopilación de información de temas específicos con una perspectiva científica actualizada, también serán valorados para su posible publicación en la revista. Los trabajos deberán ser originales, es decir, no publicados (o no aceptados) en otra revista, sea íntegramente o por partes y/o en otro idioma. Todos los artículos serán revisados, al menos, por dos especialistas y por el Comité Editorial.

PREPARACIÓN DEL MANUSCRITO

Organización del texto

El texto se elaborará siguiendo la Plantilla RSGE (formato DOC), disponible <https://recyt.fecyt.es/index.php/RevSocGeoEsp/index>. El texto seguirá este orden: 1) Título en español e inglés. 2) Nombre y apellidos de autores/as. 3) Dirección postal y electrónica completa de autores/as. 4) Resumen en español e inglés, de 200 palabras para el idioma del manuscrito, de 400 en el segundo idioma. 5) Palabras clave (3 a 5, en español y en inglés). 6) Título corto para el encabezamiento, en el idioma del manuscrito. 7) Texto principal. Los encabezamientos del texto principal se ordenarán jerárquicamente en tres tipos, sin numeración alguna: **Apartado**, **Subapartado de primer orden** y **Subapartado de segundo orden**, con punto y seguido el texto. En el texto, se incluirán sólo citas de trabajos publicados o en prensa, con el apellido de autores/as y año de publicación en orden cronológico (ej., Pérez, 2004; Mateos y Jiménez, 2007; Teixell *et al.*, 2007). Las figuras y tablas se indicarán de forma correlativa (ej., Fig. 1, Fig. 2, Figs. 3-5, Tabla 1, Tabla 2...etc.). 8) Agradecimientos y financiación. Se citarán los agradecimientos personales y a las personas que han revisado el trabajo. Además, es necesario indicar las fuentes de financiación del estudio. 9) Contribución de autores/as. Se especificará, en un párrafo corto, la contribución individual de cada persona. 110) Referencias. Deberán ir ordenadas alfabéticamente por el apellido de autores/as y cronológicamente, en el caso de que se repitan. Deberán indicarse las referencias que dispongan de DOI con un enlace tipo [https://doi.org/...](https://doi.org/) (según los ejemplos indicados abajo). 11) Pies de figuras y tablas.

Arce Durante, J.M., Fernández Tomas, J., Monteserín López, V., 1977. Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 24 (Mondoñedo). IGME, Madrid.

Díaz Martínez, E., 1988. El Cretácico Inferior del sector de Jubera (norte de la Sierra de Los Cameros, La Rioja). II Congreso Geológico de España, Comunicaciones, 1: 67-70.

Lobo, F.J., Hernández-Molina, F.J., Somoza, L., Díaz del Río, V., 2001. The sedimentary record of the post-glacial transgression on the Gulf of Cadiz continental shelf (Southwest Spain). Marine Geology, 178: 171-195. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00176-1](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00176-1)

Ortega Gironés, E., Gil Ibarguchi, J.I., 1983. La Unidad de Malpica-Tuy. En: Libro jubilar, J.M. Ríos. Geología de España, Tomo I, (J. Comba, Ed.). IGME, Madrid, 430-440.

Parra, J., 2001. Análisis paleoambiental de los sistemas continentales y el vulcanismo asociado del Neógeno del Valle del Cajón en los Andes Occidentales (Catamarca, República Argentina). Tesis Doctoral, Univ. Huelva, 272 p.

Woodroffe, C.D., 2002. Coasts. Cambridge University Press, New York, 623 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316036518>

Figuras y tablas

Para el diseño de tablas y figuras (incluyendo dibujos y fotografías) se tendrá en cuenta el tamaño de caja de la revista (248 x 170 mm). Las figuras y tablas pueden ocupar la anchura de una columna (82 mm) o de una página (170 mm). Las tablas irán en formato DOC. El tamaño de letra deberá ser como mínimo de 7 ptos. y la anchura de línea oscilará entre 0,3 y 1,5 ptos. Las partes de una figura se denominarán con letras mayúsculas (A, B, C, etc.). Los dibujos deben tener una buena calidad en cuanto a tramas, tonos de grises y leyendas. Las fotografías deben ser claramente visibles, tener contraste suficiente y acabado brillante, y deben contener escalas u objetos que sirvan de referencia.

Extensión del manuscrito

Como norma general, la extensión del manuscrito, incluyendo texto y espacio equivalente de figuras y tablas, no podrá exceder 20 páginas. Una página de la Plantilla RSGE (en fuente Times New Roman 10, a espacio simple) equivale a unas 1000 palabras aproximadamente.

ENVÍO Y REVISIÓN DEL MANUSCRITO

El manuscrito será enviado electrónicamente a la Editora Principal (Nieves López-González) a través de la plataforma de Envío de Artículos en <https://sociedadgeologica.org/publicaciones/revista-sge> en 2 documentos: 1) el texto en formato DOC (*Plantilla RSGE*), y 2) las figuras y tablas en un documento PDF y numeradas correlativamente. En la plantilla, se deberá proporcionar el nombre, institución y correo electrónico de 5 posibles revisores/as. Existe la posibilidad de vetar a personas, siempre que esté debidamente justificado.

La Editora Principal valorará la adecuación del manuscrito a las normas de publicación. Si el trabajo se ajusta a las normas, será enviado para su revisión a 2 especialistas y, en caso de discrepancia, se remitirá a una tercera persona. Teniendo en cuenta la opinión de las personas que han revisado el trabajo, la Editora Principal decidirá si el trabajo es aceptado o requiere de modificaciones menores, moderadas o importantes, o si es rechazado. En caso de que sea aceptado con modificaciones, el manuscrito original deberá ser corregido siguiendo las observaciones de los/las revisores/as. La nueva versión del documento será enviada a la Editora Principal, quien valorará la necesidad de una segunda revisión o, en su caso, lo aceptará definitivamente.

MANUSCRITO ACEPTADO

Una vez aceptado el manuscrito se enviará por correo electrónico a la Editora Principal (nieves.lopez@ieo.csic.es), la versión final de las tablas (en formato DOC) y de las figuras (en formato JPG o TIFF), en archivos individuales. Si se usa el formato TIFF y la figura sólo contiene dibujos de líneas, la resolución deberá ser de 600 ppp. Si la figura tiene trama de grises o es en color, la resolución deberá ser de 300 ppp. Los/las autores/as recibirán: 1) las pruebas de impresión para la corrección de erratas, sin que se acepten modificaciones del texto original, y 2) el documento de Transferencia del Copyright a la Sociedad Geológica de España. Para resolver cualquier duda pueden contactar con la Editora Principal por correo electrónico: nieves.lopez@ieo.csic.es.

PUBLICATION RULES OF THE JOURNAL OF THE GEOLOGICAL SOCIETY OF SPAIN

The Journal of the Geological Society of Spain is an **open access biannual publication** of the Geological Society of Spain. This journal publishes original research contributions in Spanish or English that cover all Earth Science topics, in particular those concerning the Iberian Peninsula and nearby areas, as well as those related to the History of Geology, Geological Heritage, and similar topics. Review papers or compilations on specific topics with an up-to-date scientific perspective will also be considered for possible publication in the journal. The submitted manuscripts must be original research papers that have not been published (or not accepted) totally or partially elsewhere, in any language. All the papers will be reviewed by a minimum of two referees and by the Editorial Board.

MANUSCRIPT PREPARATION

Text organization

The text is to be formatted using the **RSGE Template** (DOC format), which is available <https://recyt.fecyt.es/index.php/RevSocGeoEsp/index>. It should be organized as follow: 1) Title in English and Spanish. 2) Name and surnames of authors. 3) Full postal and electronic addresses of authors. 4) Abstract in Spanish and English, not exceeding 200 words in the language of the main text, and no more than 400 words in the second language. 5) Keywords (3 to 5, in Spanish and English). 6) Short title to use as header, in the language of the main text. 7) Main text. Headings should be hierarchically sorted into three types without any numbering: **Section**, **First-order subsection** and **Second-order subsection**, with dot and followed by the text. In the main text, cite only published or in press publications. Any cited publications should be referred to the authors' surname and year of publication, arranged chronologically (e.g., Pérez, 2004; Mateos and Jiménez, 2007; Teixell *et al.*, 2007). The figures and tables must be sequential (e.g., Fig. 1, Fig. 2, Fig 3-5, Table 1, Table 2...etc.). 8) Acknowledgements and funding. Personal acknowledgements and those to the persons who have reviewed the work will be cited. In addition, it is necessary to indicate the funding sources of the study. 9) Author contributions. The individual contributions of each author must be provided in a short paragraph. 10) References. The list of references should be arranged alphabetically by authors' surnames and chronologically in case of repetition. References with a DOI should be indicated with a link such as <https://doi.org/>... (see examples below). 11) Figure and table captions.

- Arce Durante, J.M., Fernández Tomas, J., Monteserín López, V., 1977. Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 24 (Mondoñedo). IGME, Madrid.
- Díaz Martínez, E., 1988. El Cretácico Inferior del sector de Jubera (norte de la Sierra de Los Cameros, La Rioja). II Congreso Geológico de España, Comunicaciones, 1: 67-70.
- Lobo, F.J., Hernández-Molina, F.J., Somoza, L., Díaz del Río, V., 2001. The sedimentary record of the post-glacial transgression on the Gulf of Cadiz continental shelf (Southwest Spain). Marine Geology, 178: 171-195. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00176-1](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00176-1)
- Ortega Gironés, E., Gil Ibarguchi, J.I., 1983. La Unidad de Malpica-Tuy. In: Libro jubilar, J.M. Ríos. Geología de España, Tomo I, (J. Comba, Ed.). IGME, Madrid, 430-440.
- Parra, J., 2001. Análisis paleoambiental de los sistemas continentales y el vulcanismo asociado del Neógeno del Valle del Cajón en los Andes Occidentales (Catamarca, República Argentina). Doctoral Thesis, Univ. Huelva, 272 p.
- Woodroffe, C.D., 2002. Coasts. Cambridge University Press, New York, 623 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316036518>

Figures and tables

The page size of the journal, 248 x 170 mm, should be considered when preparing figures (both drawings and photographs) and tables. The figures and tables can occupy either one column (82 mm width) or the whole width of the page (170 mm width). Lettering should be a minimum of 7 pt. Line widths should range from 0.3 to 1.5 pt. Tables shall be in DOC format. Figure parts should be denoted by uppercase letters (A, B, C, etc.). Line drawings must be of good quality in terms of patterns, grey tones and legends. Photographs should be clear, have good contrast and a glossy aspect, and employ some indication of scale.

Manuscript length

As a general rule, manuscripts must not exceed 20 pages, including text and the equivalent space for figures and tables. One single-spaced RSGE Template page, written with font Times New Roman 10, contains approximately 1000 words.

MANUSCRIPT SUBMISSION AND REVISION

Manuscripts should be submitted electronically through <https://sociedadgeologica.org/publicaciones/revista-sge> to the Editor-in-chief (Nieves López-González) in 2 separated files: 1) the text in DOC format (*RSGE Template*), and 2) the figures and tables in a PDF document and numbered sequentially. In the template, the name, address and email of 5 possible reviewers should be provided. When justified, opposed reviewers can be named.

The Editor-in-chief evaluates the manuscript to ensure that it follows the requirements of the journal. If the manuscript receives a positive evaluation, it will be sent for review to 2 referees, but given conflicting reviews, the manuscript will be sent to a third referee. Once revised, the Editor-in-chief will decide whether the manuscript is accepted or requires minor, moderate or major modifications, or it is rejected. If it is accepted with modifications, the original manuscript must be adapted following the reviewers' suggestions. The new version of the manuscript will be sent to the Editor-in-chief, who will assess whether there is a need for additional revisions or if it is acceptable for publication.

ACCEPTED MANUSCRIPT

Once the manuscript is accepted, the authors will send by email to the Editor-in-chief (nieves.lopez@ieo.csic.es), the final version of the tables and figures in separated files. Tables must be in DOC format and figure files must be provided as JPG or TIFF files. For TIFF format figures containing only lines drawings, a resolution of 600 dpi is required. For greyscale or colour figures, a resolution of 300 dpi is sufficient. Authors will receive: 1) the print proofs, to be checked for typesetting/editing, and 2) the Copyright Transfer to the Geological Society of Spain. Questions should be directed to the Editor-in-chief by email: nieves.lopez@ieo.csic.es.

SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

La **Sociedad Geológica de España** fue fundada en 1985 y tiene como fines la promoción, fomento y difusión del conocimiento, progreso y aplicaciones de la Geología, el asesoramiento en materia científica y educativa a las Instituciones y Entidades que lo requieran, y la representación de los intereses científicos de la comunidad geológica de España a nivel internacional. Sus miembros tienen derecho a participar en todas las actividades organizadas por la Sociedad, a optar a ocupar cualquiera de sus cargos directivos y a recibir gratuitamente las publicaciones periódicas de la Sociedad: Geogaceta y Revista de la Sociedad Geológica de España.

JUNTA DE GOBIERNO

(Presidencia)	Ana Ruiz Constán Instituto Geológico y Minero de España, Unidad de Granada Urb. Alcázar del Genil, 4-Edif. Zulema, Bajo, 18006 Granada (España) Tel: +34 958 691 031; e-mail: a.ruiz@igme.es
(Secretaría 1º)	Manuela Chamizo Borreguero Instituto Geológico y Minero de España, Dpto. Geología y Subsuelo C/ Calera, 1. Despacho 02-PB-03, 28760 Tres Cantos, Madrid (España) Tel: +34 917 285 192; e-mail: m.chamizo@igme.es
(Secretaría 2º)	Miguel Gómez Heras Universidad Autónoma de Madrid, Dpto. de Geología y Geoquímica Facultad de Ciencias C/ Francisco Tomás y Valiente 7 (Módulo 06-406), 28049 Madrid (España) Tel: +34 914 975 407; e-mail: miguel.gomezheras@uam.es
(Tesorería)	Blanca M. Martínez García Universidad del País Vasco C/ Sarriena s/n, 48940 Leioa, Vizcaya (España) e-mail: blancamaria.martinez@ehu.eus
(Vicepresidencia)	Pedro Huerta Hurtado Universidad de Salamanca, Dpto. de Geología Facultad de Ciencias Plaza de la Merced s/n, 37008 Salamanca (España) Tel: +34 920 353 500; e-mail: phuerta@usal.es
(Vicesecretaría)	Ramón Casillas Ruiz Universidad de La Laguna, Dpto. de Biología Animal, Edafología y Geología Sección de Biología de la Facultad de Ciencias C/ Astrofísico Francisco Sánchez s/n, 28200 La Laguna, Santa Cruz de Tenerife (España) Tel: +34 922 845 268; e-mail: rcasilla@ull.edu.es
(Vocalías)	Antonio José Olaiz Campos Davinia Moreno García Desireé Palomino Cantero Iván Martín Rojas José F. Mediato Arribas Juana Vegas Salamanca Raquel Martín Banda

SEDE ADMINISTRATIVA

Sociedad Geológica de España:
Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, Plaza de la Merced s/n, 37008 Salamanca, (España)
<http://www.sociedadgeologica.org>

Suscripciones: Toda la correspondencia debe ser dirigida a la Sede Administrativa de la Sociedad. El precio de la suscripción anual es de 67 € para España y Portugal y 76 € para el resto del mundo.

REVISTA DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

Volumen 38, Número 2, (2025)

Editorial Número Especial Geoarqueología 3

Artículos Geoarqueología

M^a TERESA DE TENA REY, CARMEN PRO MUÑOZ, VICTORINO MAYORAL HERRERA Y ELIA QUIRÓS

Dinámica geoarqueológica de la vertiente oriental del recinto amurallado del yacimiento de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres, España) / *Georchaeological dynamics of the eastern slope of the walled enclosure of the Villasviejas del Tamuja site (Botija, Cáceres, Spain)* 7

CARLOS CAMUÑAS PALENCIA, ISABEL MARÍA SÁNCHEZ RAMOS, ANDRÉS DÍEZ HERRERO, M^a ÁNGELES PERUCHA ATIENZA Y MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ-PASCUA

La geología como factor condicionante en un conjunto aristocrático visigodo: Los Hitos (Arisgotas, Toledo, España) / *Geology as a condiction factor of a Visigothic and aristocratic settlement: Los Hitos (Arisgotas, Toledo, Spain)* 17

ROBERTO MATÍAS RODRÍGUEZ

Contexto geoarqueológico de los sistemas de molienda del cuarzo aurífero en la minería romana del noroeste de Iberia / *Geoarchaeological context of gold quartz milling systems in Roman mining in the Iberian northwest* 33

RODRIGO ANDRÉS-BERCIANOS Y JAVIER FERNÁNDEZ-LOZANO

Nuevas evidencias de minería aurífera antigua en la Sierra de la Culebra (Zamora, España) / *New evidences of ancient gold mining in the Sierra de la Culebra (Zamora, Spain)* 47

JESÚS F. JORDÁ PARDO, DAVID ÁLVAREZ-ALONSO, MARÍA DE ANDRÉS-HERRERO, PILAR CARRAL GONZÁLEZ, AITOR HEVIA-CARRILLO Y JOSÉ MARÍA VÁZQUEZ-RODRÍGUEZ

Geoarqueología y cronoestratigrafía del yacimiento aziliense del Pleistoceno superior de la cueva de Los Azules (Cangas de Onís, Asturias, España) / *Geoarchaeology and chronostratigraphy of the Azilian site of the Upper Pleistocene of Los Azules Cave (Cangas de Onís, Asturias, Spain)* 63

Otros Artículos

SATURNINO LORENZO Y JUAN CARLOS GUTIÉRREZ-MARCO

Bioestratigrafía del silúrico (graptolitos) de la parte meridional de la zona Centroibérica Española / *Silurian graptolite biostratigraphy of the southern Central Iberian Zone (Spain)* 83