



LUCAS MALLADA

REVISTA DE CIENCIAS

26 | 2024

**LUCAS
MALLADA**

LUCAS MALLADA

REVISTA DE CIENCIAS

26 | 2024



IEA
Instituto
de Estudios
Altoaragoneses

DIPUTACIÓN
HUESCA

LUCAS MALLADA

REVISTA DE CIENCIAS

IEA / Diputación Provincial de Huesca

Director José Antonio Cuchí Oterino

Consejo de redacción Antonio Alcubierre García, Pedro Arnal Atarés, Joaquín Ascaso Martorell, David Badía Villas, Raimundo Bambó Mompradé, Ánchel Belmonte Ribas, José Antonio Blecua Elboj, Pilar Bolea Catalán, Miguel Cabezón Cuéllar, José Ignacio Canudo Sanagustín, José Casanova Gascón, Cristóbal Castán Pueyo, Àngels Castellarnau Visús, Pilar Catalán Rodríguez, Ángel Crespo Yagüe, Belén Diezma Iglesias, Santiago Fábregas Reigosa, Luis Valero Franco Gay, Francisco Javier García Ramos, José Gómez Porter, Penélope González Sampérez, Luis Ángel Inda Aramendía, Jesús Insausti López, Juan Manuel Lantero Navarro, Emilio Leo Ferrando, Rocío López-Flores, Pedro Lucha López, José M.^a Mañás Pascual, Clara Martí Dalmau, Pablo Martín-Ramos, Jesús Martínez Padilla, Jesús Monreal Pueyo, Luis Enrique Montano Gella, Antonio Naval Mas, José María Nicoláu Ibarra, Sara Palacio Blasco, César Pedrocchi Renault, M.^a Luisa Peleato Sánchez, Ernesto Pérez-Collazos, Mariano Ramón Gil, Enrique Sáez Olivito, José Miguel Sanz Lahoz, Leopoldo Serena Puig, Alfredo Serreta Oliván, Luis Villar Pérez y José Luis Villarroel Salcedo

Coordinación editorial Teresa Sas

Corrección Isidoro Gracia

Diseño de la portada Vicente Badenes

Maquetación Miguel Corellano

Impresión Harmony Veyron, S. L.

IEA / Diputación Provincial de Huesca

Calle del Parque, 10. E-22002 Huesca

Tel. 974 294 120

www.iea.es / publicaciones@iea.es

Periodicidad anual

ISSN 0214-8315

Depósito legal HU-76/2014

ISSN-e 2445-060X

Revista digital en acceso abierto

<http://revistas.iea.es/index.php/LUMALL>

ÍNDICE

Despedida	
José Antonio Cuchí Oterino	7
Suplementación vitamínica y mineral para la mejora de la reproducción del quebrantahuesos (<i>Gypaetus barbatus</i>) en el Pirineo central	
Juan Antonio Gil, Gonzalo Chéliz, Óscar Díez y Juan Carlos Ascaso	9
Propuesta de determinación de aerinita en pigmentos mediante pXRF	
José Antonio Manso Alonso, María Puértolas Clavero, Sheila Ayerbe Lalueza, Pablo Martín-Ramos y José Antonio Cuchí Oterino	25
Varietades de olivo tradicionales en el Alto Aragón: caracterización molecular, aceites monovarietales y árboles monumentales	
Javier Viñuales Andreu, Alfredo Serreta Oliván, Rubén Sancho Cohen, Ana Cristina Sánchez Gimeno, Pablo Martín-Ramos, José Antonio Cuchí Oterino y José Casanova Gascón	59
Una mina de hierro en Santa Marina (Bagüeste)	
Ana Ortas del Rfo, Mariano Oliván Esteban, Enrique Salamero Pelay, José Antonio Manso Alonso y José Antonio Cuchí Oterino	99
Algunas características de materiales geológicos y suelos salinos en la zona occidental de la Hoya de Huesca	
José Antonio Cuchí Oterino, Nicolás Omiste Rodrigo y Raquel Zufiaurre Galarza	113
Los suelos de Biscarrués como elemento pedagógico	
David Badía Villas y José Antonio Cuchí Oterino	143
Aportación a la historia de las presas del alto Flumen	
José Antonio Cuchí Oterino, Almudena Bollaín Covarrubias y José Luis Villarroel Salcedo	161
Nota sobre mineralizaciones de cobre en el pico Borón (Vadiello)	
Ana Ortas del Rfo, José Antonio Manso Alonso y José Antonio Cuchí Oterino	203

LUCAS MALLADA, 26 (2024)

ISSN 0214-8315, ISSN-e 2445-060X

<http://revistas.ica.es/index.php/LUMALL>

DESPEDIDA

Como dice el clásico dicho, todo pasa, y el inexorable paso del tiempo ha llegado para mi despedida como director (en las revistas más científicas se dice *editor*) de *Lucas Mallada*. Hace ya algún tiempo me hicieron el honor (gracias, Fernando Alvira) de hacerme cargo de la revista siguiendo los pasos del doctor César Pedrocchi (gracias por abrir camino). Eso fue en el número 14, que vio la luz en 2012.

Desde entonces he comprobado la utilidad de la revista. Por un lado, aporta ciencia y conocimiento al Alto Aragón, eso que algunos llaman *poner en valor*. Por otro, es una plataforma para que autores noveles, y muchas veces no tanto, radicados en nuestro entorno puedan expresar por escrito sus trabajos y sus ideas. Ya sé que suena raro lo de escribir bien en estos tiempos de plataformas audiovisuales, WhatsApp, Facebook y TikTok o como se llamen, pero el formato del artículo científico en papel o PDF sobrevivirá, al menos por algún tiempo. Además, raro es el caso del autor novel que escribe su primer artículo en *Science* o *Nature*. Y si aparece su nombre es como trabajador manual, por calificarlo suavemente, de algún investigador sénior benévolo. ¿Quién no ha recibido el rechazo de un editor diciendo que su trabajo es demasiado local? ¿A quién no se le han quedado flecos de estudios que piensa que son útiles? ¿Quién no ha descubierto que su esforzado trabajo sobre algún aspecto altoaragonés, escrito con mucho esfuerzo en inglés y publicado, por fin, en una revista SCI, que algunos llaman *de impacto*, es absolutamente ilegible e ignorado por sus vecinos? Si queremos que estos lo puedan leer, que sepan lo que hacemos, que tenga alguna trascendencia, que sirva para algo más que para rellenar un currículum académico (vanidad de vanidades, torre de marfil, etcétera), hay que

difundirlo a escala más cercana, que es de donde, por cierto, muchas veces salen las ayudas económicas y otras facilidades para nuestra investigación. Ya solo por eso tiene sentido la publicación en *Lucas Mallada*. Y para más cosas que dejo en el tintero, otro anacronismo, y que ya habrá supuesto el lector inteligente. Pero me suelo *esbarrar* demasiado en plan jubilado vigilante de obras.

Así que, volviendo a la despedida, evidentemente tengo que dar las gracias a los autores y, en muchos casos, a su paciencia. Sin ellos, desde luego, no hay revista. Gracias también a los “anónimos” revisores, amigos con nombres y apellidos, que han dedicado parte de su tiempo a releer y en algunos casos a mejorar los manuscritos cobrando lo mismo que yo. Gracias a Ernesto Pérez Collazos, que en un tiempo actuó como codirector. Gracias a Teresa Sas y a las personas que llevaron los manuscritos al papel. Y gracias a Susana Villacampa, que me permite retirarme de esta tarea.

Larga vida a la revista *Lucas Mallada*.

José Antonio Cuchí Oterino
Director de la revista *Lucas Mallada*

LUCAS MALLADA, 26 (2024)

ISSN 0214-8315, ISSN-e 2445-060X

<http://revistas.ica.es/index.php/LUMALL>

SUPLEMENTACIÓN VITAMÍNICA Y MINERAL PARA LA MEJORA DE LA REPRODUCCIÓN DEL QUEBRANTAHUESOS (*GYPAETUS BARBATUS*) EN EL PIRINEO CENTRAL

Juan Antonio Gil¹ | Gonzalo Chéliz¹ |
Óscar Díez¹ | Juan Carlos Ascaso¹

RESUMEN Entre 2020 y 2023 se llevó a cabo un programa de alimentación suplementaria en 10 unidades reproductoras (UR) de quebrantahuesos en el Pirineo central (Aragón) por el que se aportaron 2800 kilogramos de huesos en los que se aplicó un suplemento vitamínico mineral. Durante esos cuatro años se recogieron muestras de 39 huevos y 1 pollo que procedían de los rescates efectuados en 19 UR de quebrantahuesos. De estas, se proporcionó alimentación suplementaria en 5 UR y se analizaron 24 huevos de 14 UR rescatadas y de 14 pollos nacidos del rescate de 9 UR. Se determinó en qué medida las UR suplementadas habían incorporado los suplementos en su organismo y qué efectos significativos podían tener sobre la supervivencia de los pollos. Los resultados muestran que la ingesta, la tolerancia y la asimilación de los suplementos empleados fueron correctas, lo que se traduce en niveles superiores de vitaminas A, E, carotenos, calcio, peso y tamaño de huevos y neonatos, índices de conversión, inmunomodulación, tolerancia al estrés y calidad ultraestructural de la cáscara.

PALABRAS CLAVE Quebrantahuesos. Alimentación y vitaminas. Pirineo central (Aragón).

¹ Fundación para la Conservación del Quebrantahuesos (FCQ). Plaza de San Pedro Nolasco, 1, 4.º F. E-50001 Zaragoza. www.quebrantahuesos.org / fcq@quebrantahuesos.org

ABSTRACT A supplementary feeding programme was conducted between 2020 and 2023 with 10 bearded vulture breeding pairs (BPs) in the Central Pyrenees (Aragón), providing 2800 kilograms of bones to which a vitamin and mineral supplement was applied. During these four years, samples of 39 eggs and 1 chick were collected from rescues carried out on 19 bearded vulture BPs. Supplementary feeding was provided for 5 BPs, and 24 eggs from 14 rescued BPs and 14 chicks born from the rescue of 9 BPs were analysed. We determined to what extent the supplemented BPs absorbed the supplements and whether the supplementary feedings had significant effects on the survival of the chicks. The results show a satisfactory intake, tolerance and assimilation of the supplements used, resulting in higher levels of vitamins A and E, carotenes, and calcium; greater weight and size of eggs and neonates; and improved conversion rates, immunomodulation, stress tolerance, and quality of shell ultrastructure.

KEYWORDS Bearded vulture. Vitamin-mineral supplement. Central Pyrenees (Aragón).

INTRODUCCIÓN

Existen varios nutrientes esenciales para el correcto funcionamiento de los organismos que no pueden ser sintetizados naturalmente, sino a través de la alimentación: proteínas, carbohidratos, grasas, vitaminas, minerales, fibra y agua. Estos se pueden clasificar en macronutrientes (hidratos de carbono, proteínas y grasas) y micronutrientes (vitaminas y minerales), compuestos que, en muy pequeña cantidad, son requeridos por el cuerpo para la mayoría de las funciones celulares. Existen trece vitaminas esenciales, que se clasifican en hidrosolubles y en liposolubles.

En condiciones naturales una dieta variada y equilibrada asegura la ingesta de la cantidad adecuada y suficiente de estos elementos en todos los seres vivos. Sin embargo, en la actualidad la dieta de muchas especies ha sido modificada y la composición en nutrientes de lo que ingieren alterada, con presencia de ciertos tóxicos ambientales u otros compuestos que modifican tanto la absorción como el metabolismo de determinados micronutrientes esenciales para el desempeño de las funciones biológicas, entre ellas la reproducción, el crecimiento o el desarrollo y el funcionamiento del sistema inmune. Del mismo modo, el aumento del estrés oxidativo ligado a ciertos residuos tóxicos y situaciones o factores estresantes derivados de la alteración del

ecosistema, como cambios bioclimáticos, de dieta, presión humana..., son responsables de que la ingesta o el metabolismo de determinados micronutrientes sensibles a la oxidación disminuyan hasta niveles lesivos.

En el caso del quebrantahuesos (*Gypaetus barbatus*), la existencia de una dieta poco variada o la presencia de determinados tóxicos ambientales (Mateo y cols., 2015) pueden producir una disminución de las vitaminas y de los minerales que afecte a la reproducción, ya sea a los huevos o a los pollos. La calidad de la cáscara del huevo depende de numerosos factores: individuales, nutricionales, genéticos, hormonales, ecotoxicológicos, de estrés, ligados a patologías (Hernández y cols., 2018)... Las dietas bajas en calcio pueden dar lugar a alteraciones en la ultraestructura y a un aumento de la fragilidad de la cáscara. Los suplementos vitamínicos suponen la adición de ciertos minerales y, en concreto, niveles importantes de calcio que ayudan a mejorar la calidad de la cáscara.

A continuación se presentan los resultados de la suplementación nutricional vitamínica y mineral y sus efectos en la fisiología y los parámetros reproductivos del quebrantahuesos entre 2020 y 2023 en el Pirineo central (Aragón), concretamente en la calidad de la cáscara y los micronutrientes en sangre de los pollos, que afectan a la tasa de eclosión y de supervivencia juvenil.

MATERIAL Y MÉTODOS

Programa de alimentación suplementaria vitamínica y mineral

El área de trabajo se situó en el ámbito de aplicación del Plan de Recuperación del Quebrantahuesos en Aragón (11 063 kilómetros cuadrados), concretamente en la vertiente sur del Pirineo central (Huesca y Zaragoza). Durante cuatro temporadas, de 2019-2020 a 2022-2023, se llevó a cabo un programa de alimentación suplementaria en 10 unidades reproductoras (UR) de quebrantahuesos (n.ºs 26, 39, 41, 45, 47, 52, 53, 63, 66, 78), entre los meses de octubre y enero, por el cual se aportaron 2800 kilogramos de huesos. En ellos se aplicó un suplemento vitamínico mineral Núcleo Rapaces® a la dosis de 0,5 gramos/kilogramo de peso vivo. El suplemento se añadió justo antes de dispensar los huesos del aporte, de manera que los micronutrientes se adicionaran lo más frescos e inalterados posible.

La aceptación del suplemento vitamínico fue buena, pues se constató una ingesta adecuada. Determinadas vitaminas como las liposolubles tardan entre un mes y medio y dos en alcanzar suficiente nivel en sangre, por lo que es preciso que la suplementación se realice con antelación suficiente, de forma que al llegar la época reproductiva se hayan alcanzado los niveles requeridos.

Recogida de muestras

Se recogieron muestras de 39 huevos y 1 pollo, procedentes de los rescates efectuados en 19 UR de quebrantahuesos en cuatro temporadas. De ellas, se dio alimentación suplementaria en 5 UR (tabla I). Se analizaron 24 huevos de 14 UR y 14 pollos de 9 UR (tabla II). Para conocer los parámetros relacionados con el crecimiento de los pollos se compilaron los datos del peso al nacimiento, la ingesta diaria de alimentos y la ganancia diaria de peso. Con ellos se calcularon los índices de conversión del alimento en ganancia de peso.

Análisis de muestras

En el caso de las vitaminas y de los minerales, se llevaron a cabo tanto en yema de huevos no eclosionados como en sangre de pollos de 20-30 días de edad criados en cautividad y provenientes de huevos de rescate. Se estimó la fecha de puesta y el peso inicial de los huevos, tanto de los eclosionados como de los no eclosionados. Se realizaron análisis hematológicos de niveles de micronutrientes (vitamina A, vitamina E, B caroteno) en plasma de los pollos y en la cáscara de los huevos (carbonato cálcico en la cáscara), mediante microscopía electrónica de barrido y de la pureza de carbonato cálcico.

Así se determinó en qué medida las UR suplementadas habían incorporado los suplementos en su organismo y qué efectos significativos podían tener sobre los siguientes parámetros que influyen en la supervivencia:

- Tamaño del huevo y del neonato.
- Capacidad de inmunomodulación del sistema inmune en los pollos.
- Índices de crecimiento.
- Calidad de la cáscara mediante análisis de parámetros ultraestructurales, incluyendo el contenido en calcio y otros elementos.



Imágenes correspondientes al programa de suplementación alimentaria en quebrantahuesos llevado a cabo entre 2020 y 2023 en el Pirineo central (Aragón).
(Fundación para la Conservación del Quebrantahuesos)

Tabla 1. Número de huevos rescatados en el periodo 2020-2023.
(Con asterisco, las unidades reproductoras con alimentación suplementaria)

<i>Número de UR</i>	2020	2021	2022	2023
3 Hecho 1		2		
8 Aragón 2		2		
17 Escuaín 2	1			
20 Chistau 1	2	1		
28 Turbón			2	
40 Ferrera			2	1
*41 Esdolomada				1
48 Flumen	1			
*52 Yaso	1			
*53 Alcanadre 1			1	
60 Añisclo 3			1	
61 Guarguera		2	1	
*63 Fago			1	2
70 Sahún	2			
*78 Fanlo	1			
84 Bergua			1	
86 Abi		1		
89 Yesa	2	2		1
91 Inclusa		1	2	2
<i>Total</i>	10	11	11	7

Tabla II. Número de huevos y pollos analizados en el periodo 2020-2023.

<i>Número de UR</i>	<i>Huevos</i>	<i>Pollos</i>
3 Hecho 1	1	
8 Aragón 2	2	2
17 Escuaín 2	1	1
20 Chistau 1	3	2
28 Turbón		
40 Ferrera		
41 Esdolomada		1
48 Flumen	1	
52 Yaso	1	1
53 Alcanadre 1	1	
60 Añisclo 3		
61 Guarguera	2	
63 Fago	3	3
70 Sahún	2	
78 Fanlo	1	1
84 Bergua		
86 Abi	1	
89 Yesa	4	2
91 Inclusa	1	1
<i>Total</i>	24	14

RESULTADOS

Los pollos de las UR suplementadas presentan niveles significativamente superiores de vitamina A, E y B caroteno en plasma en comparación con la gran mayoría de los de las UR no suplementadas, lo que confirma un correcto consumo y una adecuada incorporación del suplemento (figs. 1, 2 y 3).

Los pollos de las UR suplementadas mostraron recuentos totales de eosinófilos en el rango inferior de los valores de referencia, lo que indicaba una mayor capacidad de inmunomodulación, es decir, un sistema inmune que reacciona más adecuadamente ante el estrés térmico o la agresión de agentes patógenos. La suplementación con vitamina A dio lugar a un probado fortalecimiento del sistema inmune (fig. 4).

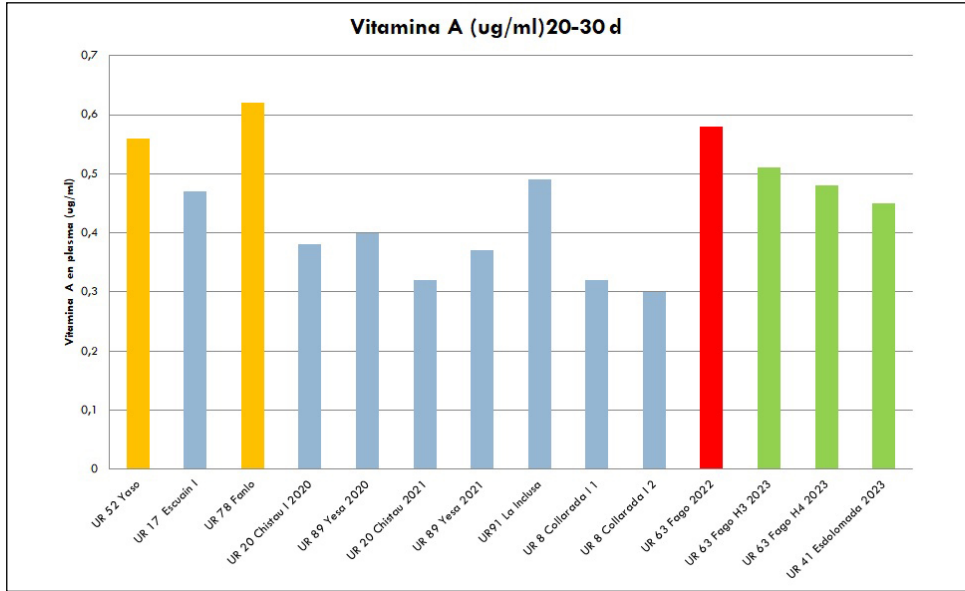


Fig. 1. Niveles de vitamina A en plasma en los pollos examinados en 2021 como comparativa. (En naranja se marcan los procedentes de parejas suplementadas en 2021, en rojo los de 2022 y en verde los de 2023)

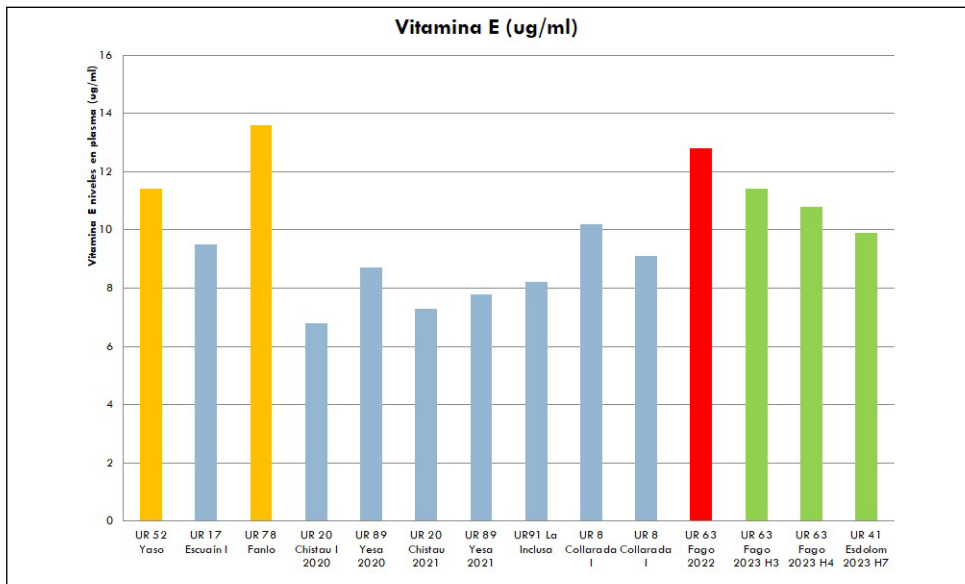


Fig. 2. Niveles de vitamina E en plasma en los pollos examinados. (En naranja, rojo y verde se marcan los procedentes de parejas suplementadas en 2021, 2022 y 2023)

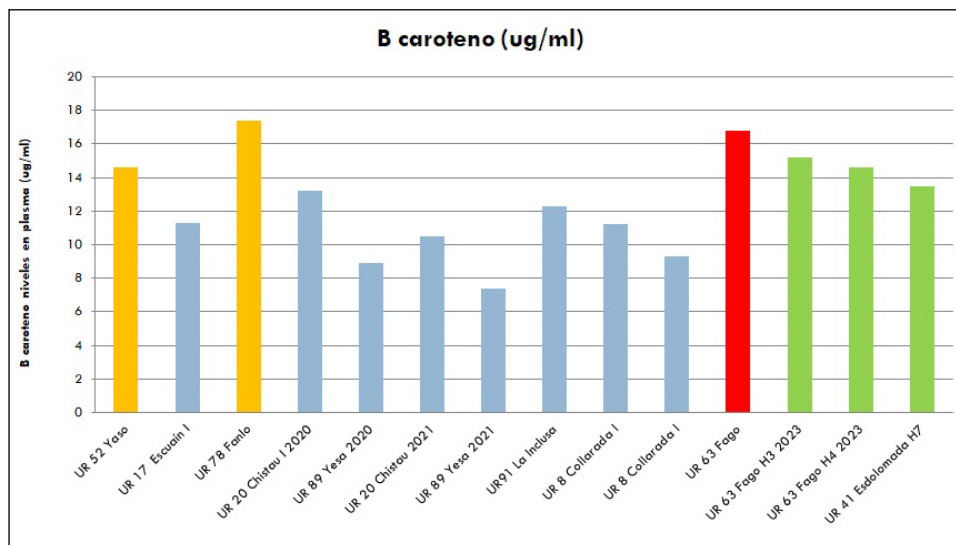


Fig. 3. Niveles de B caroteno en plasma en los pollos examinados. (En naranja, rojo y verde se marcan los procedentes de parejas suplementadas intervenidas con descendencia en 2021, 2022 y 2023, respectivamente, con fines comparativos)

El tamaño de los huevos suplementados fue superior al de los no suplementados, con unos mayores niveles de vitamina A y E. Los huevos de mayor tamaño dan lugar al nacimiento de pollos de mayor peso, lo que favorece su supervivencia (figs. 5 y 6).

Los pollos de las UR suplementadas, con niveles superiores de vitamina A en plasma, presentaban ganancias de peso e índices de conversión máximos, comparativamente superiores a la mayoría de los otros pollos durante la primera fase del crecimiento (primera semana), pero también en la segunda y en el índice de conversión medio (primer mes) (fig. 7).

Los huevos puestos por las hembras de las UR suplementadas presentaron porcentajes superiores de carbonato cálcico, es decir, contenían mayor cantidad o pureza de carbonato cálcico por unidad de peso de la cáscara, lo que *a priori* les concede mayor resistencia a la fractura (fig. 8). Los análisis de niveles de calcio mediante difracción de rayos X en las diferentes capas de la cáscara mostraron que las cáscaras procedentes de las UR suplementadas contenían niveles medios de calcio entre los más elevados de todas las

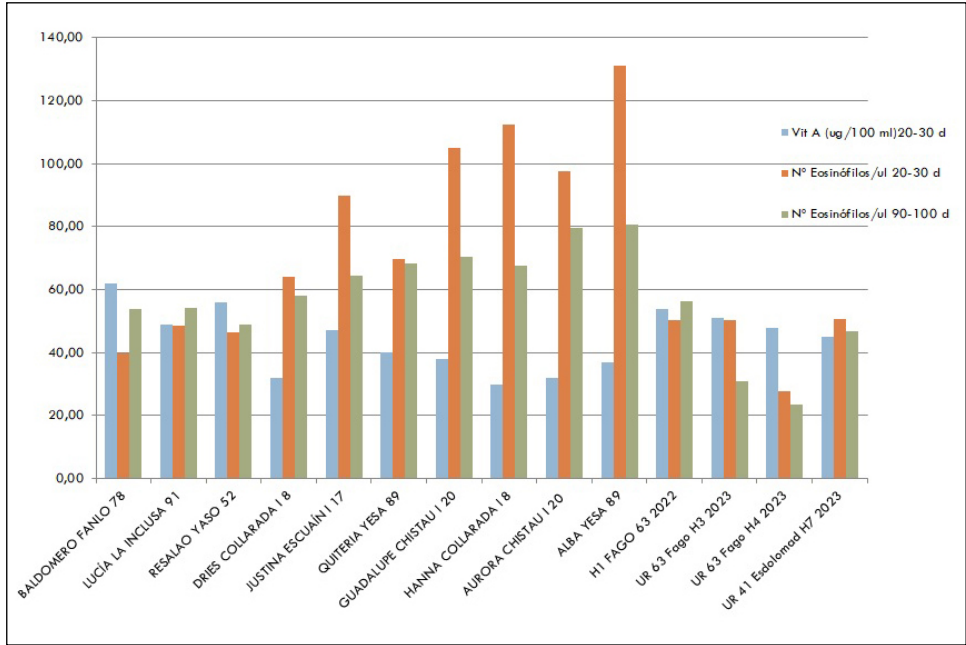


Fig. 4. Niveles de vitamina A en relación con el número total de eosinófilos a los 6 y 30 días de edad y entre los 80 y 100 días de desarrollo en parejas suplementadas y no suplementadas.

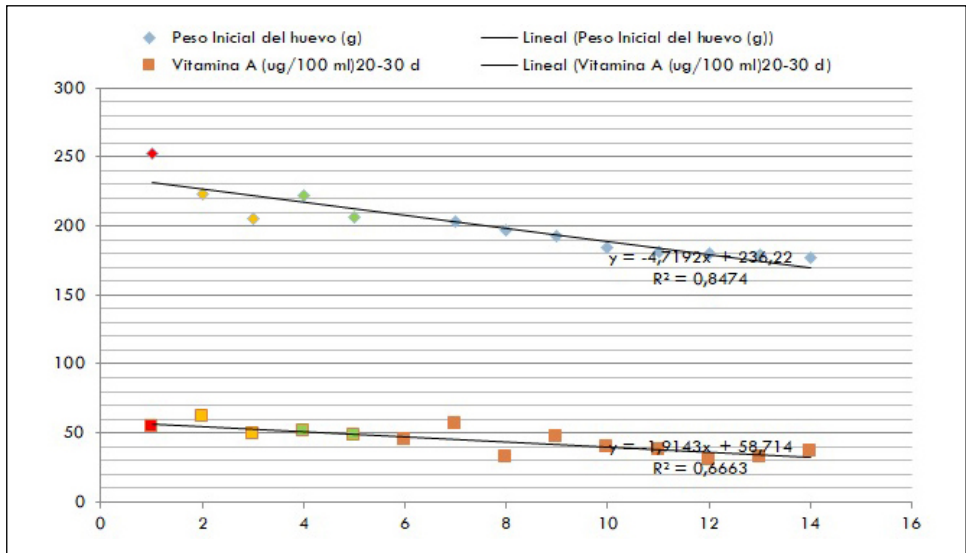


Fig. 5. Peso inicial de los huevos y vitaminas aportadas.

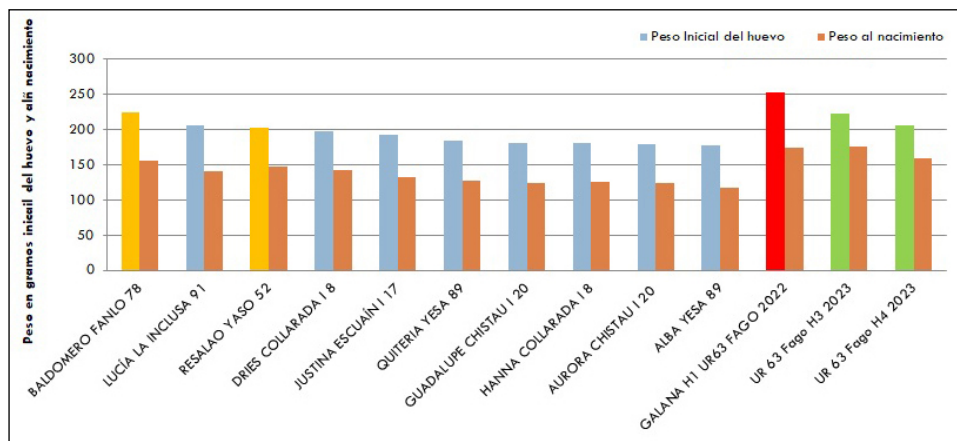


Fig. 6. Peso inicial de los huevos y de los pollos nacidos con suplementación vitamínica.

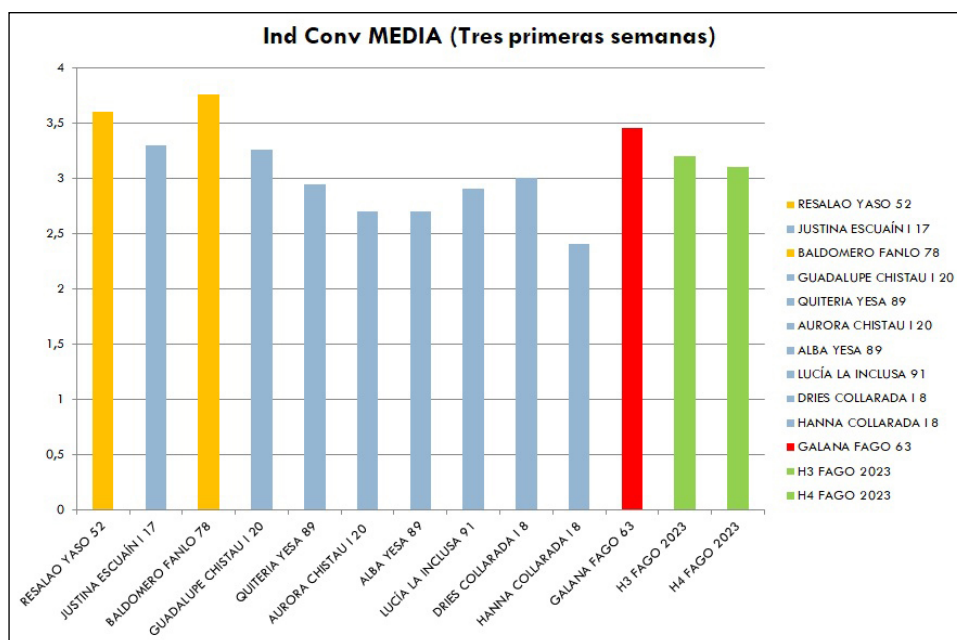


Fig. 7. Índice de conversión medio de las tres primeras semanas en los pollos estudiados. (En naranja se marcan los procedentes de parejas suplementadas en 2021, en rojo los de 2022 y en verde los de 2023)

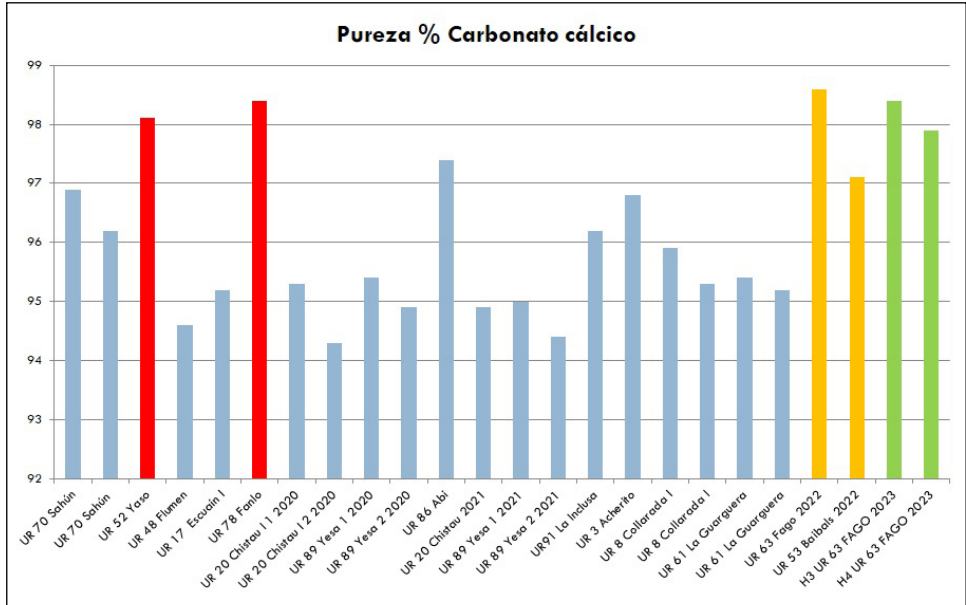


Fig. 8. Pureza del carbonato cálcico en las 24 cáscaras analizadas. (En rojo se marcan las procedentes de parejas suplementadas en 2021, en naranja las de 2022 y en verde las de 2023)

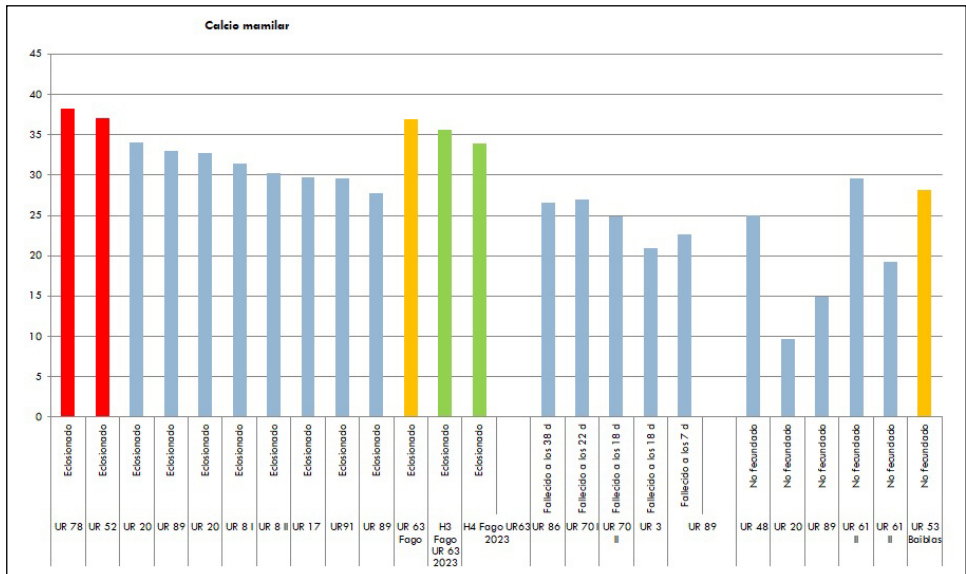


Fig. 9. Niveles de calcio mamilar en relación con el desarrollo embrionario alcanzado.

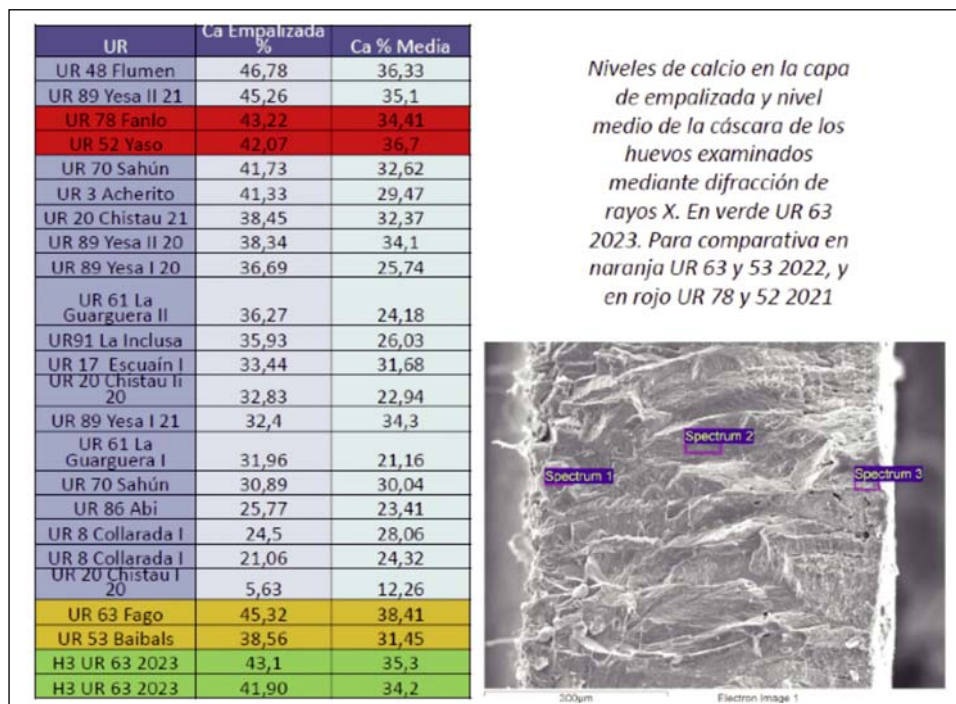


Fig. 10. Niveles de calcio en la cáscara de los huevos con vitaminas aportadas.

analizadas. Esto presume la correcta incorporación mineral mediante la suplementación, que contribuye positivamente a una adecuada estructura, si bien es cierto que los huevos de tamaño superior contienen niveles de calcio más elevados como contribución a la fortaleza y a la calidad de su estructura (fig. 9).

Los niveles de calcio específicamente en la capa de empalizada de las UR suplementadas fueron los más altos del total de muestras procesadas. Esto apoya la hipótesis de que el suplemento fue correctamente absorbido y que contribuyó, aparentemente, al aumento del contenido de calcio medio en la cáscara y, parcialmente, a una mejora de la fortaleza de la estructura (fig. 10).

Las cáscaras de las UR suplementadas se situaron entre las de mayor grosor total y con un elevado grado de cristalización. Estos datos, junto con otros ya comentados en relación con el contenido en calcio, presuponen que

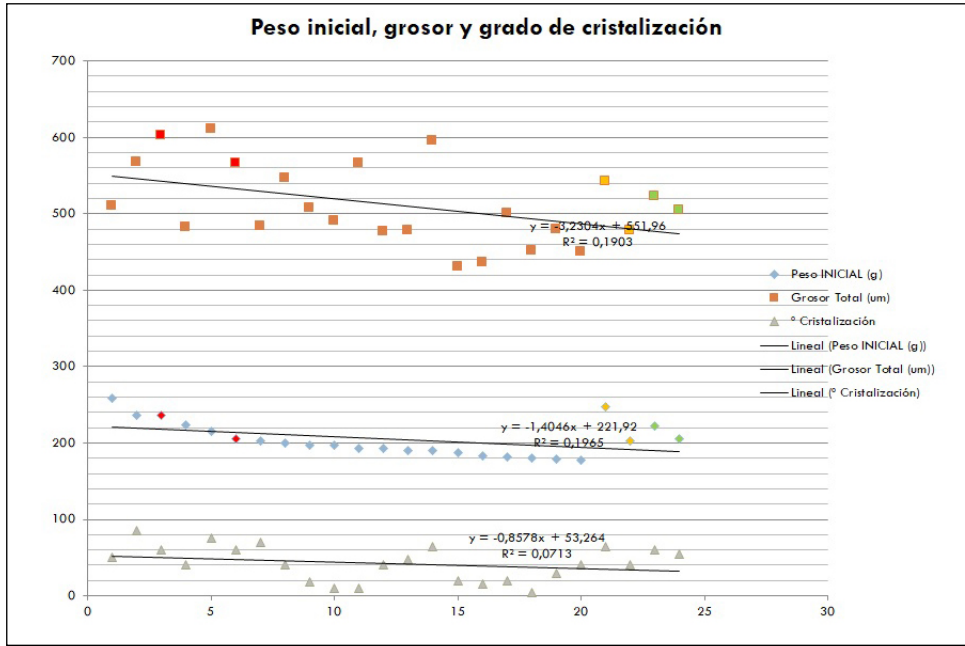


Fig. 11. Relación entre la pureza del carbonato en cáscara y el peso inicial del huevo. (En rojo, parejas suplementadas en 2021; en naranja figuran los valores de las UR 63 y 53 en 2022, y en verde los de la UR 63 en 2023, para comparación)

la suplementación pueda influir positivamente en una mayor resistencia a la fractura, si bien este aspecto solo podrá constatararse cuando se realicen pruebas de resistencia a tensiones con las pruebas de laboratorio adecuadas (pruebas de fractura con tensiómetros) (fig. 11).

DISCUSIÓN

El correcto consumo y la incorporación del suplemento vitamínico en el quebrantahuesos supuso un fortalecimiento del sistema inmune debido a su capacidad para proteger las células de la oxidación de radicales libres, así como para reducir los efectos perjudiciales de los eicosanoides (prostaglandinas, leucotrienos y tromboxanos). En aves la protección inmunitaria está fuertemente correlacionada con la concentración de prostaglandinas: a mayor concentración de estas, mayor es la inmunosupresión

(Tizard, 2009). Según Weber (1995), la vitamina E suplementaria disminuye la concentración de prostaglandinas en los órganos hematopoyéticos y aumenta la producción de anticuerpos en respuesta a una infección con *Escherichia coli*.

Crear un huevo requiere muchos nutrientes adicionales y calcio para la cáscara que provienen de la alimentación. Los huevos puestos por las hembras suplementadas mostraron porcentajes superiores de carbonato cálcico, tal y como observaron Swiatkiewicz y Koreleski (2008). Los huevos de mayor tamaño dan lugar al nacimiento de pollos de mayor peso. Esto coincide con lo demostrado para ciertas especies de aves en las que la suplementación vitamínica dio lugar a un aumento de los índices de conversión y a un crecimiento más rápido, que hizo que se adelantase la independencia de los pollos por su excelente condición y fortaleza, mejorando así su supervivencia juvenil. Los huevos suplementados mostraron poco estrato amorfo, hallazgo que en otras especies está ligado a niveles inferiores de estrés o a menor exposición a ciertos tóxicos acumulativos.

CONCLUSIONES

Los resultados mostraron una correcta ingesta y tolerancia y asimilación de los suplementos empleados, lo que parece que se traduce en niveles superiores de vitaminas A, E, carotenos, calcio, peso y tamaño de los huevos y de los neonatos, índices de conversión, inmunomodulación, tolerancia al estrés y calidad ultraestructural de la cáscara. La mejora en estos parámetros se ha relacionado en otras especies con una mayor tasa de eclosión y de supervivencia.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento a todas las personas y entidades que han colaborado en el desarrollo de estos trabajos, y especialmente al Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico, el Gobierno de Aragón, el Grupo Cooperativo Pastores y la Fundación Aquila.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Hernández, M., M. À. Colomer, M. Pizarro y A. Margalida (2018). Changes in eggshell thickness and ultrastructure in the bearded vulture (*Gypaetus barbatus*) Pyrenean population: A long-term analysis. *Science of the Total Environment*, 624: 713-721.
- Mateo, R., I. Sánchez-Barbudo, P. Camarero y J. M. Martínez (2015). Risk assessment of bearded vulture (*Gypaetus barbatus*) exposure to topical antiparasitics used in livestock within an ecotoxicology vigilance framework. *Science of the Total Environment*, 536: 70.
- Swiatkiewicz, S., y J. Koreleski (2008). The effect of zinc and manganese source in the diet for laying hens on eggshell and bones quality. *Veterinárni Medicina*, 53: 555-563.
- Tizard, I. (2009, 8.^a ed.). *Veterinary Immunology: An Introduction*: 529. Saunders Elsevier. Misuri.
- Weber, G. (1995). Micronutrientes e inmunidad, II. Vitaminas. En *XI Curso de Especialización FEDNA*. Barcelona. 15 pp.

LUCAS MALLADA, 26 (2024)

ISSN 0214-8315, ISSN-e 2445-060X

<http://revistas.ica.es/index.php/LUMALL>

PROPUESTA DE DETERMINACIÓN DE AERINITA EN PIGMENTOS MEDIANTE pXRF

José Antonio Manso Alonso¹ | María Puértolas Clavero² |
Sheila Ayerbe Lalueza² | Pablo Martín-Ramos³ |
José Antonio Cuchí Oterino¹

RESUMEN En el presente artículo se estudia, mediante un equipo portátil de espectroscopia de fluorescencia de rayos X, la composición elemental de los pigmentos azules en diversos objetos de arte medieval altoaragonés, intentando discriminar el uso de aerinita, azurita, cobalto e incluso lapislázuli. La presencia de cobalto en cerámicas y de azurita en pinturas se da por establecida. Se sospecha la de aerinita (mineral altoaragonés) en algunas tablas góticas y se especula sobre el uso de lapislázuli.

PALABRAS CLAVE Aerinita. Patrimonio artístico. pXRF. Alto Aragón.

ABSTRACT In this article we use portable X-ray fluorescence spectroscopy to study the elemental composition of the blue pigments in various medieval works of art from Alto Aragón, trying to distinguish the use of aerinite, azurite, cobalt and even lapis lazuli. The presence of cobalt in ceramics and azurite in paintings has been established. The presence of aerinite, a mineral from Alto Aragón, is suspected in some Gothic paintings, and there is speculation about the use of lapis lazuli.

KEYWORDS Aerinite. Heritage. pXRF. Alto Aragón (Spain).

¹ Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Carretera de Cuarte, s/n. E-22071 Huesca. manso@unizar.es, cuchi@unizar.es

² Museo Diocesano Barbastro-Monzón. Plaza del Palacio, 1. E-22300 Barbastro. mpuertolas@museodiocesano.es, sayerbe@museodiocesano.es

³ Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrícolas. Universidad de Valladolid. Avenida de Madrid, 44. E-34004 Palencia. pmr@uva.es

INTRODUCCIÓN

La aerinita es un mineral de color azul intenso, poco común, producto de la alteración de los basaltos. Fue identificada y denominada por Arnold von Lasaulx en 1876 en la colección de minerales de la Universidad de Breslavia, entonces Alemania (hoy Wrocław, Polonia), donde era profesor. Según Azambre y Monchoux (1988), el mineral fue llamado inicialmente *vivianite*. La muestra fue vendida como un supuesto mineral de cobalto procedente del Pirineo por el comerciante en minerales Theodor Schuchardt (Calvo, 2017; <<https://museonat.es/aerinita-enigmatico-mineral-del-pirineo>>). Es digno de reseñar el interés, al menos desde el siglo XVIII, del cobalto de San Juan de Plan en Centroeuropa, pero ello merece un trabajo específico.

Prácticamente al mismo tiempo, los ingenieros de Minas Lucas Mallada y Luis Mariano Vidal visitaron juntos un afloramiento de “ofitona” en Estopiñán del Castillo y Caserras. En este el primero señaló “costras de asbesto teñido de azul por carbonato de cobre” (Mallada, 1878). En carta a su amigo Vidal, del 23 de febrero de 1882, escribía:

debo decirte que es en la ofita de Caserras, sobre la derecha del río, donde abundan las costras azuladas de carbonato de cobre que tiñen las caras de fractura, haya o no en ellas una sustancia fibrosa (asbesto?). La pirita de cobre no la he notado. Creo que es a la ofita de Caserras a la que te refieres pues, si no recuerdo mal, allí pasamos juntos con Vicens, yendo desde Tamarite a Estopiñán, donde pernoctamos.

De todos modos, yo buscaré el cuaderno y te lo mandaré en cuanto dé con él. (Aragónés, 2017)

Vidal tomó algunas muestras e hizo hacer láminas delgadas que envió a Mallada, quien a su vez las pasó a José Macpherson en febrero de 1882. Vidal calificó adecuadamente el mineral como aerinita (Vidal, 1882).

Este mineral, alteración hidrotermal de ofitas (basaltos toleíticos / doleiritas) que aparece rellenando estrechas fisuras, se encuentra en el Alto Aragón en El Grado, Juseu, Caserras, Estopiñán, Camporrells y Saganta. También en Lérida (Pont de Suert, Gerri de la Sal, Tartareu y Avellanes). Posteriormente, ha sido reconocida en diversos afloramientos de ofita en el Pirineo y la cordillera Cantábrica, así como en Saint-Pandelon (Francia), Ourika (Marruecos) y Gunsight Mountains (Arizona, EE. UU.).

Mineralogía de la aerinita

Como señalan Besteiro y cols. (1982), desde su descubrimiento hubo controversia sobre su origen y su naturaleza. Estos autores utilizaron difracción de rayos X, comportamiento térmico, espectroscopía infrarroja y microsonda sobre muestras de la zona de Estopiñán. Unos años más tarde ampliaron la información presentando una formulación $\text{Ca}_2\text{-(Mg}_{0,7}\text{Fe}^{3+}_{1,7}\text{Al}_{1,1})\text{-[Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}\text{]-16 H}_2\text{O}$ y adscribiendo el mineral al grupo de las zeolitas (Besteiro y cols., 1982). Resulta destacable la ausencia de cobre. Una paragénesis similar con una composición ligeramente diferente, con presencia de manganeso, fue propuesta para la aerinita de Saint-Pandelon (Azambre y Monchoux, 1988). Rius y cols. (2004) determinaron la estructura de la aerinita azul de Estopiñán mediante difracción de rayos X sincrotrón sobre polvo y otras técnicas, y obtuvieron una fórmula más compleja:



El tema se complica por la identificación de una variedad de aerinita rica en hierro III en Tartareu (Rius y cols., 2009). La estructura llama la atención científica y cada vez se utilizan técnicas más modernas y sofisticadas, como en Nihtianova y cols. (2004) y Frost y cols. (2015). Para más complejidad, la aerinita pasa a un color amarillo marrón al elevarse la temperatura, asunto que se ha estudiado en Sijena (Ibáñez-Insa y cols., 2012). La estructura de esta alteración ha sido determinada por Crespi y cols. (2019).

Pero, fuera cual fuere su composición y su estructura, la aerinita ha tenido un uso prácticamente exclusivo como pigmento hasta casi el inicio del siglo XIX, sobre todo en el entorno pirenaico.

Los pigmentos azules antiguos

El color azul es ampliamente usado en pintura medieval y moderna, con un sentido profundo en las de tipo religioso.

En la antigüedad la mayoría de los pigmentos azules utilizados en pintura eran de tipo inorgánico, índigo aparte, en muchos casos de origen mineral. Como señalan Calvo (2017) y Kovalev y cols. (2023), las alternativas

eran lapislázuli (*azul ultramar*), azurita (*Lapis armenius*) y el llamado *azul egipcio*. Otra alternativa sería utilizar minerales de cobalto.

El primero, de alto precio, se obtenía históricamente, y aún se extrae, en minas de la cuenca del río Kokcha, en Badajshán (Afganistán) y en el cercano Tayikistán, conocido históricamente como Sogdiana. Contiene el mineral lazurita ($\text{Na}_8[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}]\text{S}_n$). Muy apreciado como piedra semipreciosa, fue imitado, por ejemplo, en la máscara funeraria de Tutankamón. Reducido a polvo fino, se utilizó en códices miniados o en lugares muy señoriales como la Sainte-Chapelle de París, construida entre 1242 y 1248 (Moulin, 2018). A principios del siglo XIX Jean-Baptiste Guimet obtuvo una versión sintética conocida como *azul ultramar sintético*. También se ha encontrado en Chile.

La azurita ($2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}[\text{OH}]_2$) es mucho más común y barata. En el Alto Aragón se encuentra, acompañando a la malaquita ($\text{CuCO}_3 \cdot [\text{CuOH}]_2$), en la franja minera del pie meridional del Prepirineo central (Calvo y cols., 1988; Calvo, 2008). El primer mineral, de color azul, se altera en contacto con el ambiente y se transforma en el segundo, de color verdoso, por descarbonatación.

El azul egipcio ($\text{CaOCuO}[\text{SiO}_2]_4$), conocido en época romana como *caeruleum*, es un silicato de cobre artificial fabricado en el Egipto faraónico. Aparentemente, dejó de fabricarse después de la época romana.

Una posibilidad alternativa sería el uso de sales de cobalto. Se conoce su uso desde el antiguo Egipto. En el siglo XVIII se hizo famosa la mina de San Juan de Plan, visitada por diversos sabios e inversores. El mineral, la cobaltina, un sulfoarseniuro de cobalto, se ha utilizado para pintura de porcelanas. El mineral de San Juan va asociado a sales de níquel. Aunque se supone descubierta la mina en el siglo XVIII, hay indicios de que quizás se usara anteriormente.

En algún momento durante la Edad Media se comenzó a utilizar también la aerinita como pigmento azul sobre murales o tablas. Como hipótesis se puede pensar que lo fuera cerca de la zona de sus yacimientos más conocidos. Al parecer, las primeras noticias sobre su uso en pinturas románicas fueron los trabajos de Porta y cols. (1990) y Palet y Andrés (1991), que detectaron aerinita en pinturas románicas de la provincia de Lérida y en

las de Sijena. Mencionan las pinturas del Museo Diocesano de Jaca, pero luego no las incluyen en los lugares detectados. Al año siguiente amplían la lista y sitúan a Sijena en la provincia *de Zaragoza...* (Palet y Andrés, 1992). Luego se detectó su uso en Nogaro y Moissac, en el sur de Francia (Daniel y cols., 2008). Estos autores estudiaron aerinitas de diversas procedencias y también mencionaron las de Sijena. Castiñeiras (2008) refiere el uso de aerinita en los frontales de los Apóstoles de La Seu d'Urgell y de Sant Martí de Ix (Cerdaña). Campuzano y cols. (2010) lo señalan en la *Majestad Batlló*, una talla de Cristo triunfante en la cruz de mediados del siglo XII expuesta en el Museu Nacional d'Art de Catalunya, pero acompañado por azurita y lapislázuli. Pagès (2013) lo observa en Sant Martí Sescorts (El Esquirol, Osona). Pérez-Arantegui y cols. (2013) identifican este mineral en las pinturas de San Juan Bautista de Ruesta, hoy en el Museo Diocesano de Jaca. La utilización de aerinita fue abundante en frescos del románico y del gótico del área pirenaica. Se ha sugerido que su uso era muy local. Así, Edwards y cols. (2001) no lo detectan en San Baudelio de Casillas (Soria). Sin embargo, más recientemente se ha señalado este mineral en pinturas en San Martín de Elines (Cantabria) (De Ávila, 2013) y en la abadía benedictina de Novalesa, en el Piamonte italiano (Aceto y cols., 2019). No se sabe bien cuándo dejó de usarse. Según Salvadó y cols. (2014), no aparece en cuadros del siglo XV de Cataluña y de Valencia. Prieto y cols. (2017) sugieren su uso en una cerámica de lujo gallega datable en los siglos XVI-XVII.

Una interesante referencia, que necesitaría comprobación analítica, menciona un pigmento *verde de Juseu* en una carta de fray Manuel Bayeu para su empleo, a finales del siglo XVIII, en los frescos de la cartuja de las Fuentes (Sariñena), quizá la obra pictórica más importante de ese siglo en el Alto Aragón. Bayeu incluso sugiere que fue utilizada en el Pilar de Zaragoza (Calvo, dir. cient., 2018). Avalan esta posibilidad el hecho de que la aerinita puede presentarse en tono azul verdoso y que Garrido (1942) situara ese mineral a 1,5 kilómetros al sureste de Juseu.

La determinación de aerinita como pigmento no es fácil, ya que requiere tomas de muestras y métodos sofisticados con equipos hasta ahora no portátiles (Salvadó y cols., 2008; Clark y cols., 2010; Frost y cols., 2015; Pérez-Arantegui y cols., 2013). En general, son trabajos lentos, caros y

sobre obras muy singulares. Sin embargo, el desarrollo en tiempos recientes de equipos portátiles XRF y Raman permite multiplicar los estudios *in situ*, léase sin necesidad de muestreo y sin mover las piezas de los museos (Constantini y cols., 2018).

Aprovechando la disponibilidad de un equipo pXRF en la Escuela Politécnica Superior de Huesca, que ha sido utilizado sobre diversas obras de arte altoaragonesas, pinturas rupestres en el Prepirineo y pinturas murales románicas y cuadros de los siglos XV y XVI, en los museos diocesanos de Huesca y de Barbastro, se ha decidido estudiar la posibilidad de utilizar las mediciones XRF como un *proxi* sobre la posible presencia de aerinita como pigmento en obras locales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Equipo de medición

La presencia de elementos con número atómico igual o superior al del magnesio ha sido detectada por mediciones realizadas mediante un espectrómetro de rayos X portátil modelo Niton™ XL3t GOLDD+ de Thermo Fisher Scientific (Waltham, Massachusetts, EE. UU.), empleando el modo de medida *mining*, con tiempos de detección superiores a 120 segundos y una apertura del colimador de 3 milímetros. Los elementos con número atómico inferior al del magnesio (como el carbono, el oxígeno o el sodio), que el equipo no es capaz de determinar, quedan clasificados como *bal*.

Material analizado

Se han analizado varios conjuntos de piezas mediante la técnica pXRF. Por un lado, doce muestras de aerinita de la cantera de La Soriana (Estopiñán) y tres de lapislázuli (una adquirida en Punta Arenas, Chile, y dos obtenidas de vendedores locales en Kabul, Afganistán).

Asimismo, se han analizado diversos objetos de arte altoaragoneses, como fragmentos de cerámica procedentes de la abadía de Montearagón, varios capiteles de la Sala de Doña Petronila en el Museo de Huesca, así como un crismón y varios retablos medievales del Museo Diocesano Barbastro-Monzón.

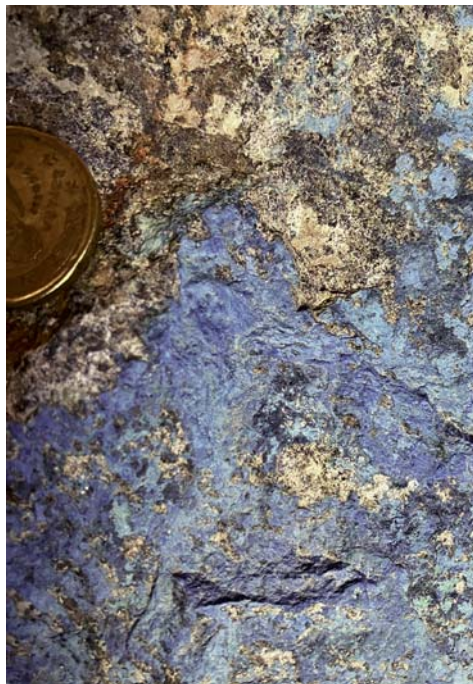


Fig. 1. Aerinita en diaclasas de ofita. Moneda de 5 céntimos como escala. Estopiñán del Castillo. (Museo de Ciencias Naturales de la Universidad de Zaragoza)



Fig. 2. Lapislázuli afgano. La banda metálica en la zona inferior es pirita. Nótese el intenso color azul de la luz reflejada.

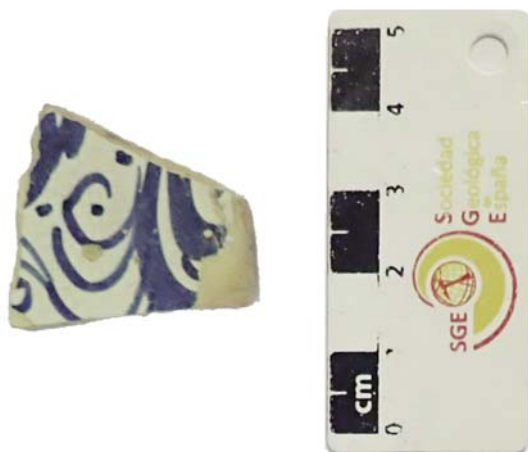


Fig. 3. Ejemplo de cerámica procedente de una escombrera en Montearagón, de origen y edad desconocidos, quizás del siglo XVIII.



Fig. 4. Análisis mediante pXRF en un capitel de la Sala de Doña Petronila del Museo de Huesca.

Los fragmentos de cerámica se recogieron en una escombrera reciente en el arranque de la pista al castillo de Montearagón (concretamente, en el collado de la pista Quicena – Fornillos). La figura 3 presenta un ejemplo seleccionado por su color azul. Evidentemente, están fuera de contexto y su edad y su origen son desconocidos.

Por otro lado, en el marco de los trabajos de restauración realizados en los capiteles de la Sala de Doña Petronila del Museo de Huesca, se tomaron medidas mediante pXRF (fig. 4), de las que se presentan algunos datos de pigmentos verdes y azules.

En el Museo Diocesano Barbastro-Monzón se ha realizado un estudio intensivo. En el presente artículo se presentan los resultados de un crismón, del retablo de Santa Margarita de Portaspana y de un conjunto de medidas de pigmentos verdes y azules de otros cuadros, del frontal de Buira y del ábside románico de Vio.



Fig. 5. Crismón en el Museo Diocesano Barbastro-Monzón.

El crismón (fig. 5) es una preciosa pieza de forma rectangular realizada en el siglo XIII. Actualmente en el Museo Diocesano Barbastro-Monzón, se desconoce su ubicación original. Presenta el monograma de Cristo en griego, formado por las dos primeras letras de su nombre, X y P. La pieza destaca por la calidad de la talla, de gran profundidad, finura de ejecución y preciosismo, pero sobre todo por la policromía con la que ha llegado a la actualidad. Se completa con la primera y última letras del alfabeto griego, alfa y omega, que aluden a la infinitud de Dios, principio y fin de todas las cosas, y que penden de un travesaño central alusivo a la cruz de Cristo. El conjunto se encierra en un círculo, símbolo de la inmutabilidad y la perfección divinas. Dos ángeles sujetan el crismón mientras pisan dos mantícoras que encarnan el mal.

El retablo de Santa Margarita de Portaspana es una obra al temple sobre tabla atribuida al taller de Pedro García de Benabarre y fechada en el último cuarto del siglo XV. El retablo está compuesto por una predela, un cuerpo y un remate. En la primera, ausente en la figura 6, a ambos lados están san Blas y san Francisco, y en el centro, Cristo Varón de Dolores rodeado de la Virgen y san Juan. En el cuerpo, en la tabla central, la Virgen en un trono ofrece una rosa al Niño, que porta un colgante de coral rojo; a su izquierda, san Fabián, y a la derecha, un san Sebastián vestido. Remata el conjunto un calvario.



Fig. 6. Retablo de Santa Margarita de Portaspana. Taller de Pedro García de Benabarre. Último cuarto del siglo xv. Temple sobre tabla. (Museo Diocesano Barbastro-Monzón)

Además de este retablo, que se ha estudiado con alguna profundidad, se decidió incluir una serie de medidas mediante pXRF en otras piezas del Museo Diocesano Barbastro-Monzón. Son los resultados de un estudio más amplio que será objeto de otra publicación. Para este artículo se han reco-

pilado los datos de zonas verdes y azules de diversas tablas (san Sebastián en el retablo de santa Margarita de Portaspana, san Miguel de Vio, calvario de Tamarite, san Miguel de Graus, azote de Cristo, san Antonio Abad y san Cristóbal de Santaliestra) de los siglos XIV y XV, del frontal de Buira y del ábside románico de Villamana.

RESULTADOS

Tabla 1. Composición elemental mediante pXRF, en método *mining*, de muestras de aerinita de la cantera de La Soriana (Estopiñán del Castillo). Resultados, en porcentaje.

Tiempo de medida, superior a 1 minuto. <LOD: por debajo del límite de detección del equipo. 0,00: por debajo de 0,01 %. *Bal*: suma de elementos con número atómico inferior al magnesio (C, H, N, Na).

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
<i>Ba</i>	0,03	0,03	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,02	0,05	0,01	0,03
<i>Bal</i>	59,65	63,48	61,81	62,05	56,,77	69,12	66,50	65,08	58,69	64,64	62,86	61,96
<i>Zr</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	<LOD	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
<i>Sr</i>	0,07	0,04	0,04	0,07	0,09	0,03	0,07	0,10	0,09	0,03	0,05	0,07
<i>As</i>	<LOD	<LOD	<LOD	0,00	0,00	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,01
<i>Zn</i>	0,00	<LOD	0,00	0,00	<LOD	0,01	<LOD	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
<i>Cu</i>	<LOD	<LOD	<LOD	0,01	<LOD	0,01	<LOD	0,02	<LOD	0,01	<LOD	0,01
<i>Ni</i>	<LOD	<LOD	<LOD	0,01	<LOD	<LOD	<LOD	0,06	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
<i>Fe</i>	7,20	6,59	7,05	8,00	7,46	7,23	4,21	7,91	7,17	6,15	6,45	7,67
<i>Mn</i>	0,15	0,13	0,07	0,62	0,02	0,09	0,02	1,70	0,23	0,18	0,08	0,28
<i>Cr</i>	0,02	0,03	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,04
<i>V</i>	0,03	0,03	0,04	0,06	0,03	0,03	0,02	0,04	0,04	0,04	0,03	0,09
<i>Ti</i>	0,31	0,19	0,38	0,20	0,10	0,20	0,13	0,17	0,21	0,37	0,24	0,18
<i>Ca</i>	9,01	8,61	8,45	6,63	7,58	5,84	9,06	5,52	7,22	7,69	7,19	6,96
<i>K</i>	0,14	0,12	0,22	0,38	0,29	0,35	0,11	0,17	0,23	0,26	0,42	0,29
<i>Al</i>	5,71	4,65	4,57	4,84	7,11	3,26	4,49	2,32	6,81	4,81	5,26	5,00
<i>P</i>	0,03	<LOD	<LOD	0,07	0,03	<LOD	<LOD	0,12	0,05	0,04	0,03	0,04
<i>Si</i>	16,54	15,28	15,93	15,79	18,86	13,10	13,78	15,78	18,22	15,51	15,67	16,01
<i>Cl</i>	<LOD	<LOD	0,08	<LOD	<LOD	0,06	<LOD	<LOD	<LOD	0,04	0,05	0,01
<i>S</i>	0,35	0,17	0,12	0,32	0,41	<LOD	0,31	0,46	0,21	0,17	0,17	0,22
<i>Mg</i>	0,76	0,64	1,19	0,87	1,19	0,62	1,24	0,50	0,78	<LOD	1,48	1,15

No se detectan Sb, Sn, Pd, Ag, Au, Pb, W, Cd, Mo, Nb, Se, Hg ni Co.

Tabla II. Composición elemental mediante pXRF, en método *mining*, de cinco muestras de lapislázuli. Muestra 1, procedente de Chile; 2 a 4, de Afganistán. Resultados, en porcentaje. Tiempo de medida, superior a 1 minuto. <LOD: por debajo del límite de detección del equipo. *Bal*: suma de elementos con número atómico igual o inferior al magnesio (C, H, N, Na).

	<i>LP1</i>	<i>LP2</i>	<i>LP3</i>	<i>LP4</i>
Origen	<i>Chile</i>	<i>Afganistán</i>		
<i>Ba</i>	0,031	0,064	0,095	0,203
<i>Bal</i>	42,623	67,041	62,043	64,078
<i>Nb</i>	<LOD	0,002	<LOD	<LOD
<i>Zr</i>	0,005	0,008	0,017	0,017
<i>Sr</i>	0,016	0,005	0,008	0,012
<i>Rb</i>	<LOD	0,008	0,002	0,004
<i>As</i>	<LOD	<LOD	0,017	0,002
<i>Pb</i>	0,011	<LOD	0,029	0,021
<i>Zn</i>	0,005	<LOD	0,027	0,005
<i>Cu</i>	<LOD	<LOD	0,007	0,008
<i>Fe</i>	0,744	0,015	0,245	0,576
<i>Mn</i>	0,025	<LOD	<LOD	<LOD
<i>Cr</i>	0,007	<LOD	0,007	0,009
<i>V</i>	0,012	0,012	0,018	0,018
<i>Ti</i>	0,118	0,663	0,187	0,242
<i>Ca</i>	25,435	4,668	7,779	7,607
<i>K</i>	0,165	3,285	1,626	2,718
<i>Al</i>	4,167	3,56	4,475	3,83
<i>P</i>	0,314	0,975	0,102	0,212
<i>Si</i>	21,988	13,885	17,324	16,478
<i>Cl</i>	0,028	0,188	0,301	0,421
<i>S</i>	3,44	1,914	3,74	2,275
<i>Mg</i>	0,863	3,704	1,937	1,265

No se detectan Sb, Sn, Cd, Pd, Ag, Mo, Bi, Se, Hg, Au, W, Ni ni Co.

Tabla III. Composición elemental mediante pXRF, en método *mining*, de pigmentos en cerámicas procedentes de una escombrera en Montearagón. Resultados, en porcentaje. Tiempo de medida, superior a 1 minuto. <LOD: por debajo del límite de detección del equipo. *Bal*: suma de elementos con número atómico inferior al magnesio (C, H, N, Na).

Color	Blanca	Convexa blanca	Cóncava azul oscuro	Cóncava azul claro	Azul	Interior
<i>Ba</i>	0,173	0,202	0,211	0,171	0,139	0,073
<i>Sn</i>	1,66	1,736	1,891	2,04	2,926	0,071
<i>Cd</i>	0,008	0,009	0,008	<LOD	<LOD	<LOD
<i>Pd</i>	<LOD	<LOD	0,004	0,003	<LOD	<LOD
<i>Ag</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,008	<LOD
<i>Bal</i>	34,091	36,203	30,219	34,434	30,234	61,79
<i>Nb</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,002
<i>Zr</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,012
<i>Sr</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,025
<i>Rb</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,007
<i>As</i>	1,354	1,574	1,984	1,735	<LOD	<LOD
<i>Pb</i>	18,195	19,243	24,983	23,162	2,221	1,245
<i>Zn</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,006
<i>Cu</i>	0,013	0,016	0,03	0,02	0,029	<LOD
<i>Ni</i>	0,03	0,021	0,111	0,041	0,934	<LOD
<i>Co</i>	0,013	0,014	0,393	0,137	0,93	<LOD
<i>Fe</i>	0,174	0,133	0,789	0,39	0,476	2,99
<i>Mn</i>	0,052	0,042	0,063	0,045	0,074	0,047
<i>Cr</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,009
<i>V</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,01
<i>Ti</i>	0,036	0,042	0,016	0,012	0,034	0,227
<i>Ca</i>	0,753	0,384	0,867	0,406	1,927	12,568
<i>K</i>	1,802	1,798	1,185	1,265	1,056	1,539
<i>Al</i>	2,72	2,496	3,106	1,96	2,09	3,807
<i>P</i>	0,427	0,378	0,491	0,441	0,36	0,138
<i>Si</i>	26,772	24,408	21,505	20,737	14,798	14,747
<i>Cl</i>	0,223	0,228	0,266	0,273	0,428	0,024
<i>S</i>	10,345	10,143	10,726	11,296	11,918	0,663
<i>Mg</i>	1,159	0,923	1,137	1,419	1,288	<LOD

No se detectan Sb, Mo, Bi, Hg, W ni Au.

Tabla iv. Composición elemental mediante pXRF, en método *mining*, de pigmentos en los capiteles de la Sala de Doña Petronila (Museo de Huesca). CX: número de capitel, comenzando frente a la puerta de acceso. Resultados, en porcentaje. Tiempo de medida, superior a 1 minuto. <LOD: por debajo del límite de detección del equipo. *Bal*: suma de elementos con número atómico inferior al magnesio (C, H, N, Na).

Capitel	C1	C1	C2	C2	C4	C4	C9	Sillar nuevo
	<i>Azul</i>	<i>Verde</i>	<i>Verde</i>	<i>Verde</i>	<i>Verde</i>	<i>Verde</i>	<i>Verde</i>	
<i>Ba</i>	0,091	0,123	0,067	0,099	0,127	0,124	0,071	0,05
<i>Bal</i>	62,256	56,669	52,702	42,71	41,234	45,113	55,112	51,862
<i>Zr</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,006
<i>Sr</i>	0,022	0,12	0,287	0,236	0,009	0,071	0,026	0,029
<i>Rb</i>	0,002	<LOD	0,004	0,002	<LOD	<LOD	0,004	<LOD
<i>As</i>	0,762	0,937	0,263	0,782	1,357	1,225	0,613	<LOD
<i>Pb</i>	5,347	8,321	1,952	7,982	14,082	8,539	3,439	<LOD
<i>W</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,057	<LOD
<i>Cu</i>	2,564	4,212	0,708	2,989	2,151	1,226	0,758	<LOD
<i>Co</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,024	<LOD	<LOD
<i>Fe</i>	0,785	0,823	1,334	0,778	0,45	0,46	0,846	1,176
<i>Mn</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,033	0,035	<LOD
<i>Cr</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,009	0,008
<i>Ti</i>	0,067	0,107	0,1	0,076	0,047	0,023	0,067	0,127
<i>Ca</i>	8,983	11,91	17,669	18,226	17,133	14,723	14,574	21,999
<i>K</i>	0,694	0,741	0,472	0,53	0,351	0,205	0,413	0,539
<i>Al</i>	1,277	1,971	0,901	1,145	0,74	1,086	1,433	1,382
<i>P</i>	0,214	0,277	0,104	<LOD	<LOD	0,161	0,161	<LOD
<i>Si</i>	4,161	5,913	3,242	2,752	2,599	2,659	4,277	12,588
<i>Cl</i>	3,035	1,197	0,29	0,496	0,855	1,09	0,451	0,037
<i>S</i>	8,036	6,647	19,851	21,134	18,864	22,083	17,648	10,192
<i>Mg</i>	1,68	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

No se detectan Sb, Sn, Cd, Pd, Ag, Mo, Nb, Bi, Se, Hg, Au, Zn ni V.

Tabla v. Composición elemental mediante pXRF, en método *mining*, de pigmentos en el crismón de Barbastro (Museo Diocesano Barbastro-Monzón). Resultados, en porcentaje. Tiempo de medida, superior a 1 minuto. <LOD: por debajo del límite de detección del equipo. *Bal*: suma de elementos con número atómico inferior al magnesio (C, H, N, Na).

Detalle	Arriba, izquierda, vertical, dentro	Fuera	Pierna	Fuera, abajo, derecha
Color	<i>Azul</i>	<i>Rojo</i>	<i>Marrón</i>	<i>Dorado</i>
<i>Ba</i>	0,06	0,10	0,03	0,12
<i>Sn</i>	<LOD	0,95	0,02	0,01
<i>Ag</i>	<LOD	<LOD	0,02	<LOD
<i>Bal</i>	62,24	54,89	66,37	58,84
<i>Zr</i>	<LOD	0,01	<LOD	0,01
<i>Sr</i>	0,04	0,61	0,10	1,11
<i>Rb</i>	<LOD	<LOD	<LOD	0,00
<i>As</i>	1,25	0,37	0,10	0,11
<i>Hg</i>	<LOD	1,44	<LOD	<LOD
<i>Au</i>	<LOD	<LOD	<LOD	0,37
<i>Pb</i>	6,88	1,33	0,41	0,41
<i>W</i>	0,06	0,34	<LOD	0,35
<i>Zn</i>	<LOD	0,02	<LOD	<LOD
<i>Cu</i>	0,03	0,01	0,01	<LOD
<i>Ni</i>	0,02	<LOD	<LOD	<LOD
<i>Co</i>	0,01	<LOD	<LOD	<LOD
<i>Fe</i>	0,14	0,26	0,56	0,67
<i>Mn</i>	0,03	0,06	<LOD	<LOD
<i>Cr</i>	<LOD	<LOD	<LOD	0,02
<i>Ti</i>	<LOD	0,02	0,06	0,07
<i>Ca</i>	4,58	5,71	13,53	11,60
<i>K</i>	0,28	0,27	0,48	0,52
<i>Al</i>	0,72	0,70	0,81	1,17
<i>P</i>	0,41	4,16	0,12	6,55
<i>Si</i>	2,81	2,38	3,33	4,57
<i>Cl</i>	1,40	0,69	0,46	0,46
<i>S</i>	18,13	25,06	13,62	13,01
<i>Mg</i>	0,92	<LOD	<LOD	<LOD

No se detectan Sb, Cd, Pd, Mo, Nb, Se, Bi ni V.

Tabla vi. Composición elemental mediante pXRF, en método *mining*, de pigmentos en pintura del retablo de Santa Margarita de Portaspana, en el Museo Diocesano Barbastro-Monzón. Resultados, en porcentaje. Tiempo de medida, superior a 1 minuto. <LOD: por debajo del límite de detección del equipo. *Bal*: suma de elementos con número atómico inferior al magnesio (C, H, N, Na). SS: figura de san Sebastián en el retablo de santa Margarita de Portaspana.
 Coordenadas desde la esquina inferior izquierda de la pintura de cada figura.

Cuadro		Santa Margarita de Portaspana															
X	113	106	103	96	71	27	21	47	63	57	74	65	67	28	46	110	106
Y	97	97	97	97	97	97	83	83	83	83	64	37	37	38	38	38	8,00
	SS	SS	SS	SS	Virgen	Virgen	Papa	Virgen	Virgen	Virgen	Niño	Virgen	Virgen	Papa	Virgen	SS	SS
Detalle	Gorro	Oro	Pardo		Aureola	Manto	Mejilla	Árbol	Mejilla	Aureola	Colgante	Manto			Cojín	Manto	Zapato
Color	Rojo	Oro	Pardo	Azul claro	Oro	Azul oscuro	Carne	Verde	Carne	Rojo	Rojo	Azul	Blanco	Morado	Rojo	Verde	Rojo
<i>Ba</i>	0,01	<LOD	<LOD	0,02	<LOD	0,01	0,01	0,01	0,04	<LOD	0,02	0,03	0,03	0,05	0,04	<LOD	0,04
<i>Sn</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,01	<LOD
<i>Ag</i>	<LOD	0,00	<LOD	<LOD	0,00	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,00	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
<i>Bal</i>	77,81	71,05	70,72	72,65	68,61	66,62	68,92	69,50	67,91	71,14	64,37	56,14	67,35	65,52	66,14	72,28	61,93
<i>Sr</i>	0,07	0,08	0,09	0,09	0,10	0,12	0,08	0,13	0,07	0,06	0,07	0,04	0,05	0,08	0,07	0,07	0,03
<i>Rb</i>	<LOD	0,00	<LOD	<LOD	0,00	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
<i>As</i>	0,71	0,02	2,14	1,00	0,01	2,14	1,18	0,97	1,49	0,01	0,54	0,28	1,48	1,53	1,60	0,42	1,48
<i>Hg</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,03	<LOD	0,03	0,34	0,87	<LOD	<LOD	0,05	<LOD	<LOD	0,96
<i>Au</i>	<LOD	0,75	<LOD	<LOD	0,41	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,29	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
<i>Pb</i>	3,34	0,03	0,04	5,01	0,03	0,08	6,06	0,26	8,62	0,04	2,50	9,38	9,51	9,59	10,30	3,58	6,70
<i>W</i>	0,03	0,62	<LOD	0,03	0,36	0,03	0,05	<LOD	0,04	0,37	0,22	0,05	0,04	<LOD	<LOD	0,02	0,26
<i>Zn</i>	<LOD	<LOD	0,01	<LOD	<LOD	0,00	<LOD	0,00	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,01	0,01	<LOD	0,04
<i>Cu</i>	0,02	<LOD	<LOD	0,00	<LOD	<LOD	0,01	0,00	0,01	<LOD	<LOD	12,90	0,02	0,02	0,03	5,53	0,03

Tabla vii. Composición elemental mediante pXRF, en método *mining*, de pigmentos en diversas obras de arte en el Museo Diocesano Barbastro-Monzón. Resultados, en porcentaje. Tiempo de medida, superior a 1 minuto. <LOD: por debajo del límite de detección del equipo. *Bal*: suma de elementos con número atómico inferior al magnesio (C, H, N, Na). SMP: Santa Margarita de Portaspaña. SS: figura de san Sebastián en el retablo de santa Margarita de Portaspaña. SMV: san Miguel de Vio. CT: calvario de Tamarite. SMG: san Miguel en Graus. AC: azote de Cristo. SAA: san Antonio Abad. CRB: crismón de Barbastro. SCS: san Cristóbal de Santaliestra. ARV: ábside románico de Villamana. FB: frontal de Buira.

Número	4801	4803	4816	4841	83	102	103	373	865	1083	1099	1134	1143	1144	1145	1146	1147	1149
Cuadro	SMP	SMP	CRB	SMV	CT	SMG	SMG	AC	SAA	CRB	SCS	ARV	FB	FB	FB	FB	FB	FBa
X	96	27		36	32	18	17	37	10	Arriba, izda.	61, desde la izda.	Junto a torre roja: a las cinco estrellas	Trono parte izda.	Fondo a la izda. abajo	Lado dcho. cenefa arriba punto	Lado dcho. cenefa abajo centro	Lado dcho. capileta abajo centro	Hombro abad figura central
Y	97	97		7	84	40	33	35	85									
Detalle	SS			Ángel fucsia	Cielo	Cielo	Cielo	Prado	Codo santo izda.	Vertical dentro	Campo							
Color	Azul claro	Azul oscuro	Azul	Fucsia	Azul	Azul oscuro	Azul claro	Verde	Verde	Azul	Azul oscuro	Azul	Azul	Azul	Azul oscuro	Azul claro	Azul	Azul claro
Ba	0,015	0,007	0,041	0,039	0,052	0,031	0,017	0,014	<LOD	0,06	<LOD	<LOD	<LOD	0,372	<LOD	<LOD	0,005	<LOD
Sn	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,049	<LOD	<LOD	0,894	<LOD	0,002	0,003	0,016	0,013	0,003	0,087
Cd	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,008	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,003
Bal	72,65	66,616	64,644	73,947	65,07	72,5	72,262	80,29	79,866	62,237	77,436	74,313	70,933	84,383	72,233	78,106	80,012	71,487
Sr	0,086	0,122	0,044	0,066	0,044	0,098	0,102	0,063	0,029	0,042	0,091	0,016	0,031	0,045	0,038	0,023	0,017	0,028
Bi	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
As	0,997	2,136	0,179	0,522	1,568	0,803	0,843	0,726	0,538	1,245	0,012	0,527	0,227	<LOD	0,386	0,102	0,096	0,338
Hg	<LOD	<LOD	<LOD	0,002	0,002	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,002	<LOD	0,004	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Pb	5,012	0,075	1,622	3,391	9,782	3,7	3,86	3,979	2,36	6,875	0,037	2,855	0,022	0,028	0,019	0,007	0,144	0,018

W	0,032	0,027	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,033	0,026	0,056	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Zn	<LOD	0,003	0,008	0,656	<LOD	0,004	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,018	0,004	0,985	0,004	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,004
Cu	0,004	<LOD	0,96	0,016	0,063	0,083	0,016	0,991	0,008	0,026	0,473	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	
Ni	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,018	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,015	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	
Co	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,015	<LOD	<LOD	<LOD	0,012	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	
Fe	0,024	0,196	0,332	0,072	0,152	0,066	0,062	0,077	0,124	0,142	0,752	0,181	0,147	1,044	0,12	0,068	0,131	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	
Mn	0,016	<LOD	0,075	0,017	0,036	0,02	0,024	<LOD	<LOD	0,033	0,092	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	
Cr	<LOD	<LOD	<LOD	0,009	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,006	<LOD	0,067	0,43	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,003	
V	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,007	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	
Ti	<LOD	0,034	0,041	0,39	<LOD	<LOD	<LOD	0,008	<LOD	<LOD	0,048	0,201	0,028	1,766	0,018	0,02	0,02	0,028	0,028	0,02	0,02	0,028	
Ca	1,383	13,418	24,575	6,981	1,846	3,557	2,37	3,646	2,232	4,575	7,636	10,326	10,886	3,952	11,598	8,51	6,26	11,686	6,26	6,26	6,26	11,686	
K	0,035	0,214	0,322	0,139	0,311	0,06	0,048	0,385	0,165	0,282	0,422	0,092	0,238	0,066	0,21	0,104	0,309	0,213	0,309	0,309	0,309	0,213	
Al	0,387	0,344	0,492	0,093	0,622	0,367	0,207	0,518	0,311	0,722	0,685	0,283	0,865	0,727	0,348	0,123	0,481	0,681	0,481	0,481	0,481	0,681	
P	0,495	0,055	<LOD	0,107	0,512	0,475	0,486	0,257	0,488	0,407	0,589	0,758	0,271	0,016	0,143	0,032	0,132	0,163	0,132	0,132	0,132	0,163	
Si	1,444	1,437	1,607	0,469	2,493	1,438	1,34	1,952	1,455	2,809	2,676	1,554	2,501	2,256	1,294	0,642	1,841	1,871	1,841	1,841	1,841	1,871	
Cl	0,695	0,124	0,484	0,859	0,436	0,317	0,361	0,292	0,498	1,401	0,256	0,531	0,119	0,108	0,094	0,093	0,322	0,112	0,093	0,093	0,322	0,112	
S	16,087	13,648	4,554	12,226	16,161	16,145	17,231	6,722	11,427	18,126	7,879	7,951	13,033	3,8	12,883	12,151	9,781	13,174	9,781	9,781	9,781	13,174	
Mg	0,625	1,542	<LOD	<LOD	0,792	<LOD	0,748	<LOD	0,464	0,924	<LOD	0,37	0,623	<LOD	0,595	<LOD	0,434	<LOD	0,434	0,434	0,434	<LOD	

No se detectan Sb, Pd, Ag, Mo, Ag, Nb, Zr, Rb, Se ni Au.

DISCUSIÓN

Aerinita y lapislázuli

El análisis mediante pXRF de las muestras de aerinita (tabla 1) presenta un contenido elemental que, con las limitaciones de la técnica, es compatible con las fórmulas que se muestran en la introducción. Es evidente la ausencia de cobalto y de cobre, salvo alguna muestra donde el análisis presenta valores de menos de 0,02 % en el segundo elemento. Dados los bajos valores de cobre, se puede considerar que la aerinita prácticamente no lo contiene. Destaca la presencia de manganeso en algunas muestras, todas procedentes de la misma cantera. Su presencia fue señalada en la aerinita de Saint-Pandelon (Azambre y Monchoux, 1988); los mismos autores también señalan indicios de este elemento en una muestra de Tartareu, pero no en las de Juseu, Caserras y Ourika (Marruecos).

La figura 7 muestra las correlaciones entre los diferentes elementos. Hay una relación positiva entre zinc, níquel, hierro y manganeso; cromo y vanadio, y aluminio y silicio. Es interesante la relación entre el fósforo y los metales, y entre azufre y estroncio.

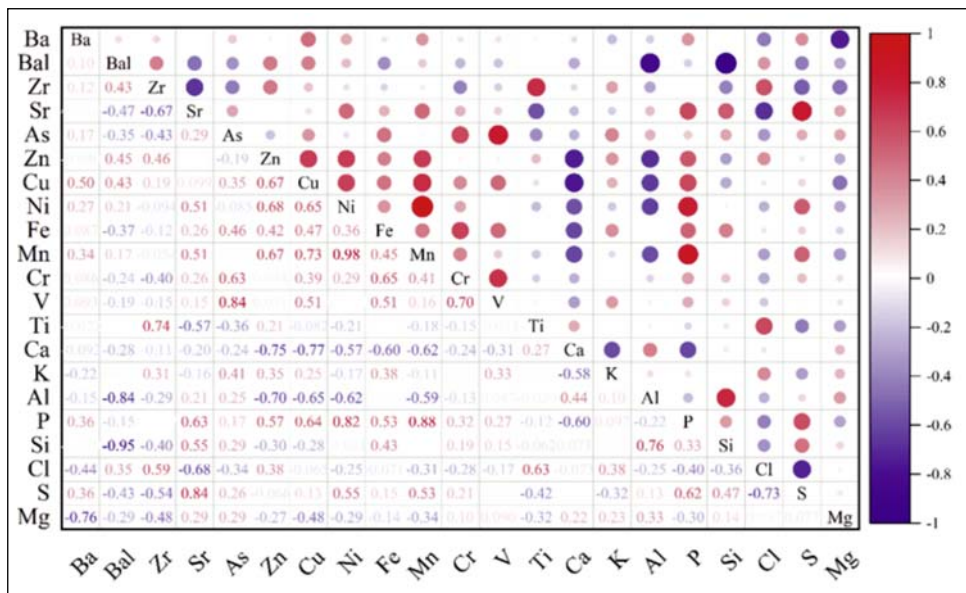


Fig. 7. Correlaciones entre elementos en muestras de aerinita del presente artículo. (Correlaciones positivas, en rojo; negativas, en azul)

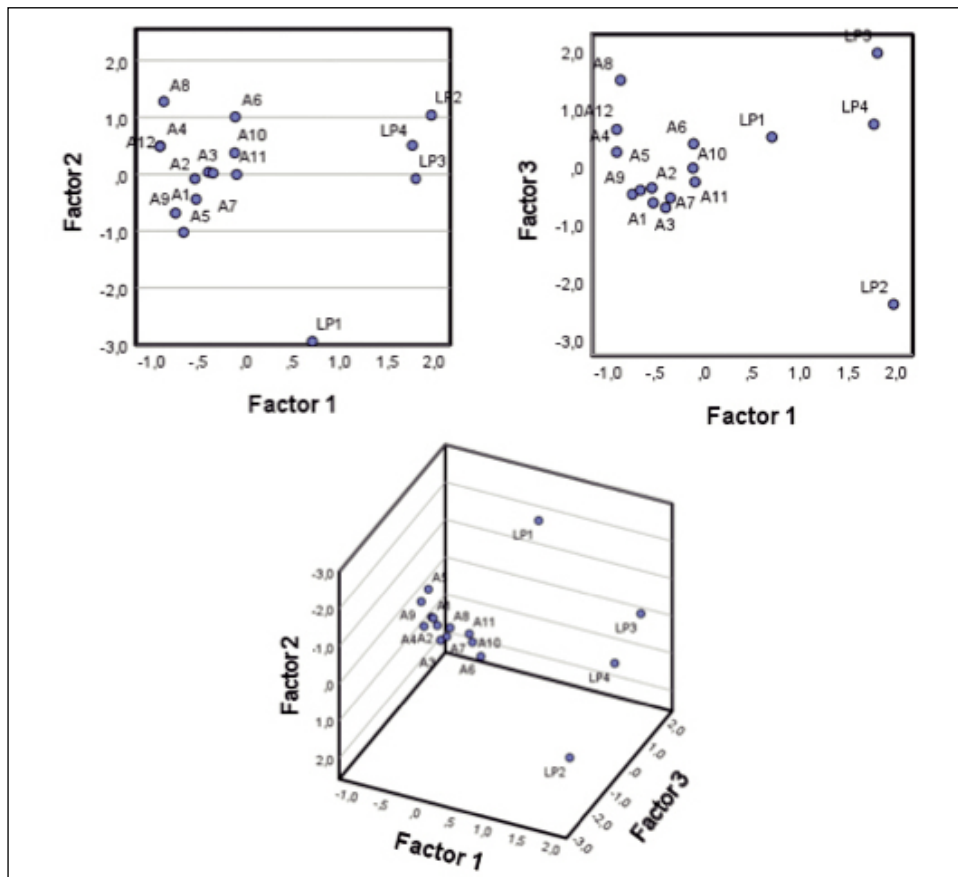


Fig. 8. Diagrama de componentes principales entre los datos obtenidos mediante pXRF de las muestras de aerinita (A) y lapislázuli (L). LP1 es la muestra de origen chileno. Se observa la diferencia entre ambos.

En los resultados del análisis mediante pXRF sobre las muestras de lapislázuli (tabla II) tampoco se detecta cobalto y la presencia de cobre es menor del 0,01 %. Se aprecian diferencias entre el lapislázuli afgano y el chileno, pero no son relevantes a efectos de este artículo. La figura 8 muestra el diagrama de componentes principales entre los datos obtenidos mediante pXRF de las muestras de aerinita (A) y lapislázuli (L), donde se observa la diferencia entre ambos. Aparentemente, serviría para discriminar la presencia de los dos pigmentos, aunque la presencia del segundo se considera improbable en el Alto Aragón medieval.

La aplicación de esta información a diferentes materiales muestra, por un lado, la utilidad de la técnica, algo que es suficientemente conocido, y por otro, permite avanzar en el conocimiento de los pigmentos utilizados. Evidentemente, sería interesante realizar más análisis con técnicas más resolutivas en algunos casos.

Cerámicas de Montearagón

La tabla III presenta los resultados para unos restos de cerámicas procedentes de una escombrera reciente en las inmediaciones del castillo de Montearagón. El nivel de plomo es el correspondiente al vidriado de estas cerámicas mediante aplicación de sulfuro de plomo y posterior vidriado (ausente en el canto). La cerámica azul de la figura 3 muestra ausencia de cobre y presencia de cobalto. Es interesante el nivel de níquel detectado, que señala como posible origen del pigmento la mina de San Juan de Plan. Aunque los niveles de estos elementos son inferiores en la otra pieza con trazos azules, también se puede admitir el uso de este pigmento.

Capiteles de la Sala de Doña Petronila

En los capiteles de la Sala de Doña Petronila del Museo de Huesca (fig. 4, tabla II), es general la presencia de cobre. En los verdes se puede relacionar con malaquita y en el azul con azurita. Probablemente, no hace falta un análisis más sofisticado en busca de aerinita. Por lo demás, no hay cobalto y la presencia general de plomo sugiere el posible uso de una base con este elemento.

Crismón del Museo Diocesano Barbastro-Monzón

El crismón de la catedral de Barbastro (fig. 5, tabla III) sirve a modo de calibración de la hipótesis, dada la existencia de un análisis detallado mediante microscopía óptica, espectroscopía IR y microscopía electrónica de barrido / análisis elemental por energía dispersiva de rayos X (MEB / EDX) (Parra, 2011). A la vista de los resultados obtenidos mediante pXRF, el pigmento rojo se puede asignar al uso de cinabrio; el dorado presenta oro e incluye adicionalmente hierro, lo que es interesante, y el pardo sugiere el uso de una tierra con hierro.

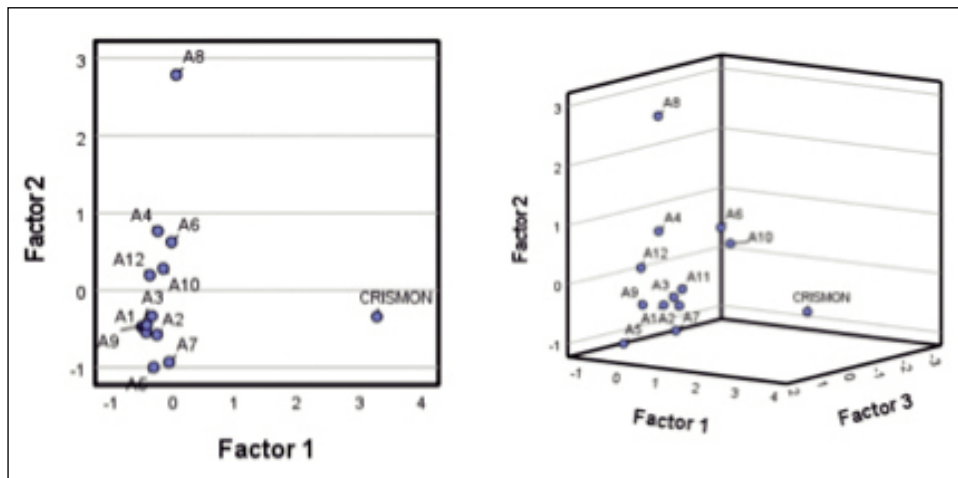


Fig. 9. Diagramas de componentes principales entre los datos obtenidos mediante pXRF de las muestras de aerinita (A) y el azul del crismón de Barbastro.

En el azul el mencionado trabajo realiza un estudio por capas: en la 3, desde la base, se determinan malaquita, azurita y clorocarbonato de cobre (Si, Cl, Ca, Cu [Al, K, Fe]), y en la 5, albayalde y aerinita (Pb, Si, Al, Ca [Na, Mg, Cl]). El estudio deduce que la capa 5 es un repintado ante un viraje de azurita a malaquita en la 3. En el presente artículo los valores de cobre, cobalto y níquel están en las trazas. Posiblemente, corresponden a la capa 3 de la muestra MBM1. Pero la ausencia significativa de estos elementos serviría para sugerir la presencia del uso de aerinita determinable por pXRF. Y la presencia de cobalto y níquel es también interesante.

Para ver la relación entre el mineral y el azul del crismón se ha hecho un análisis de componentes principales (fig. 9), en el que se observa un cierto distanciamiento entre el análisis del azul del crismón y las aerinitas. Dentro de estas, la número 8 se diferencia de las restantes.

Una de las preguntas que se ha planteado es la posibilidad de que se hubiera utilizado lapislázuli en el crismón de Barbastro. Aunque difícil de conseguir y, por tanto, caro, sin embargo se usó en la Edad Media (Frison y Brun, 2016), especialmente en objetos de gran valor simbólico.

Realizando el mismo tipo de análisis estadístico en los elementos comunes con datos numéricos de las muestras anteriores (fig. 10), se observa que

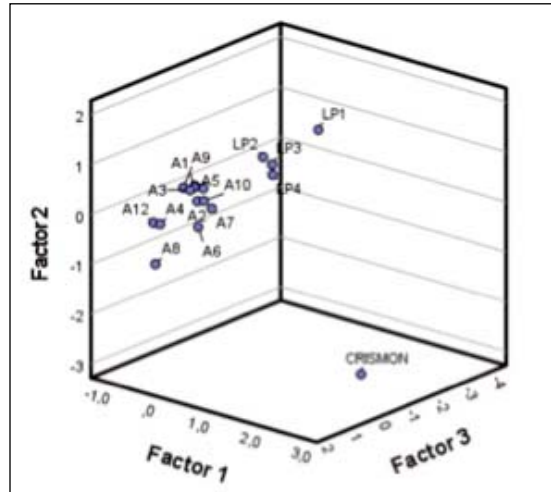


Fig. 10. Diagrama de componentes principales entre los datos obtenidos mediante pXRF de las muestras de aerinita (A), lapislázuli (L) y el azul del crismón de Barbastro.

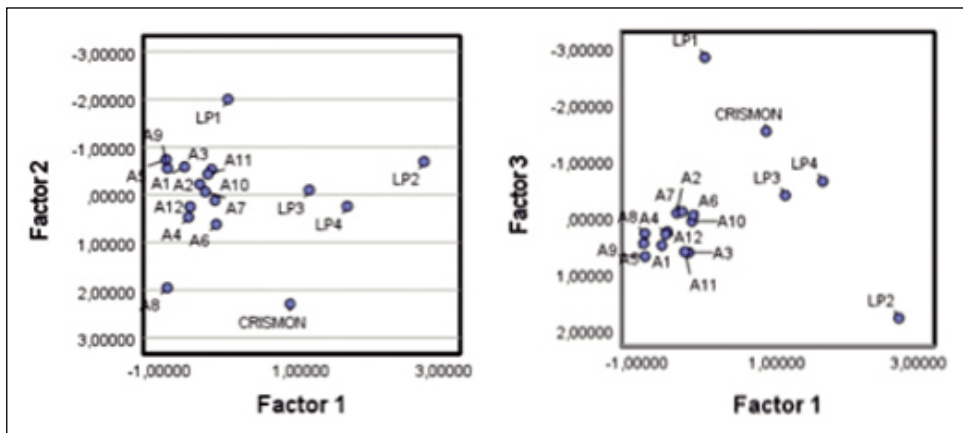


Fig. 11. Diagramas de componentes principales entre los datos obtenidos mediante pXRF de las muestras de aerinita (A), lapislázuli (L) y el azul del crismón de Barbastro (aplicados solo a Ba, *bal*, Sr, Cu, Fe, Mn, Ti, Ca, K, Al, P y Mg).

las diferencias entre la muestra del crismón y las de lapislázuli son mayores que entre las de aerinita y las de lapislázuli.

Para profundizar en esta posibilidad, se ha realizado un nuevo análisis estadístico, dejando solo bario, *bal*, estroncio, cobre, hierro, manganeso,

titanio, calcio, potasio, aluminio, fósforo y magnesio y renormalizando al 100 % (fig. 11). Se mantiene la diferencia con la aerinita y se acerca al lapis-lázuli. Pero no es fácil concluir que se trate del segundo; probablemente, es el resultado de la mezcla de pigmentos, de los tratamientos para su refinado y, además, de la posibilidad de una restauración moderna. Desde luego, el crismón es muy interesante y merece un estudio analítico más completo.

El retablo de Santa Margarita de Portaspana

A partir de esta información se aborda el estudio del retablo central de Santa Margarita de Portaspana (fig. 6, tabla VI). Las aureolas presentan oro. Los rojos tienen una composición variable. Aparece mercurio en la mejilla de la Virgen, en el colgante de coral del Niño y en el zapato rojo. En el cojín de la Virgen (X: 46 cm, Y: 38 cm) y el gorro rojo de san Sebastián (113,97) no hay mercurio, y es posible que se trate de litargirio o minio. La presencia de plomo en algunas zonas puede ser consecuencia de una base general de plomo o de mezclas en la paleta del pintor. En los verdes el manto de san Sebastián presenta cobre, mientras que no aparece en el color oscuro del árbol (47,83), tras la Virgen. En los azules también la situación es compleja: no hay cobalto; el azul del manto de la Virgen (65,37) presenta cobre y se puede achacar al uso de azurita, mientras que el azul del fondo de la tabla de san Sebastián no lo presenta. En este último caso, sería interesante realizar un análisis con técnicas más precisas.

Otras piezas del Museo Diocesano Barbastro-Monzón

Como ya se ha señalado, a la vista de los resultados de la tabla de santa Margarita se decidió recopilar la información recogida en un estudio más detallado de piezas de este museo. La tabla VII presenta los resultados de las zonas verdes y de las azules. Sin entrar en un estudio detallado, hay una presencia general de plomo, arsénico y azufre. En el conjunto hay zonas pintadas cuyos verdes o azules se pueden asociar con pigmentos de cobre, como el prado verde (37,35) del azote de Cristo, pero en otras varias no aparece. Tampoco cobalto, salvo el caso ya comentado del crismón de Barbastro.

Se ha realizado un análisis de componentes principales entre el conjunto de muestras de la tabla VII y los datos de la aerinita de la tabla I. Los resultados se presentan en la figura 9.

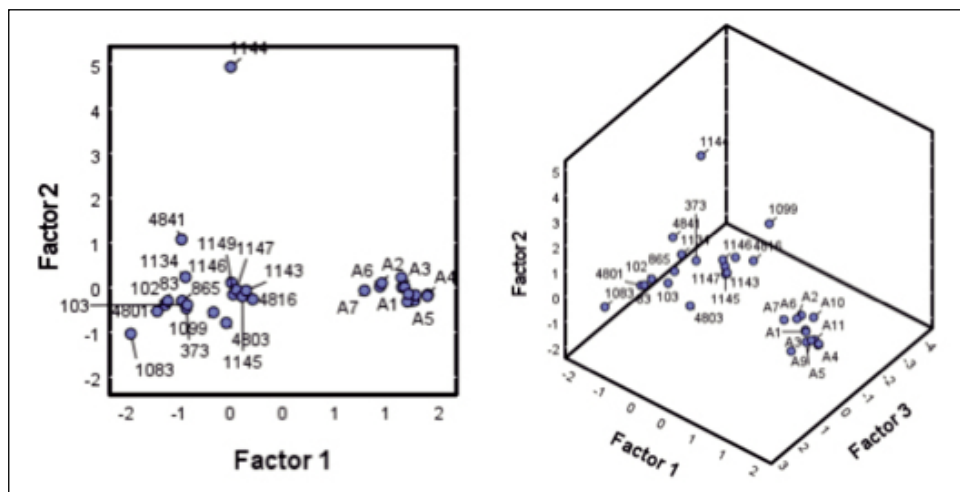


Fig. 12. Diagrama de componentes principales entre los datos obtenidos mediante pXRF de muestras de aerinita (A) y diversas piezas del Museo Diocesano Barbastro-Monzón.

El resultado es similar a lo observado con el crismón de Barbastro. Es evidente que hay una separación entre los datos de la aerinita *pura* y los de los pigmentos analizados. Por un lado, hay que tener en cuenta las mezclas en las paletas de los autores, y por otro, el equipo mide hasta una cierta profundidad y parece detectar las posibles bases, que contendrían plomo, azufre y arsénico. Un caso interesante es la medida 1144, un azul del frontal de Buirá con un anómalo contenido en zinc. ¿Pudiera ser una restauración moderna con un pigmento zinc-cobalto? La situación se mantiene cuando se incorporan los datos de lapislázuli (fig. 13).

Al repetir el análisis factorial sin las muestras de aerinita para todas las de la tabla VII (fig. 15), se aprecia que no solo la muestra n.º 1144 es un *outlier*. También lo es la n.º 1099 en términos del factor 2 (que engloba estaño, vanadio, cadmio, manganeso, potasio y cobre; véase la tabla VIII). Según los resultados obtenidos mediante pXRF, efectivamente llama la atención su contenido en estaño (0,894 %). Las muestras n.º 83 y n.º 1083 también se desmarcan del resto, aunque en este caso en el factor 3 (que engloba bario, níquel, silicio, plomo y aluminio). Parece que aquí se debe a los elevados contenidos en plomo (9,782 y 6,875 % respectivamente), con probabilidad asociados a una base general con este elemento. Si se estudia

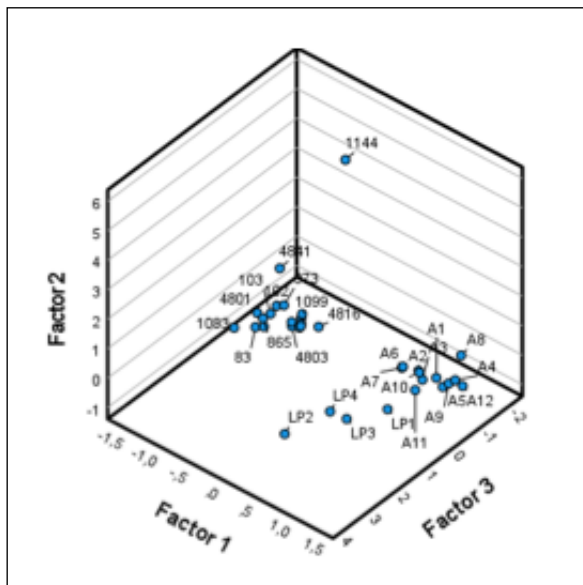


Fig. 13. Diagrama de componentes principales entre los datos obtenidos mediante pXRF de muestras de aerinita (A) y pigmentos azules en diversas piezas del Museo Diocesano Barbastro-Monzón.

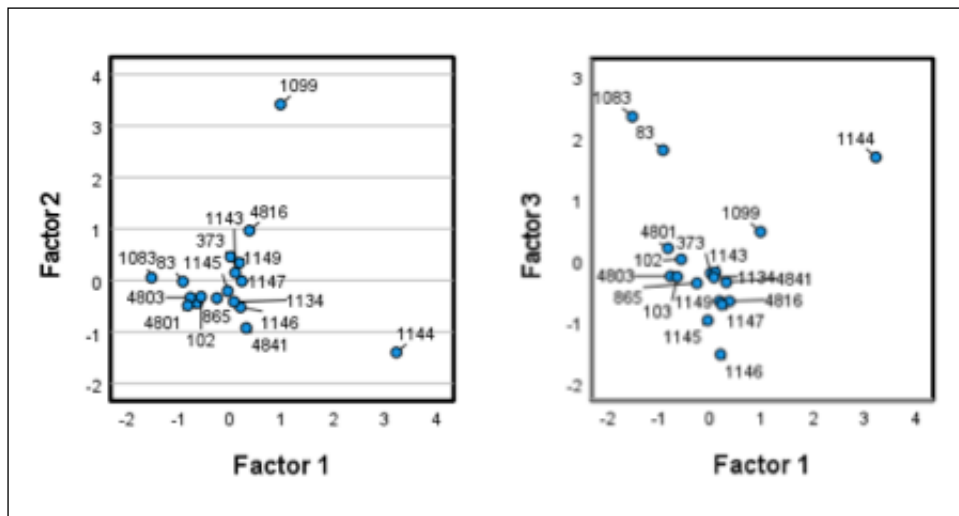


Fig. 14. Diagrama de componentes principales (factores 1 y 2 y factores 1 y 3) entre los datos obtenidos mediante pXRF en diversas piezas del Museo Diocesano Barbastro-Monzón.

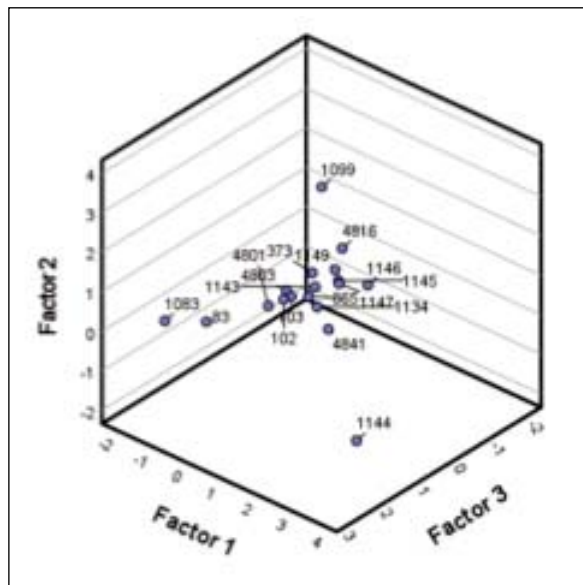


Fig. 15. Diagrama de componentes principales entre los datos obtenidos mediante pXRF en los pigmentos azules de diversas piezas.

la muestra n.º 1144 con los mismos criterios, llaman la atención los contenidos de zinc, cromo y titanio (factor 1) y de bario (factor 2). La figura 15 muestra ambas singularidades.

La tabla VIII presenta los resultados numéricos de la matriz de la figura 15.

La coloración azul de la muestra n.º 1099 puede deberse a sus contenidos en vanadio y cobre, por más que la suma de estos elementos se encuentre por debajo del 5 %. Las muestras n.º 1144 y n.º 1099 comparten contenidos en estaño bajos, pero del mismo orden ($0,88 \pm 0,01$ %), lo que sugiere una contaminación común, bien por casiterita (tradicionalmente utilizada como opacificante, para comunicar aspecto perlado), bien por óxido de estaño (púrpura de Cassius, usada en pintura al óleo desde el siglo XVII). Respecto a los contenidos conjuntos de plomo y estaño de estas y otras muestras, deberían ser referidos a contaminación por amarillo de estaño-plomo (Pb_2SnO_4), *genuli*, utilizado desde la Edad Media hasta el siglo XVIII para verdear los azules. ¿Es original o una antigua restauración?

CONCLUSIONES

Es evidente el interés y la complejidad de la identificación de pigmentos usados sobre cuadros, estatuas y cerámicas antiguas. Como en otras materias (ámbar, estaño), es muy probable que el comercio de pigmentos fuera más antiguo y extenso de lo sospechado. Sin embargo, dada la presencia en el Alto Aragón de afloramientos de tres de los cuatro cromóforos inorgánicos azules (azurita, cobalto, aerinita y lapislázuli), se permite pensar en la utilización de materias primas locales. Evidentemente, el último no lo es.

En el caso de la utilización de aerinita, raro mineral pirenaico ribagorzano, su detección es costosa desde el punto de vista económico y técnicamente complicada, e implica la toma de muestras. La utilización de un equipo portátil de fluorescencia de rayos X en diversas obras antiguas de arte altoaragonesas, además de ofrecer información sobre algunos de los pigmentos, permite un estudio sobre los posibles azules (lapislázuli, azurita, aerinita y cobaltina), tres de los cuales pueden ser definidos como de carácter local.

La utilización del pXRF permite detectar la presencia de cobre y cobalto. El primero, junto con la malaquita, aparece en numerosas obras de arte, pero sus yacimientos desbordan el ámbito pirenaico. Minerales de cobalto se han utilizado profusamente en cerámica, donde cabe recordar el *redescubrimiento* de la porcelana en Europa, en Meissen, a inicios del siglo XVIII, y la importancia de la mina de San Juan de Plan, que merece un trabajo profundo.

El uso de la aerinita como pigmento azul puede ser más amplio de lo conocido. Debería sospecharse por la ausencia de cobre y cobalto. Sin embargo, la técnica tiene sus límites, ya que los diversos autores usaban mezclas de pigmentos, amén de otros productos, en sus obras.

La técnica utilizada favorece también que sospechemos la presencia de restauraciones con pigmentos modernos. Por supuesto, en muchas piezas, como en el crismón de Barbastro, sería bueno analizar más en profundidad los pigmentos. Como siempre, hacen falta más estudios sobre nuestro rico patrimonio.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la diócesis de Barbastro el permiso para estudiar el crismón, el retablo de Santa Margarita de Portaspana y el resto de las piezas. El trabajo fue financiado por una ayuda del Centro de Estudios del Somontano de Barbastro. Las muestras de la aerinita fueron donadas por Rosa Torreano, de la Dirección de Minas del Servicio Provincial de Industria del Gobierno de Aragón en Huesca. José Miguel Pesqué proporcionó la cita en la cartuja de las Fuentes. Muestras de lapislázuli fueron donadas por Francisco Javier Cuchí, en ese momento Encargado de Negocios. El equipo pXRF empleado fue financiado con una Beca Leonardo a Investigadores y Creadores Culturales 2019 de la Fundación BBVA, si bien esta no se responsabiliza de las opiniones, los comentarios y los contenidos vertidos en este artículo, los cuales son total y absoluta responsabilidad de sus autores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceto, M., E. Calà, S. Cantamessa, A. Agostino, G. Fenoglio, V. Capra y G. Brun (2019). From the Pyrenees to the Alps: Evidence of the use of aerinite on XII century fresco paintings at Novalesa abbey (Piemonte). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 25: 15-24.
- Aragónés, E. (2017). Un epistolario inédito de Lucas Mallada: las cartas a Luis Mariano Vidal y Carreras (1873-1902). *Treballs del Museu de Geologia de Barcelona*, 23: 27-102.
- Ávila, A. de (2013). Las pinturas románicas de San Martín de Elines (Santander). *De Arte*, 12: 27-40.
- Azambre, B., y P. Monchoux (1988). Précisions minéralogiques sur l'aérinite: nouvelle occurrence à Saint-Pandelon (Landes, France). *Bulletin de Minéralogie*, 111 (1): 39-47.
- Besteiro, J., M. Lago y A. Pocoví (1982). Observaciones sobre una mineralización de aerinita, asociada a rocas ofíticas del Pirineo leridano. *Boletín Español de Mineralogía*, 5: 43-53.
- Besteiro, J., M. Lago, A. Pocoví, J. Bastida, J. M. Amigó y R. Moliner Álvarez (1985). Nuevos datos mineralógicos sobre un inclasificado aluminosilicato, "Aerinita", y consideraciones sobre su atribución al grupo de las Ceolitas. *Acta Geologica Hispanica*, 20 (3/4): 217-266.
- Calvo, M. (2008). *Minerales de Aragón*. Prames. Zaragoza. 463 pp.
- Calvo, M. (2017). Aerinita, la piedra azul del Pirineo. *Naturaleza Aragonesa*, 34: 63-68.
- Calvo, M., J. Besteiro, E. Sevillano y A. Pocoví (1988). *Minerales de Aragón*. Mira. Zaragoza. 142 pp.

- Calvo Ruata, José Ignacio (dir. cient.) (2018). *Fray Manuel Bayeu: cartujo, pintor y testigo de su tiempo*. Diputación Provincial de Huesca. Huesca. 301 pp.
- Campuzano, M., A. Carreras, À. Comella y À. Masalles (2010). Noves aportacions per a l'estudi de la *Majestat Batlló*: identificació i caracterització de la policromia subjacent. *Butlletí del Museu Nacional d'Art de Catalunya*, 11: 13-31.
- Castiñeiras, M. (2008). Entorn als orígens de la pintura romànica sobre taula a Catalunya: els frontals d'Urgell, Ix, Esquiús i Planès. *Butlletí del Museu Nacional d'Art de Catalunya*, 9: 15-41.
- Clark, R. J., R. R. Hark, N. Salvadó, S. Butí y T. Pradell (2010). Spectroscopy study of mural paintings from the Pyrenean Church of Saint Eulàlia of Unha. *Journal of Raman Spectroscopy*, 41 (11): 1418-1424.
- Constantini, I., K. Castro y J. M. Madariaga (2018). Portable and laboratory analytical instruments for the study of materials, techniques and environmental impacts in mediaeval mural paintings. *Analytical methods*, 10 (40): 4854-4870.
- Crespi, A., O. Vallcorba, I. Šics y J. Rius (2019). First identification and compositional study of brown aerinite directly on polished thin-sections by synchrotron through-the-substrate microdiffraction. *European Journal of Mineralogy*, 31 (5-6): 999-1005.
- Daniel, F., A. Mounier y B. Laborde (2008). Pigment aerinite as a sign of artist circulation through Pyrenees in the mediaeval period. En *V Congresso Nazionale di Archeometria "Scienza e Beni Culturali"*: 26-29. Siracusa.
- Edwards, H. G. M., F. Rull, P. Vandenabeele, E. M. Newton, L. Moens, J. Medina y C. García (2001). Mediaeval Pigments in the Monastery of San Baudelio, Spain: A Raman Spectroscopic Analysis. *Applied Spectroscopy*, 55/1: 71-76.
- Frison, G., y G. Brun (2016). Lapis lazuli, lazurite, ultramarine "blue", and the colour term "azure" up to the 13th century. *Journal of the International Colour Association*, 16: 41-55.
- Frost, R. L., R. Scholz y A. López (2015). Infrared and Raman spectroscopic characterization of the carbonate bearing silicate mineral aerinite: Implications for the molecular structure. *Journal of Molecular Structure*, 1097: 1-5.
- Garrido, J. (1942). Sur l'aérinite. *Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie*, 72 (7-9): 401-407.
- Ibáñez-Insa, J., N. Oriols, J. J. Elvira, S. Álvarez y F. Plana (2012). Heat alteration of the blue pigment aerinite: Application to Sixena's Romanesque frescoes. *Macla*, 12: 46-47.
- Kovalev, I., A. S. Rodler, C. Brøns y T. Rehren (2023). Making and working Egyptian blue: A review of the archaeological evidence. *Journal of Archaeological Science*, 153: 105772.
- Mallada, L. (1878). *Descripción física y geológica de la provincia de Huesca. Memorias de la Comisión del Mapa Geológico de España*, [v1]. Imprenta y Fundación de Manuel Tello. Madrid. 439 pp., 2 lám. pleg. Edición facsímil, con prólogo de José M. Ríos, Huesca, IEA (Rememoranzas, 4), 1990.

- Moulin, J. (2018). Sainte-Chapelle, vestiges de polychromie sur les porches haut et bas. *Bulletin Monumental*, 176 (1): 59-62.
- Nihtianova, D., U. Kolb, J. Li e I. Queralt (2004). TEM Investigation of aerinite, compared with synchrotron and X-Ray powder diffraction data. *Acta Crystallographica*, 60: s44.
- Pagès, M. (2013). Les pintures murals romàniques de Sant Martí Sescorts. *Miscel·lània litúrgica catalana*, 21: 81-113.
- Palet, A., y J. de Andrés (1991). La aerinita como pigmento azul: naturaleza, uso y estabilidad. *Acta historica et archaeologica mediaevalia*, 11: 475-483.
- Palet, A., y J. de Andrés (1992). The identification of aerinite as a blue pigment in the Romanesque frescoes of the Pyrenean region. *Studies in Conservation*, 37 (2): 132-136.
- Parra, E. (2011). *Análisis químico de una muestra de policromía sobre piedra de un crismón*. Museo Diocesano Barbastro-Monzón. Larco Química y Arte, S. L. Inédito. 7 pp.
- Pérez-Arantegui, J., C. Pardos, J. L. Abad y J. R. García (2013). Microcharacterization of a natural blue pigment used in wall paintings during the Romanesque period in northern Spain. *Microscopy and Microanalysis*, 19 (6): 1645-1652.
- Porta, E., A. Palet y E. Guillaumet (1990). Le Bleu aérinte: un pigment méconnu en peinture murale romane: 534-538. *Proceedings ICOM-CC Conference*, vol. 2. The Getty Conservation Institute. Los Ángeles.
- Prieto, M. P., F. Alonso, R. Casal y F. Acuña (2017). Cerámica de lujo medieval en dos castillos de la mitra compostelana. *Estudios Humanísticos. Historia*, 16: 159-175.
- Rius, J., E. Elkaim y X. Torrelles (2004). Structure determination of the blue mineral pigment aerinite from synchrotron powder diffraction data: The solution of an old riddle. *European Journal of Mineralogy*, 16 (1): 127-134.
- Rius, J., A. Crespi, A. Roig y J. C. Melgarejo (2009). Crystal-structure refinement of Fe³⁺-rich aerinite from synchrotron powder diffraction and Mossbauer data. *European Journal of Mineralogy*, 21 (1): 233-240.
- Salvadó, N., S. Butí, M. A. Aranda y T. Pradell (2014). New insights on blue pigments used in 15th century paintings by synchrotron radiation-based micro-FTIR and XRD. *Analytical Methods*, 6 (11): 3610-3621.
- Salvadó, N., S. Butí, E. Pantos, F. Bahrami, A. Labrador y T. Pradell (2008). The use of combined synchrotron radiation micro-FTIR and XRD for the characterization of Romanesque wall paintings. *Applied Physics A*, 90: 67-73.
- Vidal, L. M. (1882). Yacimiento de la aerinita. *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España*, 9: 113-121.

LUCAS MALLADA, 26 (2024)

ISSN 0214-8315, ISSN-e 2445-060X

<http://revistas.ica.es/index.php/LUMALL>

VARIEDADES DE OLIVO TRADICIONALES EN EL ALTO ARAGÓN: CARACTERIZACIÓN MOLECULAR, ACEITES MONOVARIETALES Y ÁRBOLES MONUMENTALES

Javier Viñuales Andreu¹ | Alfredo Serreta Oliván¹ |
Rubén Sancho Cohen^{1,2} | Ana Cristina Sánchez Gimeno³ |
Pablo Martín-Ramos⁴ | José Antonio Cuchí Oterino¹ |
José Casanova Gascón¹

RESUMEN La recuperación de variedades minoritarias de olivo ayuda a preservar la diversidad genética y contribuye a introducir prácticas agrícolas sostenibles. El Consejo Oleícola Internacional ha reconocido la importancia de conservar los recursos genéticos del olivo y el programa Horizonte Europa de la UE ha identificado la preservación de la diversidad de cultivos como una prioridad para los sistemas alimentarios sostenibles. En el trabajo origen de este artículo se promovieron, muestrearon y analizaron olivares

¹ Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Carretera de Cuarte, s/n. E-22071 Huesca. jvinales63@gmail.com, serreta@unizar.es, rsancho@unizar.es, cuchi@unizar.es, jcasan@unizar.es

² Grupo de Bioquímica, Biofísica y Biología Computacional. Instituto de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos. Universidad de Zaragoza. C/ Mariano Esquillor Gómez. Edificio I+D. E-50018 Zaragoza.

³ Departamento de Producción Animal y Ciencia de los Alimentos. Facultad de Veterinaria. Instituto Agroalimentario de Aragón – IA2 (CITA – Universidad de Zaragoza). C/ Miguel Servet, 177. E-50013 Zaragoza. anacris@unizar.es

⁴ Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrícolas. Universidad de Valladolid. Avenida de Madrid, 44. E-34004 Palencia. pmr@uva.es

viejos de la provincia de Huesca, gestionados agronómicamente según el modelo tradicional y sometidos a estudio mediante técnicas de caracterización molecular (basadas en marcadores EST-SNP). Un total de 29 nuevas variedades fueron identificadas y depositadas en el Banco Mundial de Germoplasma del Olivo del IFAPA. En el primer paso hacia su valorización, se elaboraron y se caracterizaron 8 aceites monovarietales de las variedades del Alto Aragón, y se evaluaron sus propiedades organolépticas, allanando el camino para la elaboración de aceites de calidad diferenciada. Además, se seleccionaron olivos centenarios y se escanearon en 3D para promover su protección como árboles singulares o monumentales y con fines oleoturísticos. Los hallazgos reportados ponen de manifiesto el rico patrimonio olivarero de la frontera más septentrional del cultivo del olivo en España.

PALABRAS CLAVE EST-SNP. Recursos genéticos. LiDAR. Árboles monumentales. *Olea europaea*. Aceite de oliva. Alto Aragón.

ABSTRACT The recovery of minority olive varieties helps to preserve genetic diversity and contributes to sustainable agricultural practices. The International Olive Council has recognised the importance of conserving olive genetic resources and the EU's Horizon Europe programme has identified the preservation of crop diversity as a priority for sustainable food systems. In the article presented here, old olive groves in the province of Huesca, managed according to the traditional model, were sampled and analysed using molecular characterisation techniques (based on EST-SNPs markers). 29 new varieties were identified and deposited in the IFAPA's World Olive Germplasm Bank. In the first step towards their valorisation, 8 monovarietal oils of the Alto Aragón varieties were produced and characterised, and their organoleptic properties were evaluated, paving the way for the production of oils of differentiated quality. In addition, centennial olive trees were selected and 3D scanned to promote their protection as singular or monumental trees and for oleotourism purposes. The findings highlight the rich olive heritage of this northernmost frontier of olive cultivation in Spain.

KEYWORDS EST-SNP. Genetic resources. LiDAR. Monumental trees. *Olea europaea*. Olive oil. Alto Aragón (Spain).

INTRODUCCIÓN

Aunque actualmente se considera un cultivo secundario, el del olivo está muy arraigado en el territorio del Alto Aragón, ya que forma parte de la cultura culinaria y de la tradición agronómica en muchas localidades. El cultivo del olivo se documenta en la región desde la Antigüedad tras su desarrollo desde la costa mediterránea, expansión debida a griegos y romanos.

Las variedades cultivadas fueron cambiando con el tiempo al adaptarse al territorio, accidentado y diverso, aunque la literatura clásica menciona más el aceite que las variedades. Las referencias a su calidad han sido numerosas desde la Edad Media, ya que Aragón fue un importante productor de aceite desde el siglo xv (Colás Latorre, 2015). Durante el Siglo de las Luces varios libros aluden a la importancia del olivo en esta región. El economista y naturalista Ignacio Jordán de Asso (1798) viajó por todo Aragón y enumeró las localidades que producían buen aceite, evaluando su producción. Este autor comentaba los intercambios varietales entre Sevilla y Aragón, la existencia de plantaciones en los Pirineos y las bondades de cultivar Empeltre sin olvidar otras variedades aragonesas como Royal, Negral, Racimillo, Acebuche, Picudillo, Manzanillo, Verdillo y Cirujal. Durante el siglo xix se hizo importante el estudio de las variedades en España (Barranco Navero, Fernández Escobar y Romero, 2017) y se empezaron a localizar las de Aragón. Megino y Metauten (1804) menciona que en el reino de Aragón se cultivaban más variedades que en el sur de España, y nombran Royal, Negral, Sevillano, Racimillo o Uba, Acebuche, Picudo, Manzanillo, Verdillo, Cirujal o Largal y Empeltre o Zuequecilla. En 1818 el militar, naturalista e ingeniero Félix de Azara describió variedades del somontano como Manzanilla (Alquecerana), Cerecera (Royeta), Negral (Neral), Panseña (Panseñera), Mochuta (Mochuto), Grosal, Olivonera, Verdeña, Minutesa y Rebordeca (Baulny, 1968). Priego Jaramillo (1930) describió muchas de las variedades locales de la provincia de Huesca, con un sistema de identificación morfológica básica y breves comentarios agronómicos.

Sin embargo, desde 1950 la despoblación, la mecanización intensiva de los cereales y el arranque del olivo (Ortega Nieto, 1958) han reducido las hectáreas cultivadas en Aragón a solo el 0,6 % de la superficie en cultivo en la actualidad (Escudero Población y cols., 2019). Además, el cultivo del olivo ha experimentado importantes cambios en los últimos años: por un lado, se ha desplazado de las regiones productoras tradicionales a otras zonas donde no se cultivaba (como las nuevas zonas de regadío en el sur del Alto Aragón), y por otro, se ha reducido el número de variedades plantadas. Esta reducción en el número de variedades cultivadas se debe al hecho de que el cultivo intensivo del olivo requiere variedades mejor adaptadas, lo que conduce a la pérdida de recursos genéticos (Rallo Romero, 2005). Sin embargo, la recuperación de variedades minoritarias de olivo es importante porque

ayuda a preservar la diversidad genética y contribuye a prácticas agrícolas sostenibles. También recupera el paisaje y las zonas marginales de cultivo, y optimiza la huella ecológica o biocapacidad (López Bermúdez y cols., 2004). En consecuencia, el Consejo Oleícola Internacional (COI) ha reconocido la importancia de conservar los recursos genéticos del olivo y ha establecido el Banco Mundial de Germoplasma del Olivo de Córdoba (BGMO – UCO) para recolectar y preservar diversas variedades. Del mismo modo, el programa Horizonte Europa de la Unión Europea ha identificado la preservación de la diversidad de cultivos como una prioridad para los sistemas alimentarios sostenibles. Además, la recuperación varietal cumple con los objetivos del Comité de Agricultura de la FAO sobre sistemas alimentarios sostenibles e integración de la biodiversidad en los sistemas agrícolas (FAO, 2020), y está orientada hacia los objetivos 2030 (FAO, 2018), contribuyendo al logro de 11 de los 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) (a saber, los n.ºs 1, 2, 3, 5, 8, 9, 10, 12, 13, 15 y 16).

La utilización continuada de un número reducido de variedades muy productivas ha supuesto la desaparición progresiva de las tradicionales y locales, algunas de las cuales, aunque menos productivas, poseen gran valor tanto agronómico, como fuente de diversidad genética de la especie, como comercial, por las particularidades de los aceites que de ellas se pueden obtener.

La diversidad genética que albergan las variedades tradicionales de olivo ha sido ampliamente estudiada, especialmente en la cuenca mediterránea, mediante diversas técnicas de genotipado y marcadores moleculares. Trujillo y cols. (2013), El Bakkali y cols. (2019) y Gómez Rodríguez y cols. (2020) analizaron secuencias cortas y repetidas de ADN, denominadas *microsatélites* (SSR – Simple Sequence Repeat), y rasgos morfológicos para caracterizar los olivos registrados en los bancos de germoplasma de Marrakech y Córdoba. Otra técnica, el genotipado por secuenciación (GBS – Genotyping by Sequencing), ha sido utilizada por D’Agostino y cols. (2018) en el estudio de una colección de 94 cultivares representativos del germoplasma del olivo italiano. Una de las técnicas de genotipado más utilizadas en los estudios de diversidad genética en olivo es la centrada en analizar un conjunto de mutaciones o polimorfismos puntuales, de un solo nucleótido (SNP – Single Nucleotide Polymorphisms), distribuidos a lo largo del genoma (Biton y cols., 2015). Cuando estas mutaciones puntuales se encuentran

en regiones codificantes del genoma, es decir, genes, se las denomina EST-SNP (Expressed Sequence Tag – Single Nucleotide Polymorphism). Este tipo de marcadores moleculares se han utilizado para explorar la diversidad genética en colecciones de olivos tanto cultivados (Belaj y cols., 2018 y 2022; Kaya y cols., 2013) como silvestres (Mariotti y cols., 2020). En el presente artículo se ha llevado a cabo la caracterización genotípica de 92 especímenes de olivos del Alto Aragón mediante la utilización de un panel de 96 EST-SNP desarrollados y validados previamente por Belaj y cols. (2018 y 2022) y Gómez Gálvez y cols. (2024), en colaboración con el BGMO.

En el caso particular de Aragón, la mayoría de los estudios de caracterización y recuperación de variedades tradicionales se han desarrollado en los últimos veinte años (Mallor y cols., 2014). Muchos de los estudios agronómicos se han centrado en las 2 variedades más importantes: Empeltre y Arbequina (Gracia y cols., 2023; Elguea Blanco y cols., 2006; Font i Forcada y cols., 2014; Romero Aroca y cols., 1993). Por el contrario, las variedades locales o minoritarias recuperadas apenas han sido estudiadas (Benito y cols., 2010; Puyuelo Arilla, 2009). Sin embargo, se reconoce que estas variedades locales son una valiosa fuente de diversidad para el mejoramiento, dado que generalmente crecen en condiciones agroclimáticas difíciles (Pascual Guillén, 1988).

En la provincia de Zaragoza existe un proyecto de recuperación varietal (Benito y cols., 2010) dentro de un programa de desarrollo rural de la Denominación de Origen Aceite Sierra del Moncayo. En la provincia de Teruel se han llevado a cabo varios estudios sobre las variedades cultivadas en el Bajo Aragón, entre ellos el estudio morfológico del hueso de 8 variedades por parte de Pascual Guillén (1988), y actualmente el proyecto *Oliveras centenarias y singulares del Matarraña*, que tiene como antecedente un estudio previo (Zorrilla Alcaine, 1996). Por otro lado, la provincia de Huesca ha recibido poca atención. La zona más estudiada es el somontano de Barbastro, donde la Verdeña es la variedad principal, seguida de Empeltre, Blancal, Negral y Arbequina. Viñuales (2007) recuperó 18 variedades repartidas por toda la región, lo que sirvió de base para estudios posteriores sobre las mismas. Las variedades recuperadas han sido plantadas en diferentes puntos del territorio, como el Parque Olearum en Barbastro o el Bosque de los Olivos de Buera, así como en parcelas experimentales en

varias localidades de la provincia. En la comarca de la Hoya de Huesca Viñuales y González (2008) localizaron diversas variedades, que fueron descritas y caracterizadas. En los años siguientes se prospectaron otras zonas de la provincia y se localizaron 10 nuevas variedades (Casanova y cols., 2013). Un total de 32 de estas variedades fueron replantadas en el Banco de Germoplasma de la Escuela Politécnica Superior de Huesca (Universidad de Zaragoza). Las características de los aceites obtenidos de algunas de estas variedades han sido analizadas por Espada Carbó y cols. (2009) y, más recientemente, por Serreta Oliván y cols. (2023).

A partir de los esfuerzos iniciales, este estudio tuvo un doble objetivo: por un lado, identificar y caracterizar las variedades minoritarias de olivo en el Alto Aragón, especialmente en las comarcas de Sobrarbe y Ribagorza, y por otro, proponer posibles estrategias para la valorización de este patrimonio olivarero. Para lograr el primer objetivo, se realizaron encuestas exhaustivas en antiguas plantaciones y terrazas abandonadas, con el apoyo de asociaciones y agricultores. Se seleccionaron y caracterizaron genéticamente 96 especímenes. El segundo consistió en la elaboración y la caracterización de aceites de oliva monovarietales a partir de variedades seleccionadas, junto con la identificación y la caracterización de un subconjunto de olivos centenarios con valor potencial como árboles monumentales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Entorno geográfico

El Alto Aragón, en la parte central al sur de los Pirineos, es un territorio complejo. La zona más septentrional es muy accidentada y alcanza una altitud de más de 3000 metros, mientras que la mitad sur es mucho más llana, con una altitud media de 400 metros. La precipitación media anual oscila entre más de 1000 milímetros en el extremo norte y 300 milímetros en el sur. En consecuencia, en este territorio existe un amplio mosaico de ecosistemas.

Prospección de variedades locales de olivo en antiguas plantaciones

Inicialmente se realizaron prospecciones en todo el Alto Aragón. Se pidió a los agricultores información mediante un formulario que debían rellenar sobre las variedades comunes en su zona de cultivo, así como sobre aquellas

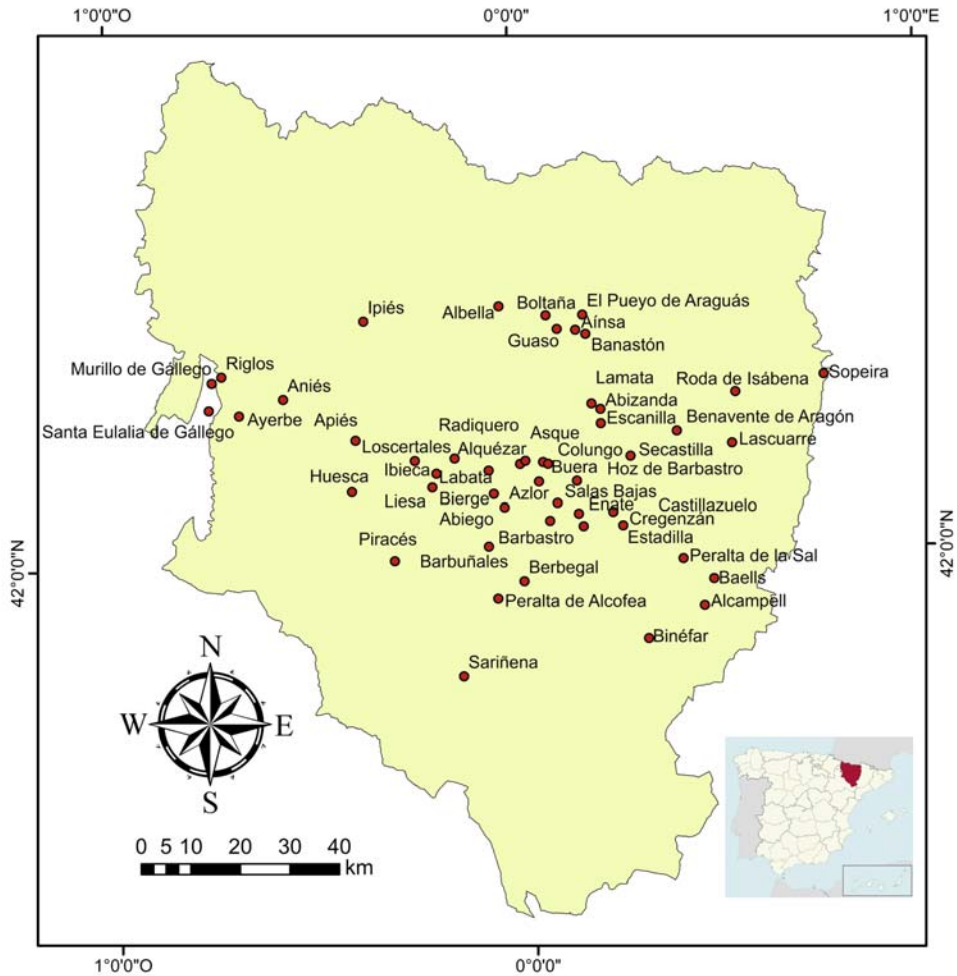


Fig. 1. Mapa de las localidades visitadas y en las que se han muestreado o marcado olivos.

minoritarias y locales. Los formularios de recogida de datos se cumplieron *in situ*, de conformidad con las directrices establecidas por las organizaciones internacionales de caracterización, concretamente el COI y la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UPOV).

Los resultados de la encuesta y la información recopilada se resumen en la figura 1, que muestra las localidades de origen del material vegetal estudiado, y en la tabla III, que presenta el material hallado en cada localidad,

con el nombre tradicional proporcionado por los agricultores. En algunas visitas no se realizó muestreo, ya que las variedades encontradas eran comerciales, modernas, o bien eran locales conocidas. En total, fueron marcados árboles de 51 localidades y se seleccionaron 128 olivos para su posterior estudio. Se tomaron muestras de algunas variedades plantadas en varias localidades para comprobar su difusión por toda la provincia de Huesca.

Caracterización molecular

En el presente artículo se han genotipado un total de 92 olivos pertenecientes a 56 variedades / cultivares procedentes de 39 localidades del Alto Aragón y una de Salamanca. Para ello se extrajo el ADN de hojas frescas (Rosa y cols., 2002) y se analizó un panel de 96 *loci* EST-SNP (Belaj y cols., 2022). Se utilizaron dos cultivares de referencia (Picual y Frantoio) como controles positivos. Las muestras Royal de Calatayud_6 de Lamata y Royeta de Asque_4 de Radiquero fueron eliminadas de los análisis posteriores por tener al menos cuatro datos que faltaban (*no call*) del total de 96 EST-SNP. Se utilizó el *software* GenAIex 6.503 (Peakall y Smouse, 2006 y 2012) para llevar a cabo el análisis de emparejamiento multilocus por pares (*pairwise multi-locus matching analysis*), usando el formato codominante, para detectar genotipos redundantes. Posteriormente se utilizó el conjunto de datos no redundantes, manteniendo un único genotipo representativo, para calcular la distancia genética usada en el cálculo de los siguientes parámetros genéticos: número medio de alelos observados (N_a), número de alelos efectivos (N_e), índice de información de Shannon (I), heterocigosidad observada (H_o), heterocigosidad esperada (H_e) y frecuencia alélica mínima (MAF; alelo menos común en una población). El contenido de información polimórfica (PIC) se calculó mediante el *software* MolMarker v.1.0 (Jahnke y cols., 2022).

Se realizó un análisis de coordenadas principales (PCoA), basado en la matriz de distancia genética de 58 genotipos no redundantes, para dilucidar las relaciones genéticas entre las variedades de olivo. La distancia genética y el gráfico PCoA se calcularon y trazaron utilizando el protocolo *PCoA mediante matriz de covarianza con normalización de datos* disponible en GenAIEx. Además, el panel de 96 EST-SNP de los 58 genotipos no redundantes se utilizó para llevar a cabo la estimación de la estructura genética

poblacional mediante el análisis de mezclas (*admixture analysis*) con factorización de matrices no negativas dispersas implementada en el paquete LEA (Frichot y François, 2015; Gain y François, 2021) de R. Para delimitar el número de agrupaciones (K , *clusters*) que probar, se realizó un análisis de mezcla preliminar fijando solo 10 repeticiones y probando K s de 1 a 58, el número total de genotipos no redundantes. Según el criterio de entropía, se analizaron en detalle los K s de 1 a 8 para calcular el número de poblaciones ancestrales que mejor explicaban los datos genotípicos. Para ello se repitió el análisis en el rango de grupos desde 1 hasta 8 (100 repeticiones). El grupo con menor entropía era el que mejor explicaba los datos genotípicos. La matriz Q (*Q-matrix*) del mejor grupo (K) se utilizó para mostrar mediante un diagrama de barras las proporciones de ancestralidad utilizando el paquete *pophelper* y la aplicación interactiva *pophelperShiny* (Francis, 2017) de R.

Preparación y caracterización de aceites monovarietales

Alineado con el enfoque propuesto por García Vico y cols. (2009), la preservación del patrimonio del aceite de oliva se persigue con eficacia a través de la valorización de aceites distintivos, facilitando el desarrollo de circuitos comerciales localizados. Por ello, en esta investigación elaboramos aceites monovarietales a partir de 8 variedades específicas originarias del Alto Aragón. Esta selección comprendió 4 variedades previamente reconocidas (Alfá, Blancal, Gordera de Abizanda y Mochuto) y 4 recién identificadas (Minutera de Labata, Minutera de Viña, Olivonero de Ayerbe y Rosal). La cosecha, realizada en noviembre de 2022 en el arboreto de la Universidad de Zaragoza en Huesca, consistió en la recogida de 2-3 kilogramos de cada variedad. Las muestras se llevaron a la Planta Piloto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos de la Facultad de Veterinaria, donde se efectuaron las medidas básicas de calidad de la aceituna.

Para la determinación del índice de madurez, se tomaron 100 frutos y se evaluó la pigmentación del epicarpio y del mesocarpio de las aceitunas mediante una escala basada en siete niveles, usando la fórmula proporcionada en Rallo Romero (2005). En cuanto a la extracción del aceite y el cálculo del rendimiento graso, el aceite se obtuvo utilizando un equipo Abencor (MC2, Sevilla) compuesto por un molino, un mezclador térmico y una

centrífuga, simulando el proceso industrial. Las aceitunas se trituraron con un molino de martillos. La pasta resultante se batió en una termobatidora a 26 °C durante 30 minutos y luego se vertió en la centrífuga vertical tipo canasta, que gira a 3500 revoluciones por minuto y que operó durante 1 minuto. Tras repetir la centrifugación, la pasta se recogió a través del orificio inferior en un cilindro graduado. Después de reposar durante al menos 30 minutos, se leyó el volumen de aceite y se calculó el rendimiento. Los análisis fisicoquímicos de los aceites se externalizaron al Laboratorio Agroambiental del Gobierno de Aragón en Zaragoza, donde se determinaron la acidez, el índice de peróxidos, los coeficientes de extinción ultravioleta, los fenoles totales, los esteroides, el perfil de ácidos grasos y la estabilidad a la oxidación.

En cuanto al análisis sensorial, dado que solo se disponía de pequeños volúmenes de aceite, fue realizado por un experto perteneciente al Panel de Cata de Aceite de Oliva de Aragón. Se utilizaron copas estándar de cata azul, ya que no se evalúa el color. Se colocaron entre 14 y 16 mililitros de aceite en los vasos y se cubrieron con un cristal de reloj. La muestra se calentó a 28 °C. Los atributos positivos (afrutado, amargo y picante) y negativos (rancio, avinagrado...) se evaluaron en una escala de 0 a 10, según el COI (2018).

Elaboración de un primer censo de árboles singulares

Como sugiere Lafuente Benaches (2007), la preservación del patrimonio del aceite de oliva se extiende a la puesta en valor de los olivos centenarios, reconociéndolos como árboles monumentales, componentes integrantes del patrimonio biocultural. Estos árboles contribuyen significativamente a la interpretación de la estratificación del paisaje histórico y tienen un valor excepcional en la preservación de la memoria histórica de las comunidades donde se encuentran.

El método de medición para definir un árbol monumental se describe, para Cataluña, en la Ley 6/2020 (Comunidad Autónoma de Cataluña, 2020), que establece que la catalogación de olivos monumentales es a partir de 350 centímetros de perímetro, medidos a una altura de 130 centímetros desde el suelo. Los árboles monumentales, de acuerdo con estos criterios,

se localizaron en varias poblaciones. En este primer censo se seleccionaron individuos de las localidades de Guaso, Pueyo de Araguás, Riglos y Santa Eulalia de Gállego. Para su catalogación, se optó por la técnica de detección y medición de la luz (LiDAR, Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) para obtener una imagen escaneada completa de los olivos, según el procedimiento propuesto por Hadas y cols. (2017). Para cada uno de los árboles singulares se registraron las siguientes mediciones: ubicación, perímetro a 130 centímetros del suelo, altura mínima del perímetro, perímetro de la base, diámetro máximo de copa y volumen de copa, entre otras observaciones.

MATERIAL Y MÉTODOS

Caracterización molecular

El análisis genotípico se llevó a cabo en 92 olivos (tabla III), clasificados como variedad desconocida o que presentaba incertidumbres en la caracterización visual. Además, algunas variedades locales, identificadas previamente hace años, se incorporaron al análisis por estar situadas fuera de sus áreas de distribución reconocidas. El análisis mostró individuos asociados a 29 variedades no identificadas ni clasificadas previamente en el BGMO. El análisis de emparejamiento multilocus por pares mostró 58 genotipos no redundantes y 44 individuos con genotipo redundante pertenecientes a 12 variedades distintas, las cuales incluyeron entre 2 y 8 individuos redundantes, es decir, pertenecientes a la misma variedad o genotipo, aunque muestreados en localizaciones distintas. De los 46 individuos restantes, cada uno presentaba un genotipo único y característico. Cabe destacar que las muestras Acebuche_1 y Acebuche_2, pertenecientes al mismo cultivar (Acebuche) y originarias de la misma localidad (Boltaña), y Buera_1 y Buera_2 (de cultivar y localidad Buera), presentaron genotipos distintos. Además, las variedades Minutera de Boltaña y Minutera de Labata, consideradas sinónimas, mostraron genotipos diferentes.

El análisis de la diversidad genética realizado mediante los 96 marcadores EST-SNP de los 58 genotipos no redundantes reveló un número medio de alelos efectivos por locus (N_e) de 1,78. Los valores de frecuencia alélica menor (MAF) oscilaron entre 0,07 y 0,49, con una media de 0,34.

La mayoría de los 96 EST-SNP (65/96, el 67,7 %) presentaron valores de MAF superiores a 0,30. El índice de información de Shannon (I) mostró un rango de 0,25 a 0,69, con un valor medio de 0,62. Al examinar la heterocigosidad, los valores observados (H_o) oscilaron entre 0,14 y 0,76, con una media de 0,48, mientras que la heterocigosidad esperada (H_e) se situó entre 0,13 y 0,5, con un valor medio de 0,43. Un 80,2 % de los EST-SNPs (77/96) mostraron valores de contenido de información polimórfica (PIC) superiores a 0,30.

Los dos primeros ejes del PCoA representaron el 10,32 % y el 8,04 % de la varianza total respectivamente (fig. 2). Debido a la naturaleza del estudio, no es posible determinar la presencia de una estructura poblacional entre los genotipos estudiados asociada a su localización geográfica. No obstante, en la sección siguiente se comentan algunas tendencias al respecto.

El análisis de la estructura genética poblacional identificó $K = 4$ como el número más probable de grupos. Utilizando los coeficientes de mezcla (matriz Q) (fig. 3a), se evaluaron los genotipos individuales para determinar su proporción de pertenencia a cada grupo (K1 a K4). El más grande, K1, incluye 28 de los 58 genotipos, seguido de K4 con 12 y K2 y K3 con 9 cada uno. Dentro de cada grupo algunos genotipos presentan una mezcla ancestral (*ancestral mixture*) limitada. Por ejemplo, genotipos como Alía, Olivonero de Ayerbe, Cerruda de Liesa, Cerruda de Olvena, Gordal de Somontano, Nación, Neral, Rañinera y Salenca, en el grupo K1; Hojiblanca y Manzanilla de Sevilla, en el K2; Dulcera, Minutera de Labata y Olivonero de Alastuey, en el K3, y Bolvino, Pueyo de Araguás, Negral de Bierge, Panseñera y Verdal de Fígols, en el K4. Sin embargo, ciertos genotipos mostraron una notable mezcla ancestral con dos o más grupos predominantes, por ejemplo Aceitunero-2249 y Acebuche_1, agrupados en K1, con altas proporciones ancestrales tanto para K1 como para K4; en K2, Verto y Castanero, con proporciones ancestrales similares para K1, K2 y K4; los genotipos Royeta de Hoz, Buera_1 y Panseña fina, agrupados en K3, con elevadas proporciones ancestrales para los grupos K1 y K3, y Royeta de Baells, con proporciones de los grupos K2, K3 y, en menor medida, K4; y en el grupo K4, Caspolina y Olivera de Nadal, con proporciones ancestrales de K2 y K1 respectivamente. Esta mezcla ancestral de

Caracterización de aceites monovarietales

En la tabla 1 se muestran los resultados del índice de madurez de las 8 variedades de aceituna oscenses seleccionadas con diferentes genotipos. La elección de estas variedades estuvo guiada por múltiples criterios. Lo más importante fue la calidad del aceite, según lo indicado por los agricultores que participaron en la encuesta. Además, se tuvieron en cuenta los patrones de producción bienales observados en variedades específicas durante el año de estudio, la amplia disponibilidad de aceitunas para cosechar de los árboles, el estado sanitario de las aceitunas en ciertas variedades y la restricción presupuestaria del proyecto, que obligó a limitar los análisis a 8 variedades. La variedad Blancal presentó el mayor índice de madurez (5), seguida de Minutera de Labata (4,9) y Gordera de Abizanda (4,3), y la variedad Rosal, el menor índice de madurez, con 2,5 al inicio del envero.

Las diferentes variedades mostraron rendimientos notablemente diferentes en la extracción de aceite. La que presentó mayor rendimiento fue Blancal, con un 22,8 %, probablemente relacionado con un mayor índice de madurez. La variedad Olivonero de Ayerbe también tuvo un alto rendimiento de extracción de aceite (21,9 %), incluso con un índice de madurez más bajo. A su vez, la variedad Gordera de Abizanda tuvo el menor rendimiento en la extracción de aceite (8,1 %), lo que se puede atribuir al alto contenido de hueso en estos frutos.

Todos los parámetros fisicoquímicos (acidez, índice de peróxidos, K232 y K270) de los aceites se encontraban dentro de los límites establecidos por la normativa europea para la categoría de aceite de oliva virgen extra (COI, 2018). Las variedades Mochuto y Minutera de Viña tenían un contenido de fenoles totales muy alto, lo cual es relevante dado que son antioxidantes naturales. El contenido en ácido oleico osciló entre el 66,19 % para el aceite de oliva Blancal y el 79,22 % para el Rosal. En cuanto a los esteroides totales, el Blancal destacó por su altísimo contenido. En cuanto a la estabilidad a la oxidación, fue de aproximadamente 30 horas en Minutera de Labata y Minutera de Alquézar, resultado consistente con sus elevados contenidos de fenoles totales y ácido oleico.

En cuanto al análisis sensorial, se detectaron diferencias importantes entre las variedades. El aceite de oliva con mejor calidad sensorial fue el de la variedad Alía, con un frutado mayor, con notas florales y bajos valores

de amargor y picante medio. El aceite de la variedad Mochuto también tuvo un alto frutado, con notas de plátano, aunque con mayores valores de picante y amargor. Los aceites de las variedades Blancal y Olivonero de Ayerbe presentaron pequeños defectos de envejecimiento. En el primer caso, esto podría deberse al alto grado de maduración de las aceitunas; en el segundo, a que el aceite no estaba filtrado. No obstante, se necesitarían más análisis sensoriales para confirmar estos hallazgos. Otros aceites se clasificarían como aceites de oliva virgen extra.

Censo de árboles singulares

En cuanto al segundo enfoque para la valorización del patrimonio del olivo, las figuras 4 y 5 ilustran los resultados derivados de la aplicación del escaneo de precisión milimétrica basado en LiDAR para la catalogación

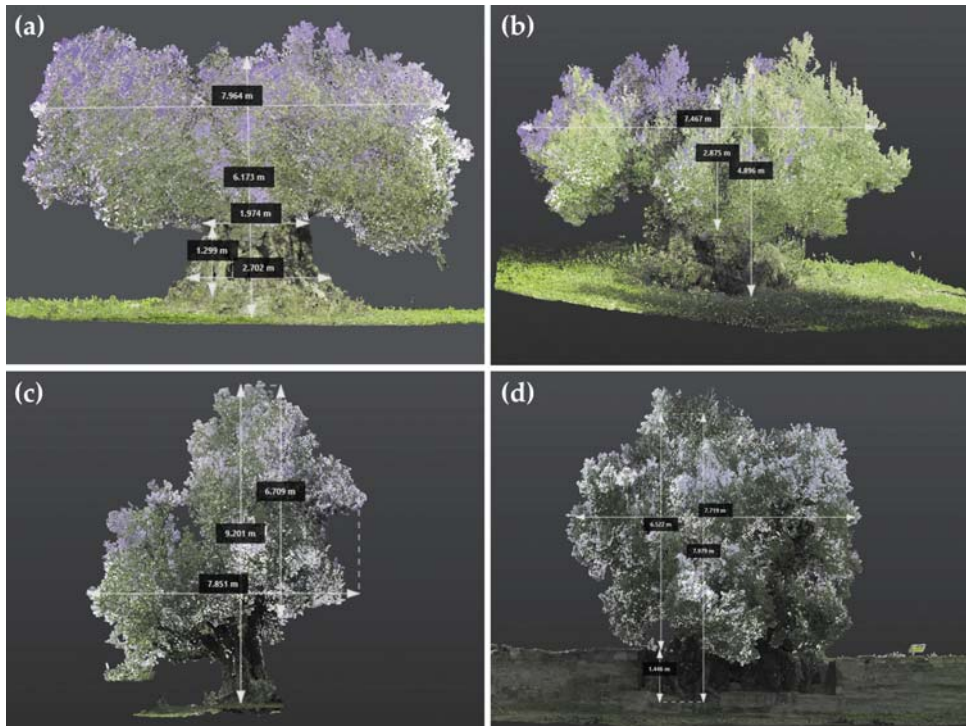


Fig. 4. Ejemplos de escaneo mediante LiDAR de árboles monumentales en las localidades de Santa Eulalia de Gállego (a), Riglos (b), Guaso (c) y Colungo (d).

Tabla 1. Caracterización de aceites monovarietales obtenidos a partir de 8 variedades de la provincia de Huesca: índice de madurez de la aceituna, rendimiento graso, parámetros fisicoquímicos y atributos sensoriales.

Variedad	Parámetros fisicoquímicos										Atributos sensoriales		
	Índice de madurez	Rendimiento (%)	Acidez (%)	Índice de peróxido (meqO ₂ /kg)	K232	K270	Fenoles totales (mg/kg)	Ácido oleico (%)	Esteroles (mg/kg)	Estabilidad a la oxidación (h)	Afrutado	Amaror	Espe-ciado
Mochuto	3,8	14,5	0,20 ± 0,02	3,5 ± 0,5	1,96 ± 0,10	0,17 ± 0,01	1026	75,94 ± 0,30	1235	21,5	4,7	4,5	4,2
Olivonero de Ayerbe	3,6	21,9	0,15 ± 0,02	4,7 ± 0,7	1,67 ± 0,08	0,10 ± 0,01	580	75,05 ± 0,30	1147	17,0	2,9	0,5	3,3
Alía	4,0	17,6	0,18 ± 0,02	3,5 ± 0,5	1,54 ± 0,08	0,10 ± 0,01	451	76,47 ± 0,31	1484	17,3	5,8	1,4	3,3
Blancal	5,0	22,8	0,16 ± 0,02	2,1 ± 0,3	1,83 ± 0,09	0,14 ± 0,01	800	66,19 ± 0,26	1645	13,7	3,3	4,0	3,7
Rosal	2,5	16,5	0,16 ± 0,02	4,5 ± 0,7	1,73 ± 0,08	0,13 ± 0,01	653	79,22 ± 0,32	1266	17,6	4,3	0,4	3,7
Gordera de Abizanda	4,3	8,1	0,17 ± 0,02	1,7 ± 0,3	1,62 ± 0,08	0,13 ± 0,01	753	75,96 ± 0,30	836	24,4	3,7	1,9	2,5
Minutera de Viña	3,6	17,1	0,22 ± 0,02	4,2 ± 0,6	1,74 ± 0,09	0,16 ± 0,01	864	78,10 ± 0,31	902	29,9	2,2	1,6	3,2
Minutera de Labata	4,9	10,3	0,13 ± 0,01	2,2 ± 0,3	1,64 ± 0,08	0,12 ± 0,01	691	76,99 ± 0,31	974	30,7	2,8	1,0	3,9

de los árboles singulares. A diferencia del largo proceso de caracterización manual convencional, esta técnica facilitó la creación de un gemelo digital en el momento de la recopilación de datos en aproximadamente 2 minutos. Este gemelo digital se puede revisar o utilizar para la extracción directa de parámetros de caracterización morfológica.

En la tabla II también se presentan los resultados del análisis sobre la edad de los olivos centenarios mediante diversas fórmulas de tasa de crecimiento: varias ecuaciones, basadas en las tasas de crecimiento radial, el radio a una altura de 1,0 metros en centímetros, el diámetro a una altura de 1,3 metros en centímetros y el perímetro en metros. Estas ecuaciones, derivadas de los estudios de Michelakis (2002), Pannelli y cols. (2009), Arnan y cols. (2012), Koniditsiotis (2020) y Camarero y cols. (2024), permitieron estimar la edad de los olivos antiguos.

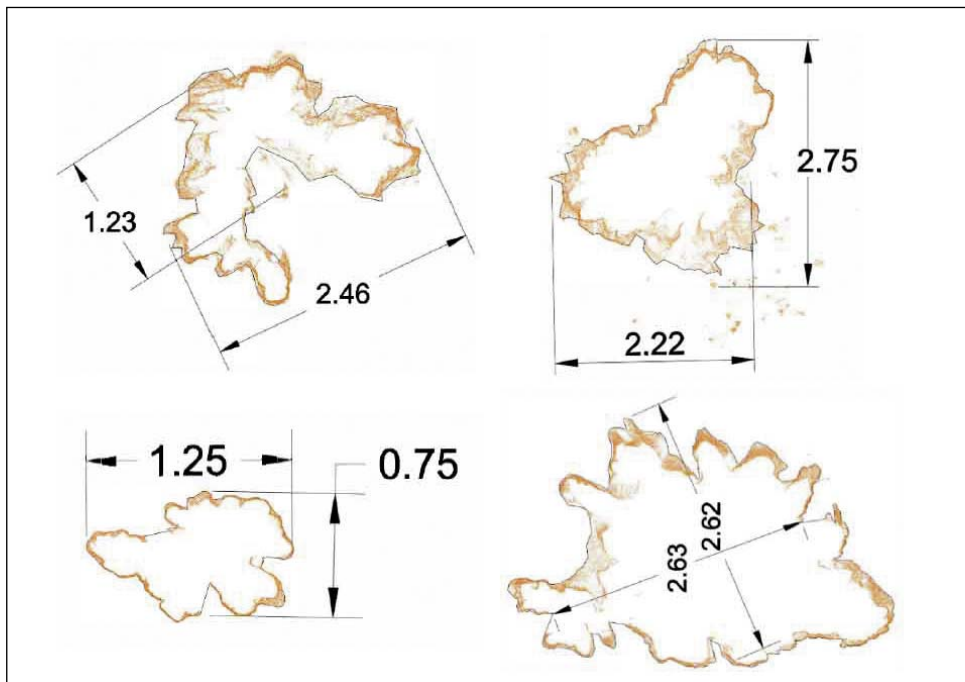


Fig. 5. Ejemplos de resultados del escaneo mediante LiDAR de los olivos monumentales mostrados en la figura 4: secciones transversales de árboles monumentales, a 1,3 metros sobre el nivel del suelo, en las localidades de Santa Eulalia de Gállego (a), Riglos (b), Guaso (c) y Colungo (d). Dimensiones, en metros.

Tabla II. Perímetros y áreas de las secciones a 1,30 metros sobre el nivel del suelo, junto con estimaciones de edad, para los ejemplos de árboles monumentales escaneados con LiDAR que se presentan en las figuras 4 y 5.

Localidad	Variedad	Perímetro (m)	Área (m ²)	Diámetro (mm)	Edad				
					Michelakis (2002)	Pannelli y cols. (2009)	Arnan y cols. (2012)	Konidisiotis (2020)	Camarero y cols. (2024)
Santa Eulalia de Gállego	Nueva variedad	10,78	2,26	2540	1693	1600	790	300	390
Riglos	Rañinera	10,07	3,68	2860	1907	1801	890	370	563
Guaso	Rañinera	4,25	0,59	1350	900	850	420	231	286
Colungo	Nueva variedad	16,15	5,52	3350	2233	2110	1042	533	654

La tabla III detalla los resultados del estudio del material vegetal por localidades, los olivos seleccionados para el análisis del ADN, los resultados de la comparación del análisis (BGMO), las variedades interesantes (nuevo genotipo) y algunas observaciones.

Tabla III. Resultados del estudio del material vegetal según las distintas localidades; los olivos seleccionados para el análisis del ADN; resultados del análisis con el material del BGMO; variedades interesantes (nuevo genotipo) y observaciones.

<i>Localidad</i>	<i>Nombre local</i>	<i>Análisis</i>	<i>Nombre en el BGMO</i>	<i>Nombre provisional del genotipo</i>	<i>Comentarios</i>
Abiego	Alcampelina de Abiego	No			
Abizanda	Aceitunero	Sí	Changlot real		Variedad de Valencia
	Albás	No			
	Blancal	Sí	Bolvino		Variedad de Aragón
	Gordera de Abizanda	Sí	Nación		Variedad de Huesca
	Royeta de Abizanda	Sí	Royeta de Abizanda		Variedad de Huesca
	Royeta de Abizanda	Sí	Royeta de Abizanda		Variedad de Huesca
	Cerruda	Sí	Cerruda de Liesa		Variedad de Huesca
	Gordal	No			
	Aceitunero_B	Sí	Aceitunero-2249		Variedad de La Rioja
Aínsa	Rañinera	No			
	Rañinera	No			
Albelda	Negreta	Sí	Manzanilla de Sevilla		
	Seira	Sí	Por asignar	Seira	Nueva variedad
Alquézar	Alquecerana	Sí	Por asignar	Alquecerana	Nueva variedad
	Mochuto	Sí	Mochuto		Variedad de Huesca
	Panseñera	Sí	Panseña		
	Panseña fina	Sí	Por asignar	Panseña fina	Nueva variedad
	Albás	Sí	Verdal del Pallars		Variedad de Cataluña
	Neral	Sí	Neral		Variedad de Huesca
Aniés	Olivo Celia	Sí	Por asignar	Olivonero de Ayerbe	Nueva variedad

Tabla III. (continuación)

<i>Localidad</i>	<i>Nombre local</i>	<i>Análisis</i>	<i>Nombre en el BGMO</i>	<i>Nombre provisional del genotipo</i>	<i>Comentarios</i>
Apiés	Olivonero de Apiés	No			
	Olivonero	No			
Artasona	Alía	Sí	Alía		Variedad de Huesca
	Cerruda de Artasona	Sí	Cerruda de Olvena		Variedad de Huesca
Asque	Royeta Asque	Sí	Royeta de Asque		Variedad de Huesca
	Royeta	Sí	Royeta de Asque		Variedad de Huesca
	Cercera	Sí	Royeta de Asque		Variedad de Huesca
	Bastarda	Sí	Por asignar	Bastarda	Nueva variedad
Ayerbe	Negral 1	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
	Olivonero de Ayerbe	Sí	Por asignar	Olivonero de Ayerbe	Nueva variedad
	Negral	No			
	Olivonero	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
Azlor	Olivera del Monte del Barón	No			
	Roya	No			
	Neral	No			
Baells	Royeta Baells	Sí	Por asignar	Royeta de Baells	Nueva variedad
Banastón	Rañinera	No			
	Rañinera	No			
	Rañinera	No			
Barbuñales	Verdeña	No			
	Verdeña	No	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
Benabente de Aragón	Biecuda de Benavente	Sí	Cerruda de Liesa		Variedad de Huesca
Berbegal	Verto	Sí	Por asignar	Verto	Nueva variedad
Bierge	Negral de Bierge	Sí	Negral de Bierge		Variedad de Huesca
Binéfar	Manzanilla	Sí	Hojiblanca		
Boltaña	Minutera	Sí	Por asignar	Minutera de Boltaña	Nueva variedad
	Cerruda	Sí	Neral		Variedad de Huesca

Tabla III. (continuación)

<i>Localidad</i>	<i>Nombre local</i>	<i>Análisis</i>	<i>Nombre en el BGMO</i>	<i>Nombre provisional del genotipo</i>	<i>Comentarios</i>
	Acebuche_1	Sí	Por asignar	Acebuche_1	Nueva variedad
	Acebuche_2	Sí	Por asignar	Acebuche_2	Nueva variedad
Buera	Albaretá	Sí	Albaretá		Variedad de Huesca
	Sebastián	Sí	Nación		Variedad de Huesca
	Olivo de la iglesia	Sí	Por asignar	Buera_1	Nueva variedad
	Falsa Blancal	Sí	Por asignar	Buera_2	Nueva variedad
Capella	Biecuda de Capella	Sí	Por asignar	Biecuda de Capella	Nueva variedad
Castillazuelo	Neral	No			
	Albás	No			
Colungo	Olivera de Nadal	Sí	Por asignar	Olivera de Nadal	Nueva variedad
Cregenzán	Gordal Cregenzán	Sí	Gordal de Somontano		Variedad de Huesca
Enate	Enate	Sí	Royeta de Asque		Variedad de Huesca
Escanilla	Tempraneta	Sí	Bolvino		Variedad de Aragón
	Cerruda 1	No			
	Desconocida	Sí	Por asignar	Escanilla	Nueva variedad
	Desconocida 2	No			
	Desconocida 3 San Juan	No			
	Injerto	Sí	Caspolina		Variedad de Aragón
	Mochuda	Sí	Cerruda de Liesa		Variedad de Huesca
	Sevillano	Sí	Por asignar	Sevillano_1	Nueva variedad
	Tempraneta	No			
Verderola	Sí	Por asignar	Verdolera	Nueva variedad	
Estadilla	Nación	Sí	Nación		Variedad de Huesca
	Piga	Sí	Piga		Variedad de Huesca
Guaso	Guaso 1	Sí	Rañinera		Variedad de Huesca
Hoz de Barbastro	Castanero	Sí	Por asignar	Castanero	Nueva variedad
	Dulce	Sí	Neral		Variedad de Huesca
	Picaceta	Sí	Morcaire		Variedad de Cataluña
	Royeta de Hoz	Sí	Por asignar	Royeta de Hoz	Nueva variedad

Tabla III. (continuación)

<i>Localidad</i>	<i>Nombre local</i>	<i>Análisis</i>	<i>Nombre en el BGMO</i>	<i>Nombre provisional del genotipo</i>	<i>Comentarios</i>
Hoz de Barbastro	Ley de Coronas	No			
Huesca	Olivo de la escuela	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
Ibieca	Picudo de Ibieca	Sí	Por asignar	Picudo de Ibieca	Nueva variedad
Ipiés	Monasterio Fanlo 1	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
	Monasterio Fanlo 2	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
Labata	Minutera de Labata	Sí	Por asignar	Minutera de Labata	Nueva variedad
	Minutera	No			
	Picudo de Labata	Sí	Picudo de Labata		Variedad de Huesca
	Rosal	Sí	Por asignar	Rosal	Nueva variedad
	Sevillano de Labata	Sí	Picual		
Lamata	Blancal Lamata	Sí	Bolvino		Variedad de Aragón
	Desconocida 1	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
	Desconocida 2	Sí	Bolvino		Variedad de Aragón
Lascuarre	Biequeruda	Sí	Biequeruda		Variedad de Huesca
Liesa	Cerruda	Sí	Cerruda de Liesa		Variedad de Huesca
	Negral	No			
Loscertales	Blancal	No			
	Roya	No			
Murillo de Gállego	Olivonero de Murillo	Sí	Por asignar	Olivonero de Murillo	Nueva variedad
	Alcampelina	Sí	Verdiell		
	Alquecerana	Sí	Nación		Variedad de Huesca
Peralta de Alcofea	Bravo Peralta	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
Peralta de la Sal	Apegalosa	No			
	Blancal	No			
	Manzanilla	No			

Tabla III. (continuación)

<i>Localidad</i>	<i>Nombre local</i>	<i>Análisis</i>	<i>Nombre en el BGMO</i>	<i>Nombre provisional del genotipo</i>	<i>Comentarios</i>
Piracés	Verdeña de Piracés	No			
Pueyo de Araguás	Común_1	Sí	Rañinera		Variedad de Huesca
	Común_2	Sí	Neral		Variedad de Huesca
	Pueyo_ Desconocida	No			
	Distinta_Pueyo	Sí	Rañinera		Variedad de Huesca
	Desconocida 2	Sí	Por asignar	Pueyo de Araguás	Nueva variedad
Radiquero	Minutera de Radiquero	No			
	Minutera de Viña	Sí	Por asignar	Minutera de Viña	Nueva variedad
Secastilla	Biequeruda	No			
Riglos	Verdeña	Sí	Rañinera		Variedad de Huesca
Roda	Olivonero_1	No			
	Olivonero_2	No			
Salas	Gordal de Salas	Sí	Manzanilla de Sevilla		
Santa Eulalia de Gállego	Casa Valentín	Sí	Por asignar	Olivonero de Ayerbe	Nueva variedad
	Olivonero de Santa Eulalia	Sí	Gordal de Somontano		Variedad de Huesca
	Olivonero de Ayerbe	No			
	Olivonero Alastuey	Sí	Por asignar	Olivonero Alastuey	Nueva variedad
	Verdeña	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
Sariñena	Dulcera	Sí	Por asignar	Dulcera	Nueva variedad
Sopeira	Alargada	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
	Casa Frasco	Sí	Verdeal del Pallars		Variedad de Cataluña
	Escario	Sí	Por asignar	Escario	Nueva variedad
	Grosal_Rañinera	Sí	Rañinera		Variedad de Huesca
	Mugrón	Sí	Rañinera		Variedad de Huesca
	Salenca	Sí	Por asignar	Salenca	Nueva variedad
Castilla y León	Choricera	Sí	Verdeal Trás-Os-Montes		Variedad de Portugal

DISCUSIÓN

Diversidad genética de las variedades tradicionales de olivo

El panel de 96 marcadores EST-SNP, validado por Belaj y cols. (2018 y 2022), ha demostrado su eficacia en la detección de genotipos redundantes y nuevos en el presente artículo. En nuestro análisis multilocus descubrimos que 44 de los 90 individuos muestreados eran genotípicamente redundantes. Los genotipos redundantes, incluso entre diferentes accesiones de bancos de germoplasma de olivo, se han identificado sistemáticamente en diversos estudios (Trujillo y cols., 2013; Belaj y cols., 2022; Mousavi y cols., 2017). Entre los genotipos no redundantes, 29 pertenecen a variedades no incluidas en el BGMO. Este conjunto de variedades tradicionales de olivo no genotipadas previamente representa un valioso recurso genético como fuente de diversidad genética.

Los valores de diversidad genética (N_e , MAF, H_o , H_e , I y PIC) obtenidos en este artículo, utilizando un tamaño muestral de genotipos no redundante entre 56 y 58, coincidieron con los valores medios publicados por Belaj y cols. (2022), con un tamaño muestral de genotipos no redundante entre 644 y 668. El PCoA mostró proporciones de la varianza total explicada semejantes a las publicadas por Belaj y cols. (2022), con valores de 10,99 % (eje 1) y 7,73 % (eje 2). Sin embargo, en este artículo la limitación en el número de individuos y de variedades muestreadas, así como la reducida distribución geográfica del muestreo, introducen un sesgo en la estructura poblacional imputada. Estudios previos llevados en un mayor rango de distribución geográfica han detectado estructuras genéticas poblacionales que, en algunos casos, están parcialmente asociadas con la localización de las variedades / cultivares analizados (D'Agostino y cols., 2018; Belaj y cols., 2022; Kaya y cols., 2013; Mousavi y cols., 2017; Belaj y cols., 2011). Miazzi y cols. (2020) estudiaron 177 genotipos procedentes de germoplasma de olivo raro y antiguo muestreados en la región italiana de Apulia. El estudio abarcaba análisis morfológicos, moleculares (marcadores microsátélites), tecnológicos y de estado fitosanitario, comparando estos genotipos con cultivares de referencia. El análisis de la estructura poblacional reveló una clara separación entre el germoplasma nacional italiano y las variedades examinadas localmente. Por el contrario, estudios como el realizado por Biton y cols. (2015) agruparon los cultivares en función de su finalidad

(aceite, mesa o doble finalidad) y no de su origen geográfico. En ese estudio no se exploró la correlación entre la estructura de la población y los parámetros fisicoquímicos o los atributos sensoriales del aceite, centrándose en la caracterización de variedades tradicionales y olivos singulares situados en el Alto Aragón mediante diversos enfoques tanto morfológicos y oleícolas como genotípicos.

Dado el tamaño de la muestra y el número de marcadores moleculares, este estudio no profundiza en aspectos filogenéticos, ya que para ello sería necesario un muestreo más amplio de variedades y la inclusión de algunas de referencia. No obstante, es plausible formular hipótesis sobre ciertas relaciones genotípicas y estructuras poblacionales putativas dentro de la zona muestreada. Los genotipos agrupados en el grupo más grande, K1, muestran una distribución geográfica predominante oeste-este, mientras que el grupo K2 lo hace de noreste a sureste. Los grupos K3 y K4 agrupan genotipos del centro y del este, pero el K3 también incluye genotipos del sureste, lo que contrasta con el K4, que comprende genotipos del noreste. Variedades como Hojiblanca, Picual y Manzanilla de Sevilla, tradicionalmente extendidas en los olivares del sur de España (Andalucía y Extremadura), junto con Changlot real en el este de España (Valencia) (Barranco Navero y cols., 2017) y Verdeal Trás-Os-Montes en Portugal (Cordeiro y cols., 2013), se agrupan junto con variedades minoritarias del Alto Aragón como Escanilla, Minutera de Boltaña, Verto y Castanero, en el grupo K2 (fig. 3). Esto puede deberse a que estas variedades altoaragonesas presentan una marcada mezcla en sus proporciones de ancestralidad, a diferencia de aquellas cultivadas en las regiones del sur y el este de España mencionadas anteriormente. En conjunto, la caracterización genotípica llevada a cabo en este artículo ha resultado valiosa para identificar genomas redundantes y novedosos entre las variedades tradicionales de olivo del Alto Aragón, aumentando el conocimiento de la diversidad genética presente en este cultivo.

Sobre los aceites monovarietales

Los 8 aceites de oliva monovarietales, a excepción del Blancal y el Olivonero de Ayerbe debido a defectos menores identificados en el análisis sensorial, cumplan los criterios de clasificación del aceite de oliva virgen extra según los parámetros fisicoquímicos y atributos sensoriales especificados en

la normativa europea (European Commission, 2022). Sin embargo, se observaron diferencias notables tanto en la composición de los frutos como en los aceites de oliva resultantes. El índice de madurez, que oscila entre 2,5 (indica el inicio del envero, con poca superficie coloreada de púrpura) para Rosal y 5 (indica el final del envero, cuando la aceituna adquiere color púrpura o negro) para las aceitunas Blancal, influyó significativamente en el rendimiento del aceite de oliva, que varió de 10,3 % a 22,8 %, y en la calidad (Uceda Ojeda y Hernández Fernández, 2017). Los mayores índices de madurez se asociaron con un mayor rendimiento de aceite de oliva. En el caso de la Minutera de Labata, el menor rendimiento podría atribuirse al gran tamaño del hueso.

También se observaron variaciones sustanciales en el contenido de fenoles totales de los aceites de oliva monovarietales, que oscilaron entre 451 miligramos por kilo para la variedad Alía y 1026 para Mochuto (más del doble). Estos valores superan a los de otros aceites varietales de Aragón, como Royal de Calatayud, Negral de Sabiñán, Arbequina (Rey Giménez y cols., 2023) o Empeltre (Abenoza y cols., 2018). El ácido oleico, un componente crucial del aceite de oliva, mostró un rango de 66,19 % a 79,22 %. El menor contenido se encontró en el aceite de oliva de las aceitunas más maduras (Blancal), mientras que el mayor fue el de las aceitunas menos maduras (Rosal). Este último contenido fue similar al descrito en trabajos anteriores para aceites de oliva aragoneses de las variedades Racimilla (Benito y cols., 2010) y Verdeña (Benito y cols., 2012). Además, se observaron diferencias en el contenido total de esteroides entre los 8 aceites de oliva monovarietales: la mayoría superaron los 1000 miligramos por kilo, límite establecido por la normativa europea para las características de pureza del aceite de oliva virgen extra (European Commission, 2022). Los aceites de Blancal presentaron el mayor contenido de esteroides, mientras que Gordera de Abizanda, Minutera de Alquézar y Minutera de Labata se mantuvieron dentro de los límites especificados.

Sorprendentemente, la estabilidad a la oxidación varió de forma significativa, con Minutera de Labata demostrando una estabilidad muy alta (30,7 horas) y los aceites de Blancal exhibiendo una estabilidad muy baja (13,7 horas). En todos los casos, excepto en Blancal, los valores superaron los reportados para otros aceites monovarietales de Aragón (Rey Giménez

y cols., 2023), con Empeltre mostrando valores inferiores (10,03 horas) (Abenoza y cols., 2018).

Todos los aceites de oliva presentaron atributos sensoriales positivos, incluyendo notas frutales, especiadas y amargas, excepto el Blancal y el Olivonero de Ayerbe, donde se detectaron pequeños defectos. Cabe destacar que el aceite de oliva Alía destacó como el más afrutado, mientras que el de la variedad Mochuto mostró las características amargas y picantes más pronunciadas, lo que se correlaciona con su alto contenido en fenoles totales. No se han documentado estudios previos sobre las propiedades organolépticas de estos aceites de oliva monovarietales.

Teniendo en cuenta tanto la composición química como la calidad sensorial, la producción de aceites de oliva monovarietales únicos podría ser una estrategia valiosa para la valorización de estas aceitunas autóctonas. Desde el punto de vista nutricional, los aceites de oliva monovarietales de Mochuto podrían ser especialmente interesantes por su alto contenido en fenoles, mientras que Alía podría ser una opción atractiva por sus características sensoriales. Además, la mezcla de estos aceites de oliva podría ofrecer la oportunidad de combinar los mejores atributos nutricionales y sensoriales.

Sobre la protección de los olivos monumentales

La valorización de los olivos monumentales se está llevando a cabo en toda la cuenca mediterránea, como lo ponen de manifiesto estudios previos realizados en Albania (Ismaili y Veshaj, 2014), Chipre (Anestiadou y cols., 2017), Líbano (Chalak y cols., 2015; Yazbeck y cols., 2018), Portugal (Veloso y cols., 2018), Italia (Licausi y cols., 2010; Criscuolo y cols., 2019; Schicchi y cols., 2021; Rotondi y cols., 2021; Ferrara e Ingemark, 2023), Israel (Petruccelli y cols., 2014 y 2021), Montenegro (Lazovic y cols., 2016), Creta (Bombarely y cols., 2021), Malta (Lageard y cols., 2021; Valeri y cols., 2022) y España (Díez y cols., 2011).

En el caso de España la protección de los olivos monumentales es reciente y no está legislada por el Gobierno español, aunque sí regulada en algunas comunidades autónomas, entre ellas Andalucía (Junta de Andalucía, 2015), Comunidad Valenciana (Comunidad Autónoma Valenciana,

2006), Cataluña (Comunidad Autónoma de Cataluña, 2020) y Aragón (Comunidad Autónoma de Aragón, 2015). En Andalucía Gómez Gálvez y cols. (2018) consideran olivos singulares aquellos ejemplares que destacan por su tamaño (perímetro y altura del tronco), su antigüedad, su producción y su interés estético y paisajístico. Este último aspecto es un activo para el desarrollo sostenible y la competitividad regional, lo que ha llevado incluso a considerar su reconocimiento patrimonial al mayor nivel internacional (Sánchez Martínez y Garrido Almonacid, 2017).

En el caso particular de Aragón solo algunos olivos centenarios están protegidos a través de la figura de árboles y arboledas singulares de Aragón (Comunidad Autónoma de Aragón, 2015), que incluye uno de los olivos objeto de estudio, la Olivera de Nadal (Gobierno de Aragón, 2022).

El hallazgo de numerosos árboles monumentales en toda la provincia de Huesca ha sugerido su indexación y su estudio, tanto con fines de conservación (en virtud de la legislación de protección del árbol singular) como para fomentar el turismo relacionado con el aceite de oliva en estas zonas rurales (se pueden prever rutas en la Hoya de Huesca, en el somontano de Guara y en la parte más alta de las comarcas de Sobrarbe y Ribagorza). Esto implicaría replicar en esta provincia proyectos que han tenido éxito en otras regiones: por ejemplo, *Apadrinaunolivo.org*, que tiene como objetivo recuperar olivos abandonados con aportaciones de donantes privados, financiando el cuidado de estos olivos y su recuperación (Bejko y Pérez Pérez, 2016); *Prospección de los olivos monumentales de Andalucía* (Belaj y cols., 2005), que localiza y caracteriza los olivos mencionados, y *Sistema agrícola olivos milenarios del Territorio Sénia* (Antich, 2014; Ninot y cols., 2018), reconocido como Sistema Importante del Patrimonio Agrícola Mundial (SIPAM) por la FAO, que no solo protege los olivos, sino que también los recupera, obtiene aceite y promueve el oleoturismo.

Limitaciones del estudio

En cuanto al análisis genotípico, la limitación en el número de muestras y la proximidad entre ellas, al centrarse el estudio en la provincia de Huesca, no permite extraer conclusiones sobre su estructura poblacional. La pequeña escala geográfica, así como la falta de información sobre los caracteres

morfológicos y fisiológicos, limita el desarrollo de conclusiones sobre el principal impulsor de la estructura poblacional de las muestras estudiadas más allá de la variedad a la que pertenecen. Por otro lado, sería necesario ampliar el número de muestras genotipadas en las que se analicen parámetros fisicoquímicos y organolépticos de sus aceites para determinar la influencia que estos atributos tienen o no en la estructura poblacional.

Sobre los aceites monovarietales, es crucial tener en cuenta que se necesitan investigaciones futuras para confirmar estos resultados preliminares. Dado que las 8 variedades de este estudio se cosecharon simultáneamente, es probable que las variaciones en el índice de madurez hayan afectado al rendimiento de la extracción, los parámetros fisicoquímicos y los atributos sensoriales. Los estudios posteriores deberían explorar la comparación de las variedades con un índice de madurez específico. Además, estudiar más años de cultivo y aumentar el volumen de la producción de aceite de oliva para realizar pruebas más amplias contribuiría a la solidez de los hallazgos. Las limitaciones para la valorización de estos aceites de oliva monovarietales se derivan de la superficie cultivada, que es relativamente pequeña. Para promover los aceites monovarietales comerciales, se recomienda realizar nuevas plantaciones de estas variedades en diferentes parcelas.

Respecto al censo monumental del olivo, es importante reconocer la existencia de hallazgos contradictorios en el campo de la estimación de la edad del olivo antiguo. Estudios recientes de Camarero y cols. (2021), Cherubini y cols. (2013), Cherubini y Lev-Yadun (2015) y Ehrlich y cols. (2017) han desafiado algunos de los supuestos y métodos utilizados en investigaciones previas. Camarero y cols. (2021) han sugerido que factores como las variaciones climáticas y las condiciones del suelo pueden influir significativamente en las tasas de crecimiento del olivo, lo que puede llevar a sobreestimaciones de la edad del árbol cuando se utilizan ciertas fórmulas. Cherubini y cols. (2013) han enfatizado la importancia de las técnicas dendrocronológicas para una determinación más precisa de la edad en olivos antiguos, destacando la necesidad de un enfoque multidisciplinario para la estimación de la edad que combine múltiples métodos para verificar los resultados de forma cruzada. Además, Ehrlich y cols. (2017) han planteado dudas sobre la fiabilidad del uso de ecuaciones de tasa de crecimiento lineal sin tener en cuenta los posibles patrones de crecimiento no

lineales en olivos antiguos. La reciente investigación de Camarero y cols. (2024) establece un avance que estima la edad mediante datación por carbono-14, ofreciendo un método más confiable para determinar la edad de olivos antiguos y desmitificar la abundancia de ejemplares milenarios. A la luz de estos hallazgos contradictorios, se hace evidente que la estimación de la edad de los olivos centenarios es un campo de investigación complejo y en evolución.

Las ecuaciones que utilizamos proporcionan un marco útil, pero deben considerarse junto con las ideas y las precauciones presentadas por los autores citados. La investigación futura debe tener como objetivo integrar estas variadas perspectivas y metodologías para mejorar nuestra comprensión de las verdaderas edades de estos notables árboles antiguos y los factores que influyen en su crecimiento.

CONCLUSIONES

El imperativo de reducir los insumos y adaptarse al cambio climático plantea nuevos desafíos para los cultivos futuros, lo que subraya la creciente necesidad de incorporar nuevas fuentes de variabilidad genética para el mejoramiento de cultivos. El análisis genotípico de este estudio identificó 29 variedades tradicionales de olivo no descubiertas previamente en el Alto Aragón, que ofrecen valiosos recursos genéticos para los programas de mejora del olivo. La conservación de estas variedades tradicionales ofrece una fuente de diversidad genética de la que sacar partido en el futuro y, a la vez, se perfila como crucial, ya que sirven como reservorio de recursos fitogenéticos. En un primer paso hacia su valorización, se elaboraron aceites de oliva monovarietales a partir de 8 de estas variedades, 6 de las cuales cumplían los criterios de aceite de oliva virgen extra según la normativa europea. Cabe reseñar que el aceite de oliva monovarietal de la variedad Mochuto destacó por su riqueza nutricional, con un alto contenido en fenoles, mientras que el aceite de oliva Alía presentó propiedades sensoriales distintivas.

Como enfoque alternativo o complementario de la valorización, se identificaron numerosos árboles monumentales en toda la provincia de Huesca, aptos para la conservación bajo la legislación de protección del árbol singular y como catalizadores para promover el turismo relacionado

con el aceite de oliva en las zonas rurales, especialmente en las comarcas del somontano de Guara, Sobrarbe y Ribagorza. Estos hallazgos subrayan el rico patrimonio olivarero del Alto Aragón y su potencial de valorización sin explotar.

RECOMENDACIONES

Respecto al análisis genotípico, la limitación en el número de muestras y la proximidad entre ellas, al centrarse el estudio en el Alto Aragón, no permite extraer conclusiones sobre su estructura poblacional. La pequeña escala geográfica, así como la falta de información sobre caracteres morfológicos y fisiológicos, limitan el desarrollo de las conclusiones sobre el principal motor de la estructura poblacional de las muestras estudiadas más allá de la variedad a la que pertenecen. Por otro lado, sería necesario aumentar tanto el tamaño muestral como el número de marcadores moleculares, así como incorporar análisis fisicoquímicos y organolépticos de sus aceites para determinar la influencia que estos atributos pueden tener en la estructura poblacional.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la Diputación Provincial de Huesca a través del programa Félix de Azara.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abenoza, M., J. Raso, R. Oria y A. C. Sánchez Gimeno (2018). Modulating the bitterness of Empeltre olive oil by partitioning polyphenols between oil and water phases: Effect on quality and shelf life. *Food Sci. Technol. Int.*, 25: 47-55.
- Anestiadou, K., N. Nikoloudakis, M. Hagidimitriou y A. Katsiotis (2017). Monumental olive trees of Cyprus contributed to the establishment of the contemporary olive germplasm. *PLOS ONE*, 12: e0187697.
- Antich, J. (2014). Conservación y puesta en valor de los olivos milenarios del Territorio Sénia. PH. *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 22: 2-4.
- Arnan, X., B. C. López, J. Martínez Vilalta, M. Estorach y R. Poyatos (2012). The age of monumental olive trees (*Olea europaea*) in northeastern Spain. *Dendrochronologia*, 30: 11-14.

- Barranco Navero, D., R. Fernández Escobar y L. Rallo Romero (2017). *El cultivo del olivo*. 7.^a ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 1008 pp.
- Baulny, O. (1968). Tres textos de Félix de Azara: los olivos de Alquézar. *Pirineos*, 73: 26-41.
- Bejko, A., y L. Pérez y Pérez (2016). *Rentabilidad financiera y análisis socio-ambiental de la recuperación del olivar abandonado en Oliete (Teruel)*. Unidad de Economía Agroalimentaria y de los Recursos Naturales. 66 pp.
- Belaj, A., C. Muñoz Díez, D. Barranco Navero y L. Rallo Romero (2005). Prospección y caracterización de los olivos singulares de Andalucía. En *Proceedings of the V Congreso Ibérico de Ciências Hortícolas. IV Congresso Iberoamericano de Ciências Hortícolas*: 147-151. Porto, Portugal, 22-27 de mayo de 2005.
- Belaj, A., M. d. C. Domínguez García, S. G. Atienza, N. Martín Urdíroz, R. de la Rosa, Z. Satovic, A. Martín, A. Kilian, I. Trujillo, V. Valpuesta y cols. (2011). Developing a core collection of olive (*Olea europaea* L.) based on molecular markers (DArTs, SSRs, SNPs and agronomic traits). *Tree Genet. Genomes*, 8: 365-378.
- Belaj, A., R. de la Rosa, I. J. Lorite, R. Mariotti, N. G. M. Cultrera, C. R. Beuzón, J. J. González Plaza, A. Muñoz Mérida, O. Trelles y L. Baldoni (2018). Usefulness of a new large set of high throughput EST-SNP markers as a tool for olive germoplasm collection management. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1320.
- Belaj, A., A. Ninot, F. J. Gómez Gálvez, M. El Riachy, M. Gurbuz Veral, M. Torres, A. Lazaj, T. Klepo, S. Paz, J. Ugarte y cols. (2022). Utility of EST-SNP markers for improving management and use of olive genetic resources: A case study at the Worldwide Olive Germplasm Bank of Córdoba. *Plants*, 11: 921.
- Benito, M., R. Oria y A. Sánchez Gimeno (2010). Characterization of the olive oil from three potentially interesting varieties from Aragón (Spain). *Food Sci. Technol. Int.*, 16: 523-530.
- Benito, M., M. Abenoza, R. Oria y A. Sánchez Gimeno (2012). Physico-chemical, nutritional and sensory characterization of Verdeña, Verdilla and Royal varieties olive oil. *Riv. Ital. Sostanze Grasse*, 89: 319-325.
- Biton, I., A. Doron Faigenboim, M. Jamwal, Y. Mani, R. Eshed, A. Rosen, A. Sherman, R. Ofir, S. Lavee, B. Avidan y cols. (2015). Development of a large set of SNP markers for assessing phylogenetic relationships between the olive cultivars composing the Israeli olive germplasm collection. *Molecular Breeding*, 35: 1-14.
- Bombarely, A., A. G. Doulis, K. K. Lambrou, C. Zioutis, E. Margaritis y G. Koubouris (2021). Elucidation of the origin of the monumental olive tree of Vouves in Crete, Greece. *Plants*, 10: 2374.
- Camarero, J. J., M. Colangelo A. Gracia-Balaga, M. A. Ortega-Martínez y U. Büntgen (2021). Demystifying the age of old olive trees. *Dendrochronologia*, 65: 125802.
- Camarero, J. J., R. Touchan, C. Valeriano, I. Bashour y J. Stephan (2024). Dating the Noah trees to improve age estimates in centennial and millennial olive trees. *Dendrochronologia*, 84: 126181.

- Casanova, J., J. M. González y J. Viñuales (2013). Variedades de olivo cultivadas en la provincia de Huesca. *Lucas Mallada*, 15: 29-47.
- Chalak, L., H. Haouane, L. Essalouh, S. Santoni, G. Besnard y B. Khadari (2015). Extent of the genetic diversity in Lebanese olive (*Olea europaea* L.) trees: A mixture of an ancient germplasm with recently introduced varieties. *Genet. Resour. Crop Evol.*, 62: 621-633.
- Cherubini, P., T. Humbel, H. Beekman, H. Gärtner, D. Mannes, C. Pearson, W. Schoch, R. Tognetti y S. Lev-Yadun (2013). Olive tree-ring problematic dating: A comparative analysis on Santorini (Greece). *PLOS ONE*, 8: e54730.
- Cherubini, P., y S. Lev-Yadun (2015). The olive tree-ring problematic dating. *Antiquity*, 88: 290-291.
- COI (2018). *Sensory analysis of olive oil. Method for the organoleptic assessment of virgin olive oil (COI/T.20/Doc. n.º 15/Rev. 10)*. International Olive Oil Council. Madrid. 20 pp.
- Colás Latorre, G. (2015). Olivos y aceite en Aragón en la Edad Moderna. *Chron. Nova Rev. Hist. Mod. Univ. Granada*, 41: 71-98.
- Comunidad Autónoma de Aragón (2015). Decreto Legislativo 1/2015, de 29 de julio, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Espacios Protegidos de Aragón (BOA-d-2015-90531). Gobierno de España. Madrid. 44 pp.
- Comunidad Autónoma de Cataluña (2020). Ley 6/2020, de 18 de junio, de Protección, Conservación y Puesta en Valor de los Olivos y Olivares Monumentales (BOE-A-2020-7382). Gobierno de España. Madrid. 12 pp.
- Comunidad Autónoma Valenciana (2006). Ley 4/2006, de 19 de mayo, de Patrimonio Arbóreo Monumental (BOE-A-2006-11581). Gobierno de España. Madrid. 12 pp.
- Cordeiro, A., M. Santos, N. Morais y A. Miranda (2013). As variedades de oliveira de referência, Portugal oleícola. En J. Böhm (ed.), *O Grande Livro da Oliveira e do Azeite*: 188-220. Dinalivro. Lisboa.
- Criscuolo, N., F. Guarino, C. Angelini, S. Castiglione, T. Caruso y A. Ciatelli (2019). High biodiversity arises from the analyses of morphometric, biochemical and genetic data in ancient olive trees of south of Italy. *Plants*, 8: 297.
- D'Agostino, N., F. Tarento, S. Camposeo, G. Mangini, V. Fanelli, S. Gadaleta, M. M. Miazzi, S. Pavan, V. di Rienzo, W. Sabetta y cols. (2018). GBS-derived SNP catalogue unveiled wide genetic variability and geographical relationships of Italian olive cultivars. *Sci. Rep.*, 8: 15877.
- Díez, C. M., I. Trujillo, E. Barrio, A. Belaj, D. Barranco y L. Rallo (2011). Centennial olive trees as a reservoir of genetic diversity. *Ann. Bot.*, 108: 797-807.
- Ehrlich, Y., L. Regev, Z. Kerem y E. Boaretto (2017). Radiocarbon dating of an olive tree cross-section: New insights on growth patterns and Implications for age estimation of olive trees. *Frontiers in Plant Science*, 8: 1918.

- El Bakkali, A., L. Essalouh, C. Tollon, R. Rivallan, P. Mournet, A. Moukhli, H. Zaher, A. Mekkaoui, A. Hadidou, L. Sikaoui y cols. (2019). Characterization of Worldwide Olive Germplasm Banks of Marrakech (Morocco) and Córdoba (Spain): Towards management and use of olive germplasm in breeding programs. *PLOS ONE*, 14 (10): e0223716.
- Elguea Blanco, J. A., A. Romero Aroca, B. Lizar, R. Peregrina, J. Rall i García, A. Íñiguez, J. Tous Martí, J. García, J. L. Plana, M. S. Gracia y cols. (2006). Producción y variedades. Selección clonal de la variedad de olivo “Empeltre” en el valle del Ebro e islas Baleares. *Frutic. Prof.*, 160: 13-20.
- Escudero Población, A., S. Manchego Losa y J. J. López López (2019). *Anuario de Estadística 2019. Estadísticas Agrarias y de Alimentación*. Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. 856 pp.
- Espada Carbó, J., F. Abós Castel y M. Gracia Gómez (2009). *Varietades de olivo cultivadas en el somontano de Barbastro y características de sus aceites*: 1-13. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- European Commission (2022). *Commission Delegated Regulation (EU) 2022/2104 of 29 July 2022 supplementing Regulation (EU) No 1308/2013 of the European Parliament and of the Council as regards marketing standards for olive oil, and repealing Commission Regulation (EEC) No 2568/91 and Commission Implementing Regulation (EU) No 29/2012*. Official Journal of the European Union. Bruselas. 22 pp.
- FAO (2018). *Vías sostenibles para lograr la participación de la alimentación y la agricultura en el logro de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (COAG/2018/3/Rev. 1)*. Comité de Agricultura de la FAO. Roma.
- FAO (2020). *Estrategia de la FAO para la incorporación de la diversidad biológica en todos los sectores agrícolas*. FAO. Roma.
- Ferrara, V., y D. Ingemark (2023). The entangled phenology of the olive tree: A compiled ecological calendar of *Olea europaea* L. over the last three millennia with Sicily as a case study. *GeoHealth*, 7: e2022GH000619.
- Font i Forcada, C., A. Fernández i Martí, J. Viñuales, J. González, A. Oriol y M. J. Rubio Cabetas (2014). Estudio genético entre las distintas accesiones locales de olivo (*Olea europaea* L.) en la Comunidad de Aragón. *Rev. Frutic.*, 36: 30-48.
- Francis, R. M. (2017). Pophelper: An R package and web app to analyse and visualize population structure. *Mol. Ecol. Resour.*, 17: 27-32.
- Frichot, E., y O. François (2015). LEA: An R package for landscape and ecological association studies. *Methods Ecol. Evol.*, 6: 925-929.
- Gain, C., y O. François (2021). LEA 3: Factor models in population genetics and ecological genomics with R. *Mol. Ecol. Resour.*, 21: 2738-2748.
- García Vico, J., P. Gallardo Plaza y P. Moreno Doménech (2009). Patrimonio oleícola y puesta en valor de aceites típicos en circuitos comerciales de radio corto: labelización de agrotiendas. *Sumuntán: Anuario de Estudios sobre Sierra Mágina*, 27: 123-136.

- Gobierno de Aragón (2022). Orden AGM/526/2022, de 18 de abril, por la que se procede a la declaración del árbol singular de Aragón denominado “Olivera de Nadal”. Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- Gómez Gálvez, F. J., J. Cano Rodríguez, A. Belaj Memaj y R. de la Rosa Navarro (2018). *Prospección de nuevos recursos genéticos de olivo en Andalucía*. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. Junta de Andalucía. Jaén. 17 pp.
- Gómez Gálvez, F. J., A. Ninot, J. C. Rodríguez, S. P. Compañ, J. U. Andrevia, J. A. G. Rubio y A. Belaj (2024). New insights in the Spanish gene pool of olive (*Olea europaea* L.) preserved ex situ and in situ based on high-throughput molecular markers. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1267601.
- Gómez Rodríguez, M. V., C. Beuzon, J. J. González Plaza y A. M. Fernández Ocaña (2020). Identificación de una aceituna (*Olea europaea* L.) con un nuevo conjunto de marcadores SSR. *Jineta. Recursos. Crop Evol.*, 68: 117-133.
- Gracia, M. S., P. Marco, S. Bielsa, J. Espada y E. Arranz (2023). Estudio del momento óptimo de la recolección en la variedad “Empeltre” en el Bajo Aragón. En *Proceedings of the XII Simposium científico-técnico Expoliva. Foro de la Tecnología Oleícola y la Calidad*. TEC-30, Jaén, 10-12 de mayo de 2023.
- Hadas, E., A. Borkowski, J. Estornell y P. Tymkow (2017). Automatic estimation of olive tree dendrometric parameters based on airborne laser scanning data using alpha-shape and principal component analysis. *GISci. Remote Sens.*, 54: 898-917.
- Ismaili, H., y Z. Veshaj (2014). Determining the age of olive trees through morphometric methods. *Int. J. Agric. Innov. Res.*, 3: 574-578.
- Jahnke, G., J. Smidla y P. Poczai (2022). MolMarker: A simple tool for DNA fingerprinting studies and polymorphic information content calculation. *Diversity*, 14: 497.
- Jordán de Asso, I. (1798). *Historia de la economía política de Aragón*. IFC / Gara d’Edicions. Zaragoza.
- Junta de Andalucía (2015). Decreto 103/2015, de 10 de marzo, por el que se aprueba el Plan Director del Olivar (BOJA 19/03/2015). Junta de Andalucía. Sevilla. 147 pp.
- Kaya, H. B., O. Cetin, H. Kaya, M. Sahin, F. Sefer, A. Kahraman y B. Tanyolac (2013). SNP discovery by illumina-based transcriptome sequencing of the olive and the genetic characterization of Turkish olive genotypes revealed by AFLP, SSR and SNP markers. *PLOS ONE*, 8: e73674.
- Koniditsiotis, S. (2020). Registration and promotion of monumental olive trees in Greece. *Adv. Soc. Sci. Res. J.*, 7: 107-121.
- Lafuente Benaches, M. M. (2007). Concepto y protección del patrimonio arbóreo monumental. *Rev. Adm. Pública*, 172: 403-437.
- Lageard, J. G. A., D. Sultana y F. Q. Brearley (2021). Veteran trees in an historic landscape: The Bidnija olive grove, Malta. *J. Archaeol. Sci. Rep.*, 38: 103094.

- Lazovic, B., M. Adakalic, C. Pucci, T. Perovic, D. Bandelj, A. Belaj, R. Mariotti y L. Baldoni (2016). Characterizing ancient and local olive germplasm from Montenegro. *Sci. Hortic.*, 209: 117-123.
- Licausi, E., N. Di Virgilio, A. Rotondi y M. Magli (2010). Olive tree in Emilia Romagna region: An ancient crop, a new environmental and cultural economic resource. *Ital. J. Agron.*, 5: 27.
- López Bermúdez, F., F. Alonso Sarriá, C. Conesa García, E. Hernández Laguna e Y. Álvarez Rogel (2004). La huella ecológica del cultivo del olivo en España y su aplicabilidad como indicador de agricultura sostenible. *Papeles de Geografía*, 39: 141-155.
- Mallor, C., E. Igartua y P. Errea (2014). Las variedades tradicionales en el panorama actual de la mejora y la producción sostenible. En R. Socias i Company, M. J. Rubio Cabezas, A. Garcés-Claver, C. Mallor y J. M. Álvarez (eds.), *La obtención de variedades: desde la mejora clásica a la mejora genética molecular*: 35-61. Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón. Zaragoza.
- Mariotti, R., A. Belaj, R. de la Rosa, L. León, F. Brizioli, L. Baldoni y S. Mousavi (2020). EST-SNP study of *Olea europaea* L. uncovers functional polymorphisms between cultivated and wild olives. *Genes*, 11: 916.
- Megino y Metauten, A. D. (1804). *El aceite*. Biblioteca del Banco de España. Venecia. 258 pp.
- Miazzi, M. M., V. di Rienzo, I. Mascio, C. Montemurro, S. Sion, W. Sabetta, G. A. Vivaldi, S. Camposeo, F. Caponio, G. Squeo y cols. (2020). Ger. O. P.: An integrated project for the recovery of ancient and rare olive germplasm. *Frontiers in Plant Science*, 11: 73.
- Michelakis, N. (2002). Monumental olive trees in the world, Greece and Crete. En N. Michelakis (ed.), *Olive and Oil in Crete*: 32-43. Association of Olive Municipalities of Crete. Sitía, Creta.
- Mousavi, S., R. Mariotti, L. Regni, L. Nasini, M. Bufacchi, S. Pandolfi, L. Baldoni y P. Proietti (2017). The first molecular identification of an olive collection applying standard simple sequence repeats and novel expressed sequence tag markers. *Frontiers in Plant Science*, 8: 1283.
- Ninot, A., W. Howad, M. J. Aranzana, R. Senar, A. Romero, R. Mariotti, L. Baldoni y A. Belaj (2018). Survey of over 4,500 monumental olive trees preserved on-farm in the northeast Iberian Peninsula, their genotyping and characterization. *Sci. Hortic.*, 231: 253-264.
- Ortega Nieto, J. M. (1958). Intensificación y mejora de la producción del olivo en España. *Boletín del Instituto de Estudios Giennenses*, 18: 83-106. Jaén.
- Pannelli, G., S. Pandolfi, L. Baldoni y G. Bongi (2009). Selezione e valorizzazione di olivi antichi in Umbria. En *Proceedings of the IV Convegno Nazionale Piante Mediterranee – Le Potenzialita' del Territorio e dell'Ambiente: Raccolta degli Atti*: 93-104. Nova Siri Marina, Matera, 7-10 de octubre de 2009.
- Pascual Guillén, M. (1988). Las condiciones climáticas de las comarcas de Teruel y su influencia en el cultivo del olivo. *Teruel*, 79: 167-184.

- Peakall, R., y P. E. Smouse (2006). GenAIEx 6: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research. *Mol. Ecol. Notes*, 6: 288-295.
- Peakall, R., y P. E. Smouse (2012). GenAIEx 6.5: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research –An update. *Bioinformatics*, 28: 2537-2539.
- Petrucelli, R., C. Giordano, M. C. Salvatici, L. Capozzoli, L. Ciaccheri, M. Pazzini, O. Lain, R. Testolin y A. Cimato (2014). Observation of eight ancient olive trees (*Olea europaea* L.) growing in the Garden of Gethsemane. *Comptes Rendus Biol.*, 337: 311-317.
- Petrucelli, R., C. Giordano, M. C. Salvatici, D. Beghè, M. Rodolfi, A. Fabbri y C. Benelli (2021). Characterization and conservation of “Olivo della Strega”: An ancient olive tree, precious resource for natural and cultural heritage. *Rend. Lincei. Sci. Fis. e Nat.*, 32: 311-324.
- Priego Jaramillo, J. M. (1930). *Las variedades del olivo en Aragón y La Rioja*. Instituto de Investigaciones Agronómicas. Ministerio de Fomento. Servicio de Publicaciones Agrícolas. Madrid. 48 pp.
- Puyuelo Arilla, J. M. (2009). *Estudio morfológico del fruto de ocho variedades de olivo*. Programa de doctorado 5000-1. Universidad de Zaragoza. 247 pp.
- Rallo Romero, L. (2005). *Variedades de olivo en España*. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Sevilla. 496 pp.
- Rey Giménez, R., S. Vázquez Ayala, D. Laya Reig y A. C. Sánchez-Gimeno (2023). Chemometric and physico-chemical characterization of fruit and olive oils from autochthonous cultivars grown in Aragón (Spain). *Foods*, 12: 803.
- Romero Aroca, A., J. Plana Baliarda y J. Tous Martí (1993). Selección clonal de la población de olivos “Arbequina”. *Agric. Rev. Agropecu. Ganad.*, 730: 413-416.
- Rosa, R. de la, C. M. James y K. R. Tobutt (2002). Isolation and characterization of polymorphic microsatellites in olive (*Olea europaea* L.) and their transferability to other genera in the Oleaceae. *Mol. Ecol. Notes*, 2: 265-267.
- Rotondi, A., A. Fabbri, T. Ganino, D. Beghè, M. Magli y L. Morrone (2021). Genetic and landscape characterization of ancient crops: The olive tree, a case study in northern Italy. En L. Mueller, V. G. Sychev, N. M. Dronin y F. Eulenstein (eds.), *Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes*: 457-477. Springer International Publishing. Cham.
- Sánchez-Martínez, J. D., y A. Garrido-Almonacid (2017). Sobre la diversidad del olivar andaluz: del territorio al paisaje (el caso de la provincia de Jaén). *Estud. Geográficos*, 78: 523-551.
- Schicchi, R., C. Speciale, F. Amato, G. Bazan, G. Di Noto, P. Marino, P. Ricciardo y A. Geraci (2021). The monumental olive trees as biocultural heritage of Mediterranean landscapes: The case study of Sicily. *Sustainability*, 13: 6767.
- Serreta Oliván, A., R. Sancho Cohen, A. C. Sánchez Gimeno, P. Martín Ramos, J. A. Cuchí Oterino y J. Casanova Gascón (2023). Traditional olive tree varieties in Alto Aragón (NE Spain): Molecular characterization, single-varietal oils, and monumental trees. *Agriculture*, 13: 2204 <<https://doi.org/10.3390/agriculture13122204>>.

- Trujillo, I., M. A. Ojeda, N. M. Urdiroz, D. Potter, D. Barranco, L. Rallo y C. M. Díez (2013). Identificación del Banco Mundial de Germoplasma de Olivo de Córdoba (España) mediante SSR y marcadores morfológicos. *Árbol Genet. Genomas*, 10: 141-155.
- Uceda Ojeda, M., y M. Hernández Fernández (2017). La calidad del aceite de oliva. En D. Barranco Navero, R. Fernández Escobar y L. Rallo Romero (eds.), *El cultivo del olivo*: 839-868. Mundi Prensa. Madrid.
- Valeri, M. C., D. Mifsud, C. Sammut, S. Pandolfi, E. Lilli, M. Bufacchi, V. Stanzione, V. Passeri, L. Baldoni, R. Mariotti y cols. (2022). Exploring olive genetic diversity in the Maltese islands. *Sustainability*, 14: 10684.
- Veloso, M. M., M. C. Simões-Costa, L. C. Carneiro, J. B. Guimarães, C. Mateus, P. Feveireiro y C. Pinto-Ricardo (2018). Olive tree (*Olea europaea* L.) diversity in traditional small farms of Ficalho, Portugal. *Diversity*, 10: 5.
- Viñuales Andreu, J. (2007). *Las variedades de olivo del Somontano*. Área de Desarrollo de la Diputación Provincial de Huesca / IEA. Huesca.
- Viñuales Andreu, J., y J. M. González (2008). El olivo de la Hoya a estudio. *Hoya Actual*, 19: 22-23.
- Yazbeck, E. B., G. Abi Rizk, A. Battistini, G. Hassoun, L. Geagea y F. Veronesi (2018). Molecular characterization of ancient olive trees in Bshaaleh Lebanon. *Int. J. Plant Anim. Environ. Sci.*, 8: 19-29.
- Zorrilla Alcaine, F. (1996). *Árboles singulares del Bajo Aragón*. Mira. Zaragoza. 212 pp.

LUCAS MALLADA, 26 (2024)

ISSN 0214-8315, ISSN-e 2445-060X

<http://revistas.iea.es/index.php/LUMALL>

UNA MINA DE HIERRO EN SANTA MARINA (BAGÜESTE)

Ana Ortas del Río¹ | Mariano Oliván Esteban¹ |
Enrique Salamero Pelay² | José Antonio Manso Alonso³ |
José Antonio Cuchí Oterino³

RESUMEN Se presenta la localización de la mina Bobaral / Ángela, en las proximidades de la ermita de Santa Marina, en Bagüeste, así como su documentación administrativa y algunos datos geológicos y geoquímicos. Fue una mina no explotada.

PALABRAS CLAVE Mina. Hierro. Bagüeste (Comarca de Sobrarbe, Huesca).

ABSTRACT The location of the Bobaral / Ángela mine, in the vicinity of the Santa Marina hermitage in Bagüeste, is presented, as well as its administrative documentation and some geological and geochemical data. It was not exploited.

KEYWORDS Mine. Iron. Bagüeste (Comarca de Sobrarbe, Huesca, Spain).

¹ Sección de Espeleología del Club Atlético Sobrarbe. anao_32@hotmail.com, marianoolivanes@gmail.com

² rodellar.blogspot.com

³ Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Carretera de Cuarte, s/n. E-22071 Huesca. manso@unizar.es, cuchi@unizar.es

INTRODUCCIÓN

Al margen de las minas de cobre de los somontanos, no hay muchas de elementos metálicos en las Sierras Exteriores pirenaicas en comparación con las existentes en la Zona Axial. Es evidente que la naturaleza caliza del armazón de estas sierras no es propicia para acumulaciones metálicas de interés, con la excepción del hierro, salvo en la zona oriental, donde destacó la minería de manganeso en el entorno de Estopiñán del Castillo y Purroy de la Solana, que merece un estudio adecuado.

En este conjunto tampoco el hierro es un mineral abundante. En la zona más occidental de la provincia hay documentos administrativos sobre algunas denuncias a inicios del siglo xx. En Salinas de Jaca, Mariano Lorient denunció en 1901 una mina denominada *Lucía* (AHPHu, IN 198/338) que probablemente estaba situada en el camino entre esa localidad y la Osqueta, donde es posible observar algunas catas. En 1908 Ángel Remigio Cebrián Zanirac, vecino de Triste, inició el registro de una desmesurada concesión de 1200 hectáreas con el nombre de *Angelina*, centrada en una calicata en el paraje Esponga de Miguel; renunció a los dos meses (AHPHu, IN 198/398). En 1912 Juan Andrés Hipólito Plat Hilario, vecino de Ruoms, en el municipio francés de Ardèche, representado por Florencio Elarre Recalde, domiciliado en el Café de la Unión, calle Zaragoza, 2, de Huesca, solicitó una mina de hierro en Riglos de 60 pertenencias denominada *Lepinar*; como punto característico, se señalaba “una roca fija que se halla en la orilla izquierda del Gállego” (AHPHu, IN 204/729). El barbastrense y culto Luciano Labastida Oliván (Ara, 1996), y más que activo emprendedor minero, reclamó alegando que la solicitud presentaba una “gran indefinición, que hay muchas rocas en el Gállego” y no existía el topónimo *Lepinar* pero sí *Lecinar*, donde ya tenía registrada la mina Virgen de la Peña. Al saber que la Comisión Provincial sugería un informe del ingeniero de Minas, Plat renunció el 9 de mayo de 1913 (Cuchí, 2013). En el Archivo Municipal de Las Peñas de Riglos, procedente del de Salinas de Jaca, se encuentra la concesión de las minas Consuelo, Gonzalo y Victoriano en 1918 (AMLPR, 13/33).

En la zona central, entre el Gállego y el Cinca, hubo mucha menos actividad minera. En la hoja 23 (Huesca) del *Mapa metalogenético de España*, 1 : 200 000 (IGME, 1974), se señala una mina de pirita en la sierra de Balcés de morfología desconocida. Bastantes años más tarde, la hoja 249 (Alquézar) del

Mapa geológico de España, 1 : 50 000, serie Magna, descarta cualquier actividad minera en esta zona. Sin embargo, hay algunos indicios en ella. Cerca de Betorz está la denominada mina *Sotarraña* (Villarroel y Cuchí, 2013), que básicamente parece una extracción de ocre ferruginoso para pigmento. Más recientemente Cuchí y cols. (2024), al estudiar las minas de la zona, Rodellar y Arcusa, señalan la existencia de algunas solicitudes de minas de hierro hacia la mitad del siglo xx, unas en la sierra de Balcés y otras en Capramote, al este de El Pueyo de Morcat. El presente artículo se centra en las primeras.

MINA BOBARAL

(AHPHu, IN 00183/1886)

El 10 de noviembre de 1958 José Urbán Seral, de 56 años, industrial y residente en Las Almunias de Rodellar, y Ángel Urbán Monclús, labrador en Bagüeste, y ambos naturales de esta localidad, representados por Fernando Goded Javierre, de Zaragoza, presentaron una solicitud de permiso de investigación de 304 hectáreas en los términos municipales, en aquel momento, de Sarsa de Surta y Rodellar. El origen del perímetro solicitado se situaba en la fuente del Catarrón. Continuaba, siguiendo la toponimia citada en el documento, por la fuente de los Cuchás, puntal y barranco de Peña Canto, lindero de la finca Fuen de Hueso, Articas, Balseta del Enar, linderos de campos de Bagüeste, loma de las Pequeras, senda del Grao, senda Sarrán del Pin, fuente Fajalenera, Bozuelo, senda del Petazal, ereta de las Barracas, cima de loma y tozal de Las Forcas, para retornar al origen.

La solicitud se acompañaba de un escueto informe con doble plano firmado por Salvador Bermejo, facultativo de Minas en marzo de 1959. Indicaba que el terreno, de topografía accidentada, era de edad eocena y en él se encontraban algunos afloramientos ferruginosos alterados. Se pretendía realizar calicatas y, de ser positivas, emboquillar algún socavón en el primer año, con un presupuesto de 44 000 pesetas. En caso de dar resultado favorable, se pensaría en una mina de tres galerías, a intervalos de unos 20 metros, rampas interiores y extracción por la inferior. Los interesados pagaron 3600 pesetas para el reconocimiento y la demarcación. También acompañaban certificados de empadronamiento, bautismo y declaración jurada de ser españoles. Hecha la exposición pública de la solicitud por el plazo de un mes, más la de demarcación

en el *Boletín Oficial de la Provincia de Huesca*, el 26 de septiembre se demarcó por el ingeniero de Minas Julián Escudero Aladrén, acompañado del ayudante Emilio Moreno Moreno y en presencia de los interesados, más Víctor Alpín Nasarre, de Bagüeste, y Ángel Villacampa Escartín, del que se dice que también era vecino de Bagüeste. Se dispuso de un punto auxiliar a 291 metros de la ya mencionada fuente del Catarrón, desde donde se divisan las esquinas sureste de la caseta de los Corralillos, la ermita de Santa Marina y el corral este de la casilla de peones camineros de la carretera de Boltaña.

El 3 de noviembre se otorgó el permiso. Se publicó en el *Oficial de la Provincia de Huesca* el día 30 del mismo mes, y el 6 de diciembre en el *Boletín Oficial del Estado*. Figuraba ya como representante Villacampa, que señaló su domicilio en el Hotel Maza de la plaza de España de Zaragoza. En mayo de 1961 este comunicó que los trabajos habían dado comienzo, bajo la dirección de Julián Auría Royo, quien en marzo del año siguiente notificó que estaban parados y que ya no trabajaba en esta mina. El 15 de diciembre se ofició a los promotores para que presentasen en quince días la memoria para 1963 so pena de cancelación. El 2 de mayo de 1963 se propuso la cancelación. El 16 se canceló y se dio un plazo de quince días para presentar alegaciones. No hubo respuesta. El 19 de mayo de 1965 se reiteró, y constan un recibí manual del 26 de mayo de José Urbán y otro del 9 de junio de Ángel Urbán.

Pero aquí no acaba esta historia. En 1960 los mismos promotores, acompañados por Villacampa, solicitaron permiso de investigación para otras 140 hectáreas en el entorno de Castellazo con el nombre de *Punta de Capramote* (AHPHu, IN 000171/001904). Villacampa, ya solo, pidió en 1964 otro permiso de investigación por 160 pertenencias con el nombre de *Ventura* e inicio en la Cruz de Santa Quiteria, en la divisoria entre Santa María de Buil, Sarsa de Surta y Arcusa (AHPHu, IN 00174/1964). Y repitió en 1966, con el nombre de *Villacampa*, otras 160 hectáreas (AHPHu, IN 00174/1963). Vicisitudes acerca de estos permisos se pueden encontrar en Cuchí y cols. (2024). Por ahora no se han hallado rastros de labores en esta zona. Destaquemos que Villacampa, en Huesca, y Ángel Urbán, en Barcelona, firmaron los recibís de algunas de las comunicaciones, dado que la gran emigración ya vaciaba esta zona. Incluso la fusión de ayuntamientos retardó la emisión de las correspondientes certificaciones municipales.

Pero volvamos a mina Bobaral, ahora con un nuevo interesado.

La mina se demarcó el 28 de octubre de 1966 por el ingeniero Manuel Cañada Martínez, acompañado por el ayudante Tomás Sánchez González. Fueron testigos el peticionario y los zaragozanos Luciano Coalla Fernández y Luis Roldán Elorz, este último padre de un conocido político. La figura 1 presenta el plano de esta segunda demarcación con las distancias y los rumbos de la fuente del Catarrón a la ermita de Santa Marina con un punto auxiliar. En diciembre de 1966 se propone la concesión y se hacen las publicaciones, y en febrero de 1969 se comunicó. Sin más información, en 1975 se canceló el permiso por haber transcurrido los tres años para el permiso de investigación y no haber solicitado la concesión. En el anverso de un sobre se señala que el interesado ya no reside en la dirección aducida.

LA BÚSQUEDA DE LAS MINAS

El grupo de minas antiguas de la sección de Espeleología del Club Atlético Sobrarbe lleva más de una docena de años buscando viejas minas. En enero de 2025, aprovechando una fase de buen tiempo, se realizó una



Fig. 2. En un valle profundamente colonizado por erizones (*Echinopartum horridum*), el punto 1 (H: 30. X: 744 879; Y: 4 689 916; Z: 1469) señala una depresión circular de 3 metros de diámetro y 1 de profundidad junto a una zanja de unos 10 metros de longitud por 1 de profundidad. El punto 2 (X: 744 568; Y: 4 689 870; Z: 1425) es una zanja similar a la anterior. El punto 3 (X: 744 522; Y: 4 689 901; Z: 1419) es una calicata de 1 metro cuadrado de superficie y 1 metro de profundidad.



Fig. 3. Arriba, a la izquierda, vista general del vallecito, de oeste a este (Santa Marina se encuentra en la cima de la derecha). Arriba, a la derecha, vista de la zanja n.º 1 (la depresión circular se halla a la izquierda de la persona). Abajo, a la izquierda, zanja n.º 2. Abajo, a la derecha, calicata n.º 3.



Fig. 4. Panorámica desde la ermita de Santa Marina hacia el suroeste. (El punto rojo señala la zanja n.º 2)

exploración en la pista de Bagüeste a la ermita de Santa Marina siguiendo indicaciones de Adolfo Castán sobre la existencia de mineral de hierro. No se encontraron restos de mineral, salvo algún trozo mínimo, en todo el recorrido, aunque el último tramo se hizo por senda. Sin embargo, a la vuelta, en una mezcla de causalidad e intuición, en el vallecito situado inmediatamente al norte de la ermita, muy colonizado por erizones, se localizaron una depresión circular, dos zanjas y una calicata. Esta zona se encuentra en las inmediaciones del meridiano de Greenwich y cambio de uso en coordenadas UTM. Su ubicación aparece en la figura 2.

CARACTERÍSTICAS DEL MINERAL

Dado el alto recubrimiento de erizón, solo se han recogido algunas muestras (fig. 4) cuyas características son similares a las del informe de Salvador Bermejo para mina Bobaral: “afloramientos ferruginosos, constituidos por óxidos y algún carbonato, atacados por los agentes atmosféricos”, que, como se ha dicho, afloran en calizas del Luteciense, formación Guara media-1 (IGME, s. f.). Las muestras recogidas presentan un exterior limonitizado, con un interior de hematita.

En la base oeste del relativamente cercano, a vista de pájaro, puntón de Sarsa de Surta, se aprecian delgadas laminaciones ferruginosas (fig. 4 de Cuchí y cols., 2024) que pudieran ser *hard grounds* o rellenos en diaclasas. Su aspecto es diferente al de lo observado en Santa Marina. El ya citado mapa del IGME (s. f.) señala en este vallecito, cultivado en el pasado, la presencia de arcillas de descalcificación de origen kárstico y edad genérica del Cuaternario. El flanco oeste del anticlinal de Balcés, desde Bagüeste a Santa Marina y más allá, se caracteriza por amplias leneras sin prácticamente suelo y se conoce una pequeña dolina de hundimiento (Ortas y cols., 2023).

La presencia de acumulaciones ferruginosas asociadas al karst ha sido señalada por numerosos autores (véase, por ejemplo, Filippov, 2004). Esta acumulación del mineral es consecuencia de la disolución de la caliza. En la sierra de Guara y alrededores es conocida la presencia de nódulos de hierro (*cagafierro*) que pudieron ser utilizados en las pinturas rupestres (Martín-Ramos y cols., 2024).

ANÁLISIS DEL MINERAL MEDIANTE pXRF

Se han analizado dos conjuntos de muestras. Una, la recogida en enero de 2025 en la zanja n.º 1 (*Zanja*). La segunda, aportada por Adolfo Castán y obtenida en diciembre de 2024 en la pista, en las cercanías de Santa Marina (*Pista*). En todos los casos, véase la figura 5. El aspecto exterior es rojo amarillento, el interior es rojo oscuro más ferruginoso. Las muestras del grupo primero son más finas y arenosas, mientras que las del grupo *Pista* son más gruesas, del orden de 1-2 centímetros. Se analizaron mediante un espectrofotómetro de rayos X portátil con ánodo de plata, modelo Niton™ XL3t GOLDD+ de Thermo Fisher Scientific (Waltham, Massachusetts, EE. UU.). Los resultados se presentan en la tabla.

Aunque era previsible, sorprende el elevado nivel de hierro de algunas muestras, especialmente en el núcleo. El resto de los metales presentes están al nivel de las trazas. Los metales ausentes son los esperables en una roca sedimentaria. Como también es habitual, aparecen igualmente manganeso y titanio, pero en menor porcentaje. La presencia de cobalto en alguna muestra es sugerente, pero debería ser comprobada. La sílice alcanza valores del orden del 10 %, excepto en el núcleo de la última muestra de *Pista*. Salvo en alguna muestra, el contenido en calcio es bajo, lo que sugiere un lavado importante. La presencia de azufre pudiera ser debida a un origen inicial como piritita en el material ferruginoso.



Fig. 5. Ejemplares de mineral de la zona de Santa Marina: a la izquierda, mineral recogido por Adolfo Castán; a la derecha, mineral recogido por los autores del artículo.

Tabla. Resultados de las muestras de mineral de hierro de mina en Santa Marina (Bagüeste).
El núcleo es el resultado de partir la muestra inmediatamente anterior.

	<i>Zanja</i>					<i>Pista</i>				
	<i>Superficie</i>				<i>Núcleo</i>	<i>Superficie</i>				<i>Núcleo</i>
	1	2	3	4	4 bis	5	6	7	8	8 bis
<i>Ba</i>	0,034	0,035	0,035	0,03	0,04	0,03	0,036	0,018	0,045	0,027
<i>Bal</i>	22,823	58,811	74,279	28,581	36,628	35,69	23,966	49,247	24,537	37,724
<i>Mo</i>	0,002	<LOD	<LOD	0,002	<LOD	0,004	0,004	0,002	0,005	0,007
<i>Zr</i>	0,003	0,006	0,007	0,006	0,003	0,007	0,004	0,003	0,006	<LOD
<i>Sr</i>	<LOD	0,002	0,002	0,004	<LOD	0,004	0,004	0,004	0,002	<LOD
<i>Rb</i>	0,002	<LOD	0,003	0,003	0,002	0,003	0,002	<LOD	0,002	<<LOD
<i>As</i>	0,058	0,01	0,008	0,042	0,045	0,121	0,183	0,069	0,122	0,141
<i>Pb</i>	0,011	<LOD	0,003	<LOD	<LOD	<LOD	0,011	<LOD	0,006	<LOD
<i>W</i>	0,026	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
<i>Zn</i>	0,048	0,017	0,009	0,037	0,046	0,026	0,021	0,01	0,025	0,009
<i>Cu</i>	0,012	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,02	0,011	0,023	<LOD
<i>Ni</i>	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,036	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
<i>Co</i>	0,118	<LOD	<LOD	0,22	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,11	<LOD
<i>Fe</i>	52,863	26,638	8,608	41,999	52,39	45,247	55,957	27,69	52,87	60,518
<i>Mn</i>	0,462	0,309	<LOD	0,38	<LOD	0,069	0,069	<LOD	<LOD	<LOD
<i>Cr</i>	0,078	0,062	0,042	0,052	0,059	0,069	0,061	0,06	0,072	0,058
<i>V</i>	0,075	0,066	0,037	0,046	0,046	0,056	0,069	0,052	0,051	0,044
<i>Ti</i>	0,09	0,124	0,142	0,181	0,066	0,204	0,161	0,156	0,2	<LOD
<i>Ca</i>	0,567	0,241	0,423	4,557	0,432	1,039	0,534	13,464	0,914	0,106
<i>K</i>	0,863	0,514	0,924	1,144	0,451	0,854	0,684	0,547	0,766	0,102
<i>Al</i>	8,239	1,828	1,558	6,976	3,439	6,542	7,166	2,444	8,328	0,247
<i>P</i>	0,129	0,051	0,058	0,067	0,055	0,092	0,112	<LOD	0,089	0,065
<i>Si</i>	11,577	11,149	13,741	13,521	6,168	9,304	9,477	5,261	10,515	0,844
<i>Cl</i>	0,032	0,038	0,033	0,031	0,062	0,03	0,034	0,038	0,024	0,091
<i>S</i>	0,16	0,099	0,087	0,232	0,027	0,103	0,083	0,122	0,08	0,016
<i>Mg</i>	1,708	<LOD	<LOD	1,879	<LOD	<LOD	1,341	0,796	1,189	<LOD

Bal: Suma de porcentajes de elementos con un número atómico igual o inferior al del sodio.

<LOD: Por debajo del límite de detección. En todas las muestras, Sb, Sn, Cd, Pd, Ag, Nb, Bi, Se, Hg y Au se hallan por debajo del límite de detección.

A MODO DE COMENTARIO

Sorprende y admira al mismo tiempo el interés de un grupo local, y aparentemente sin ninguna experiencia, por desarrollar una actividad minera en una zona sin antecedentes. Es bien conocido que este negocio crea grandes ilusiones y profundos descalabros. Pero alguna información tenían los promotores dado que, durante la década de los cincuenta del siglo XX, subió el precio del óxido de hierro (Dos Santos Ferreira y cols., 2008).

No es fácil saber qué llevó a pensar que existían importantes recursos de hierro en el entorno de Santa Marina. En el plano de la memoria de la mina Bobaral, los afloramientos se limitan a unas escasas y simples líneas. Por otro lado, la logística era compleja: a 1400 metros de altura, con más de 1 hora andando por senda desde Bagüeste, sin electricidad; a más de 2 horas de sendero y 700 metros de desnivel desde Rodellar, una de las carreteras más próximas, y con la ermita de Santa Marina y una mínima caseta como únicas edificaciones. Además, ya había comenzado el gran éxodo rural y no es fácil saber de dónde saldrían los trabajadores, menos aún los especializados, como los expertos en explosivos. En estas condiciones no es posible conocer si consiguieron el oportuno permiso para dinamita. Pero tenían ilusiones, dado que la zona solicitada es muy amplia, lo que supondría el pago de cánones importantes. Y el presupuesto anual, en ambos casos, es también elevado, en una época donde un piso de protección oficial costaba 6000 pesetas.

En el mundo de la minería, como en otros, la información es clave. Los primeros promotores utilizaron la pequeña estratagema de poner como punto de partida la fuente del Catarrón, de muy difícil ubicación excepto para vecinos locales, y obviar cualquier referencia a la ermita de Santa Marina, mucho más conocida. Por otra parte, la segunda solicitud, en agosto de 1965, es prácticamente una copia de la primera, cancelada en mayo del mismo año. Es posible que los primeros inversores cedieran la información al segundo, que se presume muy ajeno al mundo minero por profesión y residencia. También es posible que fueran los técnicos que hicieron los primeros estudios quienes transmitieran la información. La figura 6 muestra la superposición de los dos perímetros.

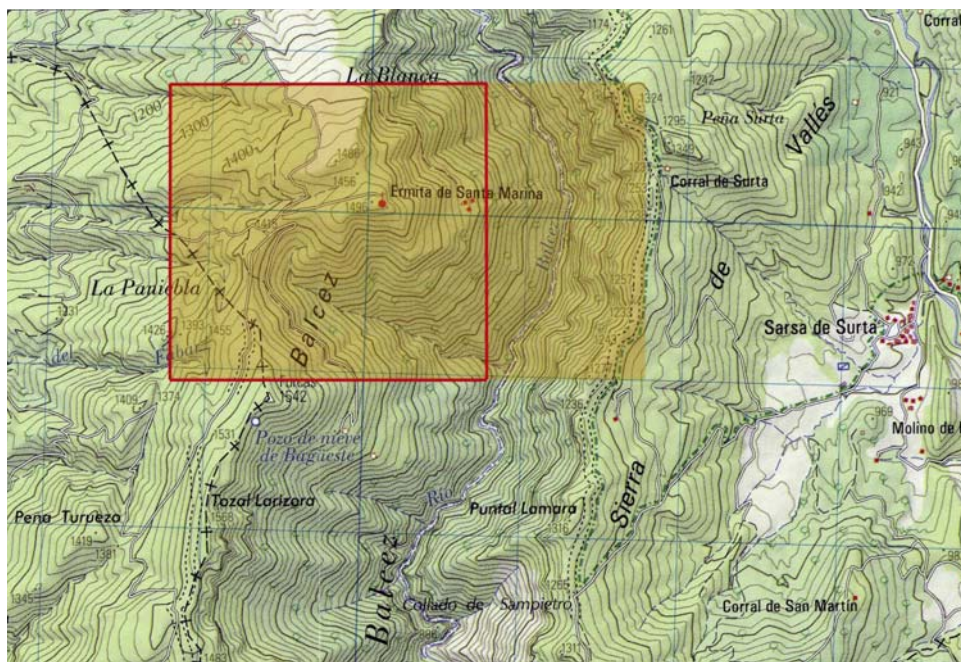


Fig. 6. Superposición de demarcaciones de la mina Bobaral (recuadro rojo) y de la mina Ángela.

A este respecto, es conocida la figura de los agentes de Minas, que se dedicaban a intermediar y especular en la materia y practicaban en bastantes casos la *minería de papel*, actuando como representantes, realizando denuncias y permisos de investigación a coste mínimo y buscando inversores. En este sentido, aunque fallecido en 1926, sería necesario estudiar la labor del ya citado Luciano Labastida Oliván, muy activo durante el *boom* minero previo a la Primera Guerra Mundial.

Por último, hasta el presente no se han encontrado indicios de que se realizara en el pasado metalurgia artesanal del hierro en las Sierras Exteriores, al contrario de lo que sucedió en el Pirineo central.

AGRADECIMIENTOS

A Adolfo Castán, por inspirarnos a buscar esta mina, y al personal del Archivo Histórico Provincial de Huesca (AHPHu), por el escaneo de los expedientes administrativos.

El trabajo se realiza dentro del Convenio entre el Museo de Ciencias Naturales de la Universidad de Zaragoza y la Dirección General de Energía y Minas de la Diputación General de Aragón.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ara, J. C. (1996). El escritor Luciano Labastida Oliván (1863-1926). *La Campana de Huesca*, 17: 8-11.
- Castán, A. (2024). *La sierra de Guara. Pueblos deshabitados: por las rutas del silencio*, t. 2. Editorial Pirineo. Huesca. 253 pp.
- Cuchí, J. A. (2013). ¿Hubo minas de hierro en Riglos? *Comarca*, 106: 14.
- Cuchí, J. A., A. Ortas, E. Salamero, M. Oliván, M. Gil y R. Ruiz (2024). Minas y petróleo en el Sobrarbe meridional y central. *Nabaín*, 27: 25-30.
- Dos Santos Ferreira, J. A., D. H. Guimarães Lacerda, L. G. Esteves Leocádio y L. Lucas Soares Silva (2008). The evolution of the iron ore prices and the iron ore production since 1940. *Actas 2nd International Symposium on Iron Ore, September 22-26, 2008*: 544-555. São Luís City (Maranhão).
- Filippov, A. G. (2004). Mineral deposits in karst. En J. Gunn (ed.), *Encyclopedia of Caves and Karst Science*: 514-515. Taylor & Francis. Nueva York / Londres.
- IGME (s. f.). *Magna 50. Hoja 249 (Alquézar)*. IGME. Madrid.
- IGME (1974). *Mapa metalogénico de España 200k (serie antigua) – Hoja 23 (Huesca)*. IGME. Madrid.
- Martín-Ramos, P., J. A. Cuchí-Oterino y M. Bea Martínez (2024). Análisis por fluorescencia de rayos X portátil de pigmentos de arte levantino y esquemático de abrigos del río Vero (Huesca, noreste de España). *Saldvie*, 24 (1): 7-32.
- Ortas, A., M. Oliván, M. Gil, R. Ruiz, V. Viñals, F. Lera, R. Larma, J. L. Villarroel, E. Salamero, J. López y J. A. Cuchí (2023). Tres cavidades atípicas del Sobrarbe meridional. *Espeleopirineos*: 67-71.
- Salamero, E. (2016). *Minería*. En <<https://rodellar.blogspot.com/2016/06/mineria.html>>.
- Villarroel, J. L., y J. A. Cuchí (2013). La cavidad conocida como Sotarraña, en Betorz (Huesca). *Lucas Mallada*, 15: 191-201.

LUCAS MALLADA, 26 (2024)

ISSN 0214-8315, ISSN-e 2445-060X

<http://revistas.ica.es/index.php/LUMALL>

ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES GEOLÓGICOS Y SUELOS SALINOS EN LA ZONA OCCIDENTAL DE LA HOYA DE HUESCA

José Antonio Cuchí Oterino¹ |

Nicolás Omiste Rodrigo² | Raquel Zufiaurre Galarza³

RESUMEN El presente artículo tiene como objetivo contribuir al conocimiento de los suelos y los materiales geológicos salinos en el sector occidental de la comarca de la Hoya de Huesca. Para ello se seleccionaron 11 zonas singulares por sus características salinas y la presencia de vegetación halófila. Se tomaron muestras de suelo superficial a diferentes profundidades (0-30, 30-60 y 60-90 centímetros, respectivamente), en función de las características del terreno, y se obtuvieron 28 muestras. En el laboratorio se realizaron el extracto de saturación y los de relación suelo : agua 1 : 2,5 y 1 : 5. En el primero se determinaron la conductividad eléctrica (CE), el pH y las concentraciones de iones (CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) y se estableció la relación de adsorción de sodio (SAR). Los resultados se analizaron mediante herramientas gráficas y estadísticas, incluyendo diagramas de Piper, análisis de componentes principales, histogramas y diagramas de dispersión. Esto permitió identificar las sales predominantes en los suelos y los materiales estudiados. Se clasificaron las muestras según su CE y su SAR, y destacó la presencia de suelos salino-sódicos, sódicos y salinos. Su grado

¹ Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Carretera de Cuarte, s/n. E-22071 Huesca. cuchi@unizar.es

² nicomiste@gmail.com

³ Departamento de Química Analítica. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. IUCA. Carretera de Cuarte, s/n. E-22071 Huesca. zufi@unizar.es

de salinidad los califica como “muy fuertemente salinos”, según la FAO. Destacan los datos de Modrán, en el término municipal de Biscarrués, que se pueden clasificar como de tipo Solonetz.

PALABRAS CLAVE Material geológico. Suelos sódicos y salinos. Caracterización iónica. Hoya de Huesca.

ABSTRACT The aim of this paper is to contribute to the knowledge of saline soils and geological materials in the western sector of the Hoya de Huesca region. To this end, 11 unique areas were selected for their saline characteristics and the presence of halophilic vegetation. Surface soil samples were taken at different depths (0-30, 30-60 and 60-90 centimeters) depending on the characteristics of the soil, obtaining 28 samples. In the laboratory, the soil saturation extract was obtained and 1 : 2.5 and 1 : 5 soil : water tests were carried out. In the former, electrical conductivity (EC), pH, and ion concentrations (CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_3^{2-} , NO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ and K^+) were determined and the sodium adsorption ratio (SAR) was determined. The results were analysed using graphical and statistical tools, including Piper diagrams, principal component analysis, histograms and scatter plots, to identify the predominant salts in the soils and materials studied. The samples were classified according to their EC and SAR, highlighting the presence of saline-sodic, sodic and saline soils. The degree of salinity of the soils is considered as ‘very strongly saline’ according to the FAO. The data from Modrán, in the municipality of Biscarrués, are notable as being of the Solonetz type.

KEYWORDS Geological material. Sodic and saline soils. Ionic characterization. Hoya de Huesca (Spain).

INTRODUCCIÓN

Con excepción de la ciudad de Huesca, la comarca de la Hoya tiene una economía fundamentalmente agroganadera, centrada en el somontano pirenaico, con dominancia de cultivos de cereal de invierno en secano y, en menor medida, leñosos. Por el contrario, en la zona norte, en la zona montañosa, ha desaparecido la tradicional agricultura de subsistencia y hoy se asiste a un impresionante proceso de *rewilding* en flora y fauna, tema que cae, obviamente, fuera de este artículo.

En la zona agrícola meridional el mantenimiento de la calidad del suelo es un elemento fundamental. Erosión, salinización y encharcamiento son los tres grandes factores antrópicos de destrucción de suelos (Lal y cols., 1989). El último se relaciona básicamente con el regadío, pero los dos primeros

pueden aparecer tanto en secano como en regadío y hacerlo de forma conjunta. Ambos factores se engloban dentro de los procesos de desertización o desertificación y se conjuntan con los efectos del cambio climático.

Este artículo se centra en la presencia de suelos con altos contenidos en sales en la zona occidental de la comarca de la Hoya de Huesca. Hasta tiempos relativamente recientes, los suelos de la comarca han sido poco estudiados. El mapa de suelos de Zaragoza, Huesca y Lérida, de escala 1 : 250 000 (Guerra y cols., 1970), ofrece poco detalle y no señala estos suelos. Un estudio más de detalle, a escala 1 : 50 000, se realizó en la década de 1970 en el Departamento de Suelos de la Estación Experimental de Aula Dei, y se publicó un mapa 1 : 200 000 de suelos de todo Aragón (Alberto y cols., 1984). A esta escala los suelos salinos de la Hoya no tenían representación. El proyecto dio lugar a dos tesis doctorales, pero la zona quedó fuera de la zona estudiada por Cuchí (1986) y Lebrón Hernando (1988). Información sobre este tipo de suelos apareció en el no publicado, y prácticamente inaccesible, anteproyecto de canal de la Hoya de Huesca (INCISA, 1986). Herrero (1982, 2008) es el primero que cita suelos salinos en la Paúl de Anzano, al este de Esquedas. Posteriormente, se realizaron algunos trabajos de fin de carrera por parte de estudiantes de la Escuela Politécnica Superior de Huesca: Carmen García Benedé (2002) y Jorge Lordán Ferrer (2003) en la Paúl de Anzano, así como José María Giménez Banzo (2013) en Biscarrués y Piedratajada. La información sobre estos suelos se amplió en Badía Villas (coord.) (2009), donde, además de los suelos sobre terrazas del Gállego y glacis en Ayerbe y Guadasespe, hay perfiles de suelos salino-sódicos en las cercanías de Lupiñén (las Ripas), que luego fueron puestos en contexto arqueológico por Peña-Monné y cols. (2018) y Picazo y cols. (2016).

Este artículo, en gran parte trabajo de fin de grado de Nicolás Omiste (2024), ofrece una primera visión sobre la química de los suelos salinos en la zona occidental de la comarca de la Hoya de Huesca.

MARCO DE ESTUDIO

Como se ha señalado, la zona de trabajo es la zona occidental de la comarca de la Hoya de Huesca, al oeste de la ciudad de Huesca, más una

adición en las Cinco Villas. Geológicamente, se encuentra al pie de las Sierras Exteriores prepirenaicas, en materiales del Mioceno del Terciario continental del valle del Ebro, entre dos grandes abanicos aluviales (Nichols y Hirst, 1998) con una clara gradación textural norte-sur: al este, el de Huesca, cuyo ápice estaba en Alquézar; el del oeste, denominado de *Luna*, que salía del recién elevado Pirineo en la ubicación de la actual localidad de Biel. Entre ambos se depositaron materiales finos en La Sotonera. La zona más occidental, en torno a la Galliguera, se ubica dentro del abanico de Luna, que fue cortado lateralmente por el río Gállego. La estratigrafía, estudiada de forma extensiva por Arenas (1993), es subhorizontal en materiales finos, salvo la orla de los mallos.

Geomorfológicamente, dominan los modelados erosivos y se compone de relieves estructurales escalonados, a favor de bancos y paleocanales de areniscas. Sobre el material terciario hay recubrimientos parciales de glaciares (sasos) y rellenos finos cuaternarios en las zonas deprimidas y vales. La erosión continúa hoy en día dando característicos modelados en pináculos y *piping*, denominados *aguarales*, en la zona más occidental. Hidrológicamente, todos los puntos muestreados se encuentran en la cuenca del Gállego y de sus afluentes, en especial el Sotón. Es zona de varias capturas fluviales. Climatológicamente, hay un claro gradiente pluviométrico negativo de norte a sur: en torno a los 800 milímetros anuales hacia las sierras y 400 milímetros en Tormos. La temperatura media, alrededor de los 12 °C, aumenta hacia el sur, prefigurando el ambiente semiárido del centro del valle del Ebro aragonés. En el pasado el carrascal era la formación forestal dominante, ahora muy aclarado para cultivo de cereal de invierno. En las zonas salinas abundan *Atriplex halimus*, *Salsola vermiculata* y otros halófitos. *Tamarix* sp. es frecuente en zonas húmedas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Muestreo

Los puntos de muestreo (tabla 1) se seleccionaron a partir de un conocimiento previo del territorio por la presencia de zonas con manifiestas eflorescencias blanquecinas temporales, vegetación halófila y rodales en cereal

de invierno fallido. Estas aparecen en margas del Mioceno o sedimentos del Cuaternario. Se asume que los segundos, salvo terrazas fluviales o sasos, proceden de los primeros, con removilización de sales por aguas superficiales, subsuperficiales y subterráneas. Es evidente que los contenidos cuantitativos de sales varían en función de la pluviometría y de la evapotranspiración previas. Se supone que se mantienen los tipos de sales, aunque debiera comprobarse.

Se han muestreado tres zonas del Terciario (Monzorrobal, en Ayerbe, y Lierta y Bolea) visibles desde las carreteras de acceso. Existen dos puntos de descarga de aguas subterráneas en la orilla izquierda del Gállego, en las cercanías del puente sobre este río denominado de *Santolaria*: uno en la trinchera que sirvió para el lanzamiento del puente y otro, un rezume situado a unos 100 metros, sendero abajo, donde los animales silvestres van a lamer sal. Hay dos zonas de *badlands* en rellenos cuaternarios: una cerca de Lupiñén, conocida como los *Pedregales*, y otra, la llamada de los *Aguarales* de Valpalmas. Se han estudiado también cinco zonas cultivadas: una en la Paúl de Anzano, ya abordada por otros autores, donde se ha muestreado en profundidad y en tres puntos a tres profundidades con efectos aparentes de disminución de salinidad; otra en un campo abandonado en el Salobral, dentro de una depresión cuasiendorreica, de origen poco conocido, en Piedratajada, también ya estudiada en un trabajo de fin de carrera de la Escuela Politécnica Superior de Huesca; en las cercanías de Fontellas, en la zona de los Barrancos, una zona de cultivo abandonada y con posible afección de las antiguas minas de Monzorrobal; en Modrán (Vallipuerto), una val del término municipal de Biscarrués, en una zona de fracaso del cultivo de cebada, también estudiada en un trabajo de fin de carrera de la misma escuela, y la última al oeste de Montmesa, en un campo de cultivo junto a la pista hacia Antonié, en zona frecuentada por las grullas invernantes.

Para las muestras geológicas, obtenidas manualmente, se utilizó un martillo geológico o pala cavadora hasta los 10 centímetros de profundidad. La toma de muestras se realizó en campos de cultivo a profundidades de 0-30, 30-60 y 60-90 centímetros. La tabla I presenta información sobre los puntos de muestro.

Tabla 1. Información sobre los puntos de muestreo: siglas, tipo de muestra, localización y fecha de muestreo.

Sigla	Denominación	Coordenadas UTM Huso 30, ETRS 89			Fecha de muestreo	Tipo de muestra	Localidad
		X	Y	Z			
LI1	Lierta 1	706645	4679565	646	29/1/2024	Mioceno	Lierta
LI2	Lierta 2	706624	4679566	639	29/1/2024	Mioceno	Lierta
BO1	Bolea 1	701423	4681275	602	29/1/2024	Mioceno	Bolea
BO2	Bolea 2	701450	4681316	607	29/1/2024	Mioceno	Bolea
AN1a	Paúl de Anzano 1a	704116	4675200	500	30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN1b	Paúl de Anzano 1b				30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN1c	Paúl de Anzano 1c				30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN2a	Paúl de Anzano 2a	704255	4675332	502	30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN2b	Paúl de Anzano 2b				30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN2c	Paúl de Anzano 2c				30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN3a	Paúl de Anzano 3a	704340	4675478	507	30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN3b	Paúl de Anzano 3b				30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN3c	Paúl de Anzano 3c				30/1/2024	Suelo	Esquedas
AY	Ayerbe	692931	4680627	571	30/1/2024	Mioceno	Ayerbe
ST1	Santolaria 1	685516	4682341	432	30/1/2024	Mioceno	Murillo de Gállego
ST2	Santolaria 2	685154	4681957	429	30/1/2024	Mioceno	Murillo de Gállego
PTa	Piedratajada	682413	4664045	383	31/1/2024	Suelo	Piedratajada
PTb	Piedratajada				31/1/2024	Suelo	Piedratajada
PTc	Piedratajada				31/1/2024	Suelo	Piedratajada
AV	Valpalmas	680249	4668979	477	31/1/2024	Cuaternario	Valpalmas
MODa	Modrán a	686739	4673585	431	31/1/2024	Suelo	Biscarrués
MODb	Modrán b				31/1/2024	Suelo	Biscarrués
MODc	Modrán c				31/1/2024	Suelo	Biscarrués
FONa	Fontellas a	692040	4679252	538	1/2/2024	Suelo	Ayerbe
FONb	Fontellas b				1/2/2024	Suelo	Ayerbe
FONc	Fontellas c				1/2/2024	Suelo	Ayerbe
LUP	Lupiñén	698724	4669926	446	1/2/2024	Cuaternario	Lupiñén
MONT	Montmesa	691772	4678215	422	1/2/2024	Suelo	Montmesa

a, b, c, profundidades: 0-30, 30-60 y 60-90 centímetros respectivamente.

Preparación y análisis de las muestras

Las muestras se secaron al aire, se molieron manualmente mediante rodillo de madera y se tamizaron con tamiz de 2 milímetros de luz.

Los análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio del Departamento de Química Analítica de la Escuela Politécnica Superior de Huesca. Se determinó el pH y la CE en extractos acuosos de suelo: agua desionizada, 1 : 2,5 y 1 : 5 respectivamente. Sobre el extracto de saturación (ES), realizado según Richards (1954), se determinaron pH, CE, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, CO₃⁻ y NO₃⁻. Todas las analíticas se hicieron por duplicado.

Las técnicas analíticas empleadas fueron las siguientes: pH y CE del extracto acuoso, mediante pHmetría y conductimetría respectivamente; cloruros, por el método de Möhr; carbonatos / hidrogenocarbonatos, por volumetría ácido-base; sulfatos, por espectrofotometría de absorción molecular en el visible (método turbidimétrico); nitratos, por espectroscopía de absorción molecular en el ultravioleta; Mg²⁺ y Ca²⁺, por espectroscopía de absorción atómica de llama; Na⁺ y K⁺, mediante espectroscopía de emisión atómica de llama. Sobre los resultados analíticos se calculó el SAR según el método estándar.

RESULTADOS

Los resultados de los análisis químicos de las muestras de suelos y materiales geológicos se muestran en las tablas II y III. También se incluye la clasificación de los suelos (salinidad/ sodicidad) según el SAR y la CE.

Tabla II. Resultados de los análisis químicos de las muestras: conductividad eléctrica (CE), pH y aniones. La concentración iónica (mg/L) se refiere al extracto de pasta saturada (ES).

Muestras	CE ES (dS/m)	CE 1 : 5 (dS/m)	pH ES	pH (1 : 2,5)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	CO ₃ ²⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
LI1	10,51	2,00	8,88	8,29	1116,7	353,1	0,00	14 786,7	567,5
LI2	35,70	5,27	8,38	8,82	3119,6	372,5	0,00	131 652,7	4968,6
BO1	17,11	2,07	8,36	8,64	2197,9	256,4	0,00	29001,9	1351,7
BO2	29,00	1,74	8,22	8,40	2747,4	604,7	0,00	17 786,5	178,2
AN1a	46,30	6,65	8,11	8,76	36 371,7	299,9	0,00	33 047,3	886,7
AN1b	36,00	5,06	7,41	8,92	20 401,5	590,2	0,00	27 322,4	279,7
AN1c	32,50	4,62	7,56	8,65	20 171,1	319,3	0,00	58 574,0	281,6
AN2a	35,70	3,54	7,50	8,64	15 527,1	527,3	0,00	62 391,0	7404,1
AN2b	35,10	2,37	8,25	8,77	7674,9	333,8	0,00	32 363,2	2573,1
AN2c	14,81	2,61	8,38	8,18	5104,8	256,4	0,00	24 576,5	2113,7
AN3a	19,19	0,36	7,71	7,69	1081,2	420,9	0,00	1467,5	194,8
AN3b	14,89	2,39	7,89	8,06	2357,4	411,2	0,00	5564,8	394,1
AN3c	9,90	1,24	7,86	7,89	5140,3	449,9	0,00	13 351,5	384,9
AY	4,07	0,57	8,31	8,71	584,9	391,8	0,00	4654,8	217,0
ST1	48,50	4,39	7,57	8,64	31 798,7	478,9	0,00	10 492,2	261,3
ST2	35,80	5,12	7,86	8,26	27 580,1	387,0	0,00	29 764,1	76,8
PTa	71,20	5,32	7,35	7,54	83 697,5	967,5	0,00	22 894,6	5273,1
PTb	39,20	4,50	7,73	7,58	38 888,7	507,9	0,00	13 504,2	711,4
PTc	36,30	3,53	7,71	7,74	35 379,1	416,0	0,00	14 497,2	556,5
AV	28,00	1,52	8,26	9,38	6611,4	643,4	0,00	14 575,3	5402,2
MODa	4,29	1,60	9,41	10,08	2268,8	875,6	166,5	602,9	763,1
MODb	4,50	0,59	9,12	9,80	2251,1	894,9	38,1	665,9	314,8
MODc	3,37	0,45	9,00	9,81	2251,1	764,3	28,6	900,4	252,0
FONa	47,50	4,29	7,94	8,78	10 209,6	583,1	14,3	17 475,1	47,2
FONb	18,20	3,49	8,85	8,25	8011,7	256,4	0,00	22 360,8	113,7
FONc	35,70	2,81	7,13	8,28	10 138,7	416,0	0,00	13 731,5	41,7
LUP	20,30	2,55	8,90	9,02	9961,5	319,3	0,00	29 842,2	517,7
MONT	27,10	1,80	7,82	7,92	17 636,4	604,7	0,00	6938,9	2194,8

Tabla III. Resultados de los análisis químicos de las muestras: cationes y relación de adsorción de sodio (SAR). La concentración iónica (mg/L) se refiere al extracto de pasta saturada (ES). Clasificación, en función de la CE, el ES y el SAR, según Richards (1954).

<i>Muestras</i>	<i>Mg²⁺ mg/L</i>	<i>Ca²⁺ mg/L</i>	<i>Na⁺ mg/L</i>	<i>K⁺ mg/L</i>	<i>SAR</i>	<i>Clasificación</i>
LI1	108,2	643,0	5902,3	32,0	56,7	Material geológico salino-sódico
LI2	1256,1	1153,4	42 319,4	175,5	207,5	Material geológico salino-sódico
BO1	168,9	1091,6	10 946,6	62,2	81,5	Material geológico salino-sódico
BO2	107,7	768,4	7619,8	41,6	68,3	Material geológico salino-sódico
AN1a	2171,1	966,2	25 443,1	117	104,0	Suelo salino-sódico
AN1b	1185,1	855,9	20 023,0	39,8	104,1	Suelosalino-sódico
AN1c	1670,9	1340,3	29 411,4	47,2	126,6	Suelosalino-sódico
AN2a	1609,6	1497	50 169,0	241,9	214,5	Suelosalino-sódico
AN2b	776	1202,3	26 078,6	51,4	144,2	Suelosalino-sódico
AN2c	460,9	1119,4	17 845,6	25,1	113,4	Suelosalino-sódico
AN3a	65,3	653,8	928,7	24,5	9,3	Suelosalino
AN3b	131,5	1307,2	1879,6	42,1	13,3	Suelosalino-sódico
AN3c	563,6	2116,2	9811,2	24,5	49,0	Suelosalino-sódico
AY	53,2	1735,4	2198,2	18,5	14,2	Material geológico salino-sódico
ST1	513	1522,2	50 377,4	129,6	285,2	Suelosalino-sódico
ST2	723,6	1571,3	33 675,0	80,6	176,4	Suelosalino-sódico
PTa	4155,7	10 923	55 132,3	503,8	113,9	Suelo salino-sódico
PTb	1911,3	5447,3	30 667,2	161,4	91,1	Suelo salino-sódico
PTc	1569,2	4512,7	28 957,2	127,7	94,7	Suelo salino-sódico
AV	70,2	205,3	15 288,9	86,8	235,1	Suelo salino-sódico
MODa	26,4	44	1990,8	28,8	58,6	Suelo sódico
MODb	25	9,2	2029,2	19,0	78,7	Suelo sódico
MODc	37,9	8,3	1837,4	19,5	60,1	Suelo sódico
FONa	481,4	790,3	6338,6	31,4	43,9	Suelo salino-sódico
FONb	1355,3	1250,8	14 378,4	40,2	67,1	Suelo salino-sódico
FONc	596,3	797,7	7333,6	29,2	47,9	Suelo salino-sódico
LUP	111,3	925,3	20 725,7	97,1	171,5	Material geológico salino-sódico
MONT	1364,7	1607,6	20 937,4	166,6	92,9	Suelo salino-sódico

La muestra AY se encuentra muy ligeramente por encima del límite inferior de CE, ES y SAR para ser considerado el material geológico salino o sódico.

DISCUSIÓN

Tipos de sales

El diagrama de Piper (fig. 1) de las concentraciones iónicas de los extractos de saturación indica, en el diagrama triangular, un agrupamiento de las muestras en la zona cloruro/sulfato sódico. Estos son los componentes iónicos típicos de los suelos afectados por salinidad en el valle del Ebro (Cuchí, 1986). Corresponderían a la presencia de cloruro y sulfato sódico, que a nivel mineralógico se relacionan con halita y mirabilita-thenardita. Dos

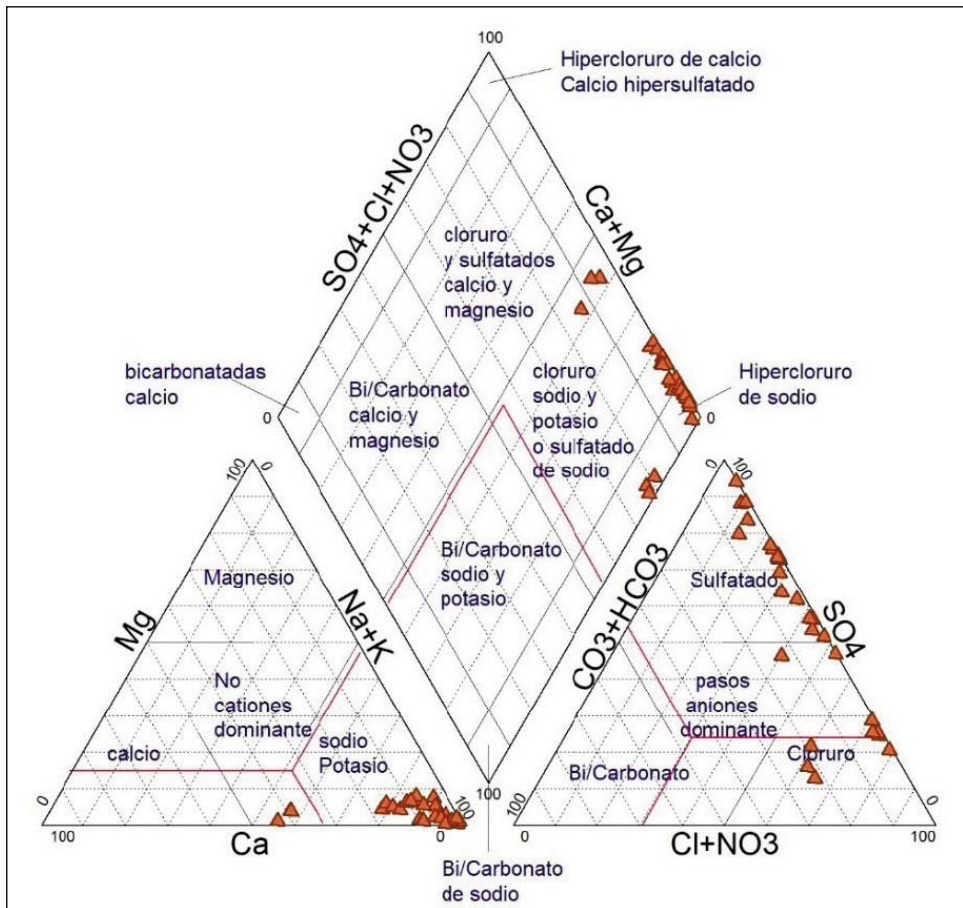


Fig. 1. Diagrama de Piper de la concentración de iones en el extracto de saturación (ES) de muestras de materiales geológicos y suelos salinos de la zona occidental de la comarca de la Hoya de Huesca.

grupos de muestras se diferencian: uno, con mayor contenido en sulfato cálcico, yeso, corresponde a las muestras de Ayerbe y la Paúl de Anzano 3, mientras que el grupo inferior, con más hidrogenocarbonato y carbonato de sodio, corresponde a las muestras de Modrán.

Algunos iones deben ser considerados de forma independiente, al poder ser de aportación antrópica en el abonado (NPK) de cultivos o tener un origen natural. La fuente natural de potasio son las ilitas, arcillas derivadas de la degradación de micas (véase, más abajo, el apartado de geología). De hecho, los niveles de potasio de origen natural en muchos suelos de la cuenca del Ebro hacen innecesario el abonado de este nutriente, aunque suele aparecer en abonados de fondo. En los datos de este artículo hay una buena relación líneal ($R: 0,781$) entre el sodio (evidentemente, de origen natural) y el potasio. La excepción, a modo de *outlier*, es la muestra (0-30 centímetros) de Piedratajada, un campo abandonado. Puede corresponder a una escorrentía del abonado de campos cercanos o puede ser natural.

El tema del nitrógeno es más complejo. Los acuíferos de la zona muestran elevados niveles de nitrato, superiores a las aguas subterráneas de origen prepirenaico (Cuchí y cols., 1997; Traba, 2015; Gracia, 2017; Zufiaurre y cols., 2017, 2020). Y también sucede lo mismo con los contenidos de este ion en los extractos de saturación de este artículo. En un apartado específico, más adelante, se profundiza en este tema.

Suelos

Por la pendiente y la erosión de muchos de los afloramientos terciarios, no hay mucha superficie de suelos directamente relacionados sobre estos materiales.

La mayor parte de las zonas con índice de salinidad elevado se encuentran en terrenos cultivados sobre sedimentos finos cuaternarios situados en lugares deprimidos. En general, los procesos de edafización son poco intensos, a lo que se une el efecto de la erosión superficial. De hecho, salvo los parámetros relacionados con la salinidad, hay poca diferencia visual en los perfiles.

Siguiendo la clasificación de Richards (1954), la mayoría de los suelos estudiados en este artículo se pueden considerar salino-sódicos, excepto los de Modrán, que son sódico-alcalinos.

La Paúl de Anzano

Situada al norte del kilómetro 12 de la A-132 y muy visible desde esta, linda con el río Benia, afluente del Sotón. Una de las cabeceras del primero es el arroyo Salado de Puibolea. Aunque hay depósitos de gravas al sur de la A-132, posiblemente un paleocauce hacia el barranco de Valdabra, los finos de la paúl parecen proceder de la pequeña sierra situada al este y que da paso a Castejón de Becha. Es una zona abandonada de antiguo, como se ve en la fotografía aérea de 1956 (fig. 5) y con un color blanco muy característico en algunas épocas del año. Herrero (1982, 2008), García Benedé (2002) y Lordán (2003) analizaron los suelos de esta zona. Recientemente, se realizó una nivelación y la apertura de un dren abierto por medio de la paúl histórica. Además de eliminar los restos de un horizonte superior poco salino, puesto en evidencia en Herrero (2008), han desencadenado un proceso de erosión preocupante que puede agravarse con rapidez (figs. 2a y 2b). En enero de 2025, la mayor parte de la paúl ha tenido una siembra directa.

Para el presente artículo se muestreó un transecto sur-norte con tres profundidades. Se intentaba un gradiente de salinidad, suponiendo que el más afectado por sales era el punto A y el menos el C. El muestreo se realizó a finales de enero de 2024, en tiempo seco tras unos meses de septiembre y octubre lluviosos. No se observaban eflorescencias. Herrero (2008) ya menciona la variabilidad temporal de CE y SAR en esta zona.

Las figuras 3 y 4 muestran los valores de CE ES y SAR. Es evidente la mayor concentración de sales en ANZ1 y ANZ2, frente a ANZ3, situada en



Figs. 2a y 2b. Erosión reciente en la Paúl de Anzano. (Fotografías del 3 de enero de 2025)

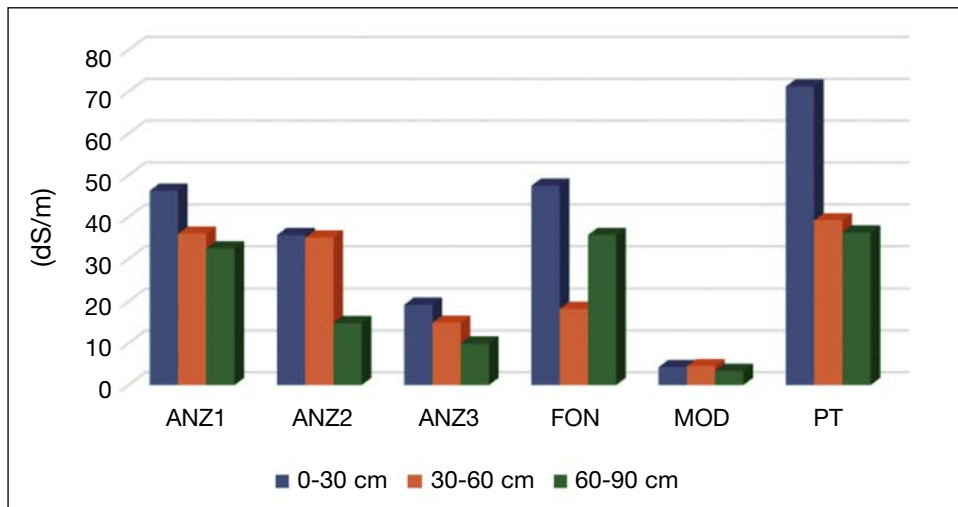


Fig. 3. Evolución en profundidad de la conductividad eléctrica del extracto saturado (CE ES) en suelos en Anzano, Fontellas, Modrán y Piedratayada.

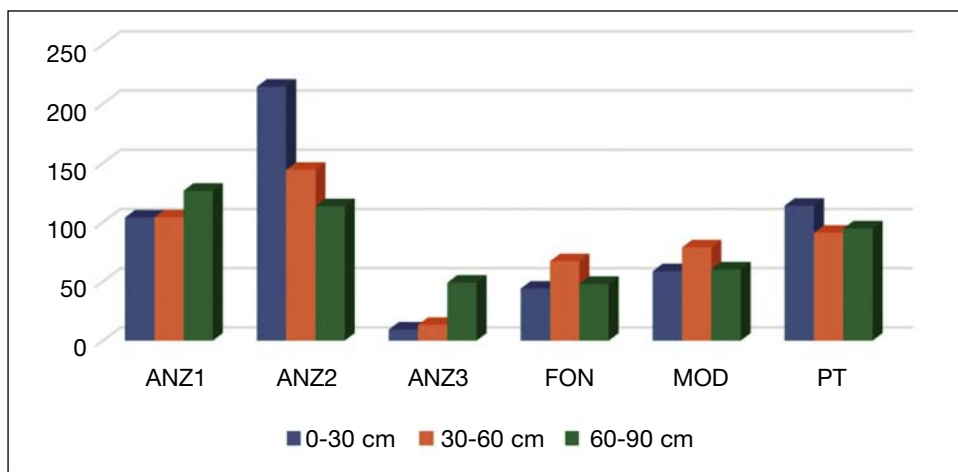


Fig. 4. Evolución en profundidad de la relación de adsorción de sodio (SAR) en suelos de Anzano, Fontellas, Modrán y Piedratayada.

las cercanías de una señal de gasoducto en campo donde ya había germinado el cereal de invierno. Los tres perfiles de Anzano presentan un ascenso de sales que se podría atribuir a una fase de desecación de la superficie y ascenso capilar. Lo que no es tan regular es su naturaleza, que se refleja



Fig. 5. Evolución del aspecto de la Paúl de Anzano entre las fotografías aéreas del vuelo americano de 1956 y del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea en 2017. (El punto rojo en la imagen derecha señala la paúl)

en la figura 1 para todos los iones y en la 4 para el SAR. Este es un tema que necesita más estudio.

Una cuestión interesante es la posible evolución de la superficie afectada. La figura 5 presenta una comparación entre las imágenes aéreas de 1956 (vuelo americano) y 2017 (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea). Se observa el efecto de la concentración parcelaria en Esquedas y la gestión en mano común por parte de la Cooperativa Agropecuaria Grupo Esquedas, S. L., con eliminación de ribazos y la apertura de nuevos drenes abiertos en la zona occidental.

Aunque las imágenes no deben de ser del mismo momento del año, parecen indicar un aumento de la mancha afectada por salinidad. En secano este efecto es suficientemente conocido en Australia. Véase, por ejemplo, Conacher (1990), donde se señala el efecto del ascenso de aguas subterráneas como consecuencia de la deforestación reciente, que aquí se presume antigua. Es evidente que en la zona hay un acuífero no estudiado, avenado en un amplio número de drenes superficiales. Tiene salinidad variable, ya que es dulce hacia el vivero de la Diputación General de Aragón, aunque allí puede estar influenciado por el sistema de riego del Riel, estudiado por Cuchí (2008). Herrero (2008) sugiere la existencia de una capa freática, sin

datos específicos de su hidroquímica, su profundidad y su evolución temporal. Sería recomendable colocar piezómetros.

Los Barrancos (Fontellas)

Situada en la confluencia de los barrancos de Vallalba y Monzorrobal, al sur de la vía del ferrocarril, en las cercanías de Fontellas, la partida de los Barrancos es conocida por la mala calidad de los suelos y las complicaciones para el paso de vehículos y maquinaria agrícola en época de lluvias por la cabañera real hacia Marcuello.

Es zona de texturas finas de suelo, calificable de atormentada, con una fuerte erosión, nivelaciones, abandono de campos y una más que probable acumulación de sedimentos, en parte derivados de las minas de cobre de Monzorrobal (Gillot y cols., 2012).

La salinidad es elevada, en especial la superficial (CE ES: 47,5 dS/m; SAR: 43,9). La figura 3 muestra un comportamiento relativamente anómalo, con la muestra intermedia menos salina que la superficial y profunda. Por el contrario, en la figura 4 se ve casi el mayor valor de SAR para este nivel intermedio. Pudiera ser resultado de una acumulación artificial de materiales.

Modrán (Biscarrués)

La val de Modrán (Vallipuerto), denominada *barranco de Billabietre* en el mapa topográfico del IGN, es un valle afluyente del Gállego, en el término municipal de Biscarrués, con dirección noreste-suroeste. Está rodeado al noreste por una plataforma estructural y al sur por una alineación de colinas que lo separa de Valdespartera. En las laderas afloran bancos de areniscas y el fondo de la val tiene un relleno, de espesor no conocido, de limos, arcillas y, en menor medida, arenas. Las laderas no se han cultivado y se están reforestando de forma espontánea. El fondo, cultivado, presenta en la parte central, junto al barranco, una serie de zonas de suelos con eflorescencias blanquecinas y fallo general en el cultivo propensas a encharcamiento prolongado y atasco de maquinaria. Giménez Banzo (2013) ya realizó un perfil en este lugar y se encontró agua salina a menos de 1,5 metros

de profundidad, por encima del fondo del inmediato barranco, donde las ovejas se niegan a beber.

Los resultados del presente artículo (véanse las tablas I y II, así como las figuras 5 y 6) señalan un bajo nivel de sales. De hecho, según Richards (1954), es suelo no salino pero sí sódico, por un SAR alto. Y los pH en agua (1 : 2,5), como en el ES, son muy altos, los más elevados de este artículo. De hecho, resultan similares a los de unos suelos en regadío muy problemáticos en Callén, estudiados por Cuchí (1986), en los que la dispersión se atribuye a la interacción del agua de riego del canal del Cinca, baja en sales (CE: 0,3 dS/m), y al alto contenido en sodio en el complejo de cambio, que lleva a una dispersión del suelo. En el perfil de Modrán este efecto sería producido por las aguas de lluvia y arroyada. Cabe aquí señalar la habitual construcción de agüeras, cuya finalidad es evitar las erosiones por las arroyadas pero que, de manera indirecta, resultan similares a los drenes interceptores de escorrentía subsuperficial que se presentan en Conacher (1990). Destaquemos que un mal diseño o mantenimiento de las agüeras puede incrementar la infiltración de agua. Los parámetros señalados son coherentes con los problemas en los cultivos.

Este suelo es calificable como sódico-alcalino, según Richards (1954). Sería un tipo Solonetz, aunque en el perfil abierto en esta zona hacia 2013 no se observó la presencia de un horizonte B columnar ni se analizó la textura en busca de un enriquecimiento de arcilla.

Subyacen dos preguntas sobre estos suelos: la primera, sobre el origen del sodio, en una relativa ausencia de cloruro y sulfato; la segunda, sobre la génesis del suelo. Dada la baja concentración de cloruro y sulfato, no se puede considerar la elevada presencia de sodio como la herencia ya señalada de evaporitas cercanas. A juzgar por la existencia de areniscas en la geología inmediata y conocida por trabajos de arqueometría, sobre la existencia de plagiocasas en areniscas del entorno de la ciudad de Huesca, es posible que la hidrólisis de albita (Drever, 1968) fuera la responsable de la formación del ion Na^+ , cuyo oxhidrilo acompañante se carbonata con el CO_2 de la atmósfera del suelo. Evidentemente, esta es una mera sospecha que necesita un estudio específico detallado.

La génesis del suelo, en el fondo de las vaguadas, sugiere que hay un transporte mediante aguas subterráneas, con recarga en los altos y descarga

en las vaguadas, mecanismo descrito en abundantes textos de hidrogeología como Freeze y Cherry (1979). Una vez más, el tema desborda el presente artículo y merecería un estudio detallado.

Piedratajada

Como ya se ha señalado, la zona entre Piedratajada y Marracos es una amplia depresión de origen desconocido con un elevado grado de endorreísmo, aunque ahora desagua por el barranco del Tejar al Gállego, en las cercanías de Gurrea de Gállego. Hacia 1960 se consideró la posibilidad de construir allí un gran embalse, conectado por vasos comunicantes con el de La Sotonera (Cuchí, 2018). En el año 2000 fue objeto de un proyecto de riego por aspersión mediante elevación desde el Gállego cuyo éxito al parecer no ha sido evaluado. Destaquemos que es la misma agua utilizada por el sistema de Riegos del Alto Aragón en la zona dominada antes del abrazo de Tardienta.

En el trabajo de Giménez Banzo (2017) se abrió una calicata que encontró agua fuertemente salina hacia los 2 metros de profundidad. En las muestras del presente artículo es en esta zona donde aparece el valor más alto de CE ES, con un elevado SAR (CE ES: 71,2 dS/m y SAR: 113,9). En las figuras 3 y 4 se puede ver la evolución de ambos parámetros, que desciende en profundidad. Sería un típico caso de suelo tipo Solonchak. Uno de los temas que hay que considerar es la presencia o la ausencia de yeso en esta zona, dado que se trata de la más cercana al centro gipsífero del valle del Ebro. La realización de un análisis semicuantitativo de presencia de yeso, por desecación sucesiva a 50 y 160 °C, ha arrojado unos valores del orden del 5 % en los tres niveles de Piedratajada. El resultado entra dentro de los límites de error de esta técnica y se puede considerar que, si hay yeso, el contenido es muy bajo.

Montmesa

Se trata de la zona situada en el camino de esta localidad a Ardisa, en las cercanías de un pivote de riego. Es terreno de siembra directa y el punto de muestreo en el inicio del campo mostraba una alta compactación, por lo que solo se pudo muestrear el primer tramo, 0-30 centímetros (CE ES: 27,1 dS/m

y SAR: 92). El grado de afección es menos grave que en otras zonas, pero la fotografía aérea reciente muestra lugares cercanos con posible afección. Sería oportuno realizar calicatas y análisis.

La geología: el origen de las sales

Alejada la zona del mar y sin regadío con aguas salinas, se hace evidente que hay que buscar el origen último de las sales en la geología. En las muestras de Lierta (fig. 6) y Bolea dominan los sulfatos frente a los cloruros. Birnbaum y Coleman (1979) señalan que el azufre del yeso de la cuenca del Ebro proviene del Trías (Keuper) y es asumible pensar que el resto de la salinidad puede tener idéntico origen. Lo mismo indican los datos de salinidad y sodicidad que presenta Lebrón Hernando (1988) para varios perfiles geológicos. En los rezumes del arroyo Salado, una de las cabeceras



Fig. 6. Terrero a la entrada de la localidad de Lierta, donde se observa la diferente presencia de eflorescencias entre estratos. (Fotografía del 29 de enero de 2024)

del Benia, cerca de Puibolea, Sánchez Navarro y cols. (1989) señalan elevados valores de cloruro y sodio, seguidos de sulfato, magnesio y calcio, a los que atribuyen también relación con materiales del Keuper del cabalgamiento frontal pirenaico.

En Bolea, con la presencia de la localidad sobre el terrero, pudiera sospecharse algo de influencia antrópica, pero en Lierta, sobre la zona de eflorescencias en lo alto del cerro, solo hay antiguas fajas de cultivo con almendros, una cantera de grava y un colmenar abandonado. El tercer afloramiento geológico muestreado se encuentra en la base norte del cerro testigo de Monzorrobal, junto al antiguo camino hacia Ayerbe. Es la muestra con menos contenido salino del conjunto estudiado. La dominancia de sulfato, calcio y sodio es corroborada por la presencia de yeso en filoncillos. Con base en estas observaciones se puede concluir una gran heterogeneidad de la distribución de sales, tanto a nivel vertical entre estratos de un mismo corte como a nivel espacial. A partir de observaciones de campo, algunos estratos presentan más eflorescencias que otros. Sería interesante hacer perfiles de salinidad asociados a la estratigrafía en cortes de interés en la línea de los realizados por Lebrón Hernando (1988).

La alcalinidad

Una de las cuestiones que aparecen en este y en otros trabajos es la razón de la elevada alcalinidad de algunas muestras, tema abordado inicialmente por Lebrón Hernando (1988).

Es fácilmente observable la relación entre areniscas y eflorescencias blancas: en la base de los edificios, es clara la ascensión por efecto capilar; en el campo, en los laterales de algunos bancos de piedra, en rezumes húmedos de agua subterránea.

En general, la arenisca del somontano de Huesca se puede considerar una litoarenita calcárea, de grano sostenido, generalmente arena fina-media (< 0,5 milímetros, media cerca de 0,2 milímetros; 55-60 %, fragmentos de roca; 15-30 %, cuarzo; 5-8 %, feldespato y plagioclasas; 5-10 %, mica (biotita, moscovita); 8-12 %, como matriz de filosilicatos; 5-15 %, cemento carbonatado, y 15-20 %, porosidad). La figura 7 presenta un ejemplo de lámina delgada de una muestra de Huesca al microscopio petrográfico

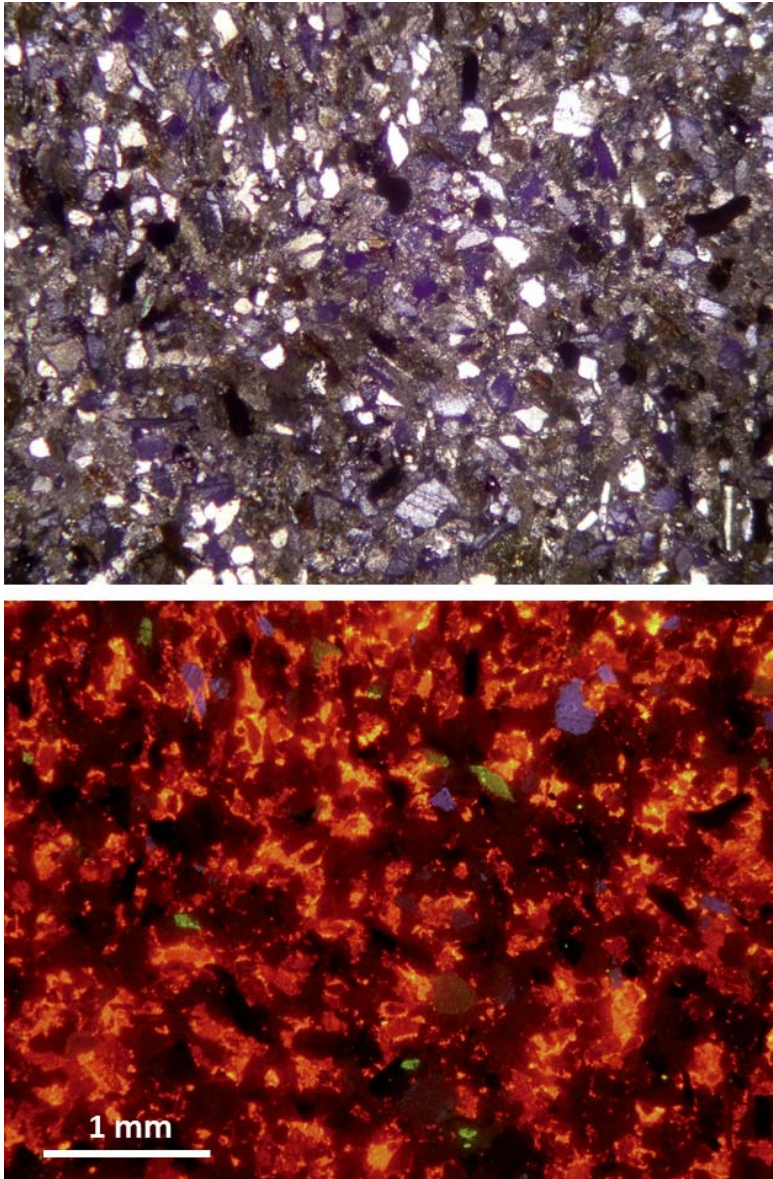
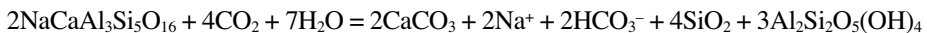


Fig. 7. Fotomicrografías petrográficas de la misma lámina de arenisca de Huesca, en nícoles cruzados (arriba) y catodoluminiscencia (abajo). Cuarzo (incoloro y no luminiscente), feldespato potásico (incoloro y luminiscente en azul), plagioclasa (incoloro y luminiscente en verde) y biotitas ferruginizadas (casi opacas y no luminiscentes). Los componentes carbonatados muestran diversos tonos, entre amarillo-naranja (calcita) y rojizo (dolomita). (Lapunte y Cuchí, 2017)

en nícoles cruzados y catodoluminiscencia. La arenisca de la cantera OLNASA en Uncastillo es similar, como muestran los datos en Lapuente y cols. (2024).

Las areniscas pertenecen *sensu lato* a la formación Sariñena del Mioceno continental del valle del Ebro. Son de procedencia pirenaica, incluso del Pirineo axial, como muestra la presencia de micas e incluso fragmentos de rocas metamórficas. Normalmente, aparecen en capas subhorizontales estratiformes que presentan abundantes paleocanales. Una de sus características es la fuerte heterogeneidad incluso a escala reducida, lo que tiene, entre otras consecuencias, la variabilidad en la calidad de los sillares obtenibles de este material.

Aunque limitada, la presencia de plagioclasas es interesante. Esta familia de minerales presenta calcio y sodio en su estructura. Su hidrólisis en presencia de anhídrido carbónico, componente normal de la atmósfera del subsuelo, es conocida como responsable de la química de aguas alcalinas. Una de las reacciones propuestas (Garrels y Mackenzie, 1967) es la siguiente:



Como subproducto de la reacción, se producen arcillas como la caolinita. Aunque las arcillas dominantes en estos somontanos son illita y clorita (Benito y cols., 1993), se detectan indicios de caolinita en Bardenas (Bastida y cols., 2010; Galán y cols., 2016) y en Monegros (Porta y cols., 1992). Una vez más, el tema queda abierto para otro estudio.

La erosión

A partir de la apertura del Ebro al Mediterráneo, en fecha controvertida, se produjo un fuerte proceso erosivo en diversas fases escalonadas. En los ríos principales este proceso dio lugar a sus terrazas, y en los somontanos, a los glacis. En los materiales más blandos se formaron vales y diversas depresiones, controladas por factores como la litología. Parcialmente rellenadas y después capturadas por la red fluvial, presentan rellenos, algunos muy modernos (Rodríguez Vidal, 1986). Algunos de estos depósitos, en especial los que presentan materiales sodificados, son muy erosionables, lo que da un relieve característico de pináculos y *piping* (Benito, 1985; Benito

y cols., 1993). Desde luego hay una clara relación entre sodicidad y desarrollo de *piping* / *aguarales*.

En el presente artículo se han muestreado dos zonas de *badlands* en estos materiales, en Lupiñén y Valpalmas.

En los Pedregales de Lupiñén, conocidos por la presencia de un yacimiento arqueológico (Picazo y cols., 2016; Peña y cols., 2018) hoy usado como vertedero de las localidades cercanas, los sedimentos provienen del alto de La Atalaya, en la sierra genéricamente conocida como las *canteras de Almodévar*. Los valores obtenidos en el presente artículo (CE ES: 20,30; SAR: 171,5) en una muestra puntual en la zona media del corte son similares a los de Badía Villas (coord.) (2009) y Peña y cols. (2018). Los valores que estos autores presentan para el nivel superior (CE ES: 0,42; SAR: 2,7) resultan adecuados para el cultivo del cereal de invierno, pero su desaparición, por erosión natural o remoción mecánica, conlleva una clara degradación del terreno. La génesis de este nivel con clastos no está relacionada con los niveles subyacentes y son de arroyada del escarpe.

Los Aguarales de Valpalmas se abren en los rellenos holocenos del barranco Barreiro. Convertido en la actualidad en un punto de cierto atractivo turístico, incluido en el *Catálogo de lugares de interés geológico* (Decreto 274/2015, del Gobierno de Aragón), es un clásico ejemplo de degradación de suelos, aunque la cercana superficie no erosionada está cultivada y crece algo la cebada, que desde los trabajos de Maas y Hoffman (1977) y Maas (1984) es considerada más tolerante que el trigo. Por ello, los datos de la muestra AV (CE ES: 28,0; SAR: 235,1) son una clara señal de peligro y, una vez más, la morfología en pináculos con *piping* responde a un material salino-sódico. Por otro lado, la superficie de esta zona de cárcavas está aumentando (Ferrer Sánchez, 2016; Carreras Gómez, 2023). Informaciones orales señalan que en Piedratajada varias zonas similares fueron terraplenadas tras la concentración parcelaria.

Es evidente, por tanto, el papel de los materiales y de los suelos geológicos salino-sódicos en la formación de *badlands* y chimeneas de hadas. Es posible su papel en movimientos masivos de terreno, especialmente en el cañón del Gállego, así como en los deslizamientos de terreno, en época de fuertes lluvias, hacia el kilómetro 5 de la A-1202 (Alastuey Morlans y Cuchí Oterino, 2016).

Aguas subterráneas

Es bien conocido el modelo de flujo de aguas subterráneas desde su recarga en zonas elevadas a la descarga en las deprimidas (véase, por ejemplo, el clásico texto de Freeze y Cherry, 1979). Con esta agua se transportan las sales que dan lugar a los suelos salino-sódicos. Estos se forman en las zonas de descarga por evaporación del agua de las soluciones salinas, que sube desde la capa freática por ascenso capilar, algo directamente relacionado con la textura del medio. En medios semiáridos y suelos de textura fina el ascenso puede superar algunos metros.

En la zona de estudio se conocen manantiales procedentes de las Sierras Exteriores y pequeños acuíferos en la base de las capas de grava de los glaciares, sobre los materiales arcillosos terciarios, que dan lugar a fuentes tradicionales. Su química se ha estudiado en Zufiaurre y cols. (2015). En general, son aguas dulces, con alto contenido en carbonato cálcico y también nitratos. En algunas zonas hay descargas importantes, como los ibones de Cinto, en la zona terminal del Saso de Ayerbe. En otros se han realizado trabajos de drenaje, especialmente visibles en la zona de Guadasespe. Además de estos acuíferos, hay otras masas de agua subterránea salada, algunas en rellenos de vaguadas que, por su naturaleza arcillosa, son de baja conductividad hidráulica. Herrero (2008) señala la presencia de agua subterránea en Anzano, aunque no parece haber análisis de la misma. En el ya citado trabajo inédito de Giménez Banzo (2013) se alcanzaron freáticos con salinidad superior al agua de mar en Contienta (Losanglis), Modrán y Piedratajada.

En el presente artículo no se han alcanzado los freáticos. Pero en el entorno del puente de Santolaria se muestrearon eflorescencias relacionadas con descargas desde el Terciario. El extracto de saturación de las eflorescencias de los rezumes del entorno del puente, frecuentados por animales silvestres, muestran muy elevados valores de CE y sobre todo de SAR (STA1, CE: 48,5 dS/m, SAR: 285,2; STA2, CE: 35,8 dS/m, SAR: 176,4).

Un tema interesante es la probable existencia de flujos de agua subterránea, incluso profundos, a través de las areniscas terciarias, tanto en sentido horizontal como vertical, que estaría asociada a los procesos de hidrólisis ya citados y otros (intercambio catiónico, etcétera). Por otro lado, es

conocida la existencia de diaclasas en este material, los *pelos* de los canteros, que permiten el flujo descendente de agua. Son abundantes los que presentan rellenos carbonatados.

Los nitratos

Uno de los temas de preocupación ambiental es el incremento de los nitratos en suelos agrícolas y aguas subterráneas producido durante la segunda mitad del siglo xx por el abonado artificial. La Unión Europea aprobó la Directiva 91/676/CEE, más conocida como *Directiva Nitratos*, con el objetivo de controlar el problema, aunque se discute su eficacia. Se han señalado diversas técnicas para solucionar el problema (Gutiérrez y cols., 2022; Musacchio y cols., 2020; Abascal y cols., 2022, y otros muchos autores).

En la zona de este artículo, es conocida de antiguo y señalada por los servicios de Agricultura la existencia de una sobrefertilización nitrogenada, reflejada en estudios internos y hojas divulgativas. Más difusión ha tenido la presencia de niveles elevados de este ion en aguas subterráneas (Cuchí y cols., 1997; Traba, 2015; Gracia, 2017; Zufiaurre y cols., 2017, 2020). La Diputación General de Aragón, por Orden DRS/882/2019, de 8 de julio, incluyó los acuíferos conocidos en la Hoya de Huesca como vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes agrarias.

La pregunta clave es si todo el origen proviene del abundante abonado. En la Paúl de Anzano, zona en la que no se había cultivado desde hacía años (véase la imagen izquierda de la figura 5), Herrero (1982) señala “una gran nitrificación por pastoreo y paso de ganado ovino”, aunque no presenta resultados analíticos para el ion nitrato. Cuchí y cols. (1998) se extrañaban del alto nivel en la fuente vieja de Lierta, resultados que se han mantenido desde entonces. En este artículo los valores más elevados aparecen en algunos casos en terreros como LI2 y AV. En el primer caso, el resultado es muy diferente al de la muestra LI1, tomada a corta distancia. En la zona superior del perfil de Lierta de la figura 7 solo aparecen los restos de una gravera, un almendral y un colmenar abandonado, y se hace difícil pensar en la contaminación de un flujo cercano de

agua subterránea. Por ahora no hay explicación sobre la diferencia entre las dos muestras, que debiera ser contrastada. En cuanto a la muestra aislada de los Aguarales de Valpalmas, zona abandonada hace años, si alguna vez estuvo en cultivo el resultado no parece compatible con un abonado agrícola. Por otro lado, los altos niveles de nitrato también aparecen en uno de los muestreos en Anzano (AN2), lo que corrobora la observación de Herrero (1982). También son elevados en el primer nivel de Piedratajada. Se puede pensar en un efecto ganadero, aunque la ganadería extensiva sea ya residual. ¿O hay otro origen, quizás natural? El tema queda abierto, aunque por ahora el mayor impacto parece ser el del abonado nitrogenado (fondo y cobertera) en las zonas cultivadas.

Afecciones de sales y de sodio

Es suficientemente conocido el efecto de la salinidad y del sodio en el complejo cambio en el rendimiento de los cultivos. Existe abundante bibliografía sobre el tema, pero desborda este artículo, que se ha centrado en zonas donde los cultivos no prosperan. A modo simplemente indicativo, señalemos que la cebada, uno de los cultivos más resistentes a la salinidad y a la sequía, comienza a bajar en su rendimiento a partir de un CE ES de 8,0 dS/m, y este es nulo a partir de 28 dS/m (Maas y Hoffman, 1977; Maas, 1984).

Con la excepción de Modrán, todos los suelos muestreados, incluso Paúl de Anzano 3 y Montmesa, tienen serios problemas de salinidad en la superficie, que se traducirán en la pérdida de la cosecha. Recordemos que la cebada tiene poca profundidad radicular. El problema de Modrán es la presencia de carbonato sódico, que se traduce en una fuerte alcalinidad que impide el desarrollo de cultivos.

Soluciones a la salinidad

Como último apartado, cabe analizar sucintamente las posibles soluciones a los problemas de salinidad. Al igual que en el caso anterior, hay abundante bibliografía sobre el tema. Por ejemplo, Richards (1954), Kovda y Samoilova (1969), Kovda y cols. (1973), Qadir y cols. (2000), Smith (2005) y Vargas y cols. (2018).

De forma resumida, en la recuperación de los suelos afectados hace falta agua, drenaje y yeso. Esta zona, salvo en Piedratajada y Montmesa, es de secano. La primera fue puesta en regadío por elevación del Gállego hacia el año 2000. En Montmesa existe un cercano pivote de riego. El segundo elemento fundamental es el drenaje. En cuanto a la parcela, en la mayor parte de los suelos estudiados este es bajo, en parte debido a la textura arcillo-limosa de los mismos, complicada por el elevado SAR, que, con agua de lluvia o regadío de baja salinidad, provoca la defloculación del suelo y su práctica impermeabilización. La débil pendiente de algunos de los campos y el aterramiento de los cauces, junto con el crecimiento de tamarices, complican aún más el drenaje. El tercer problema es la falta de yeso natural, del que únicamente se detectan indicios visuales en Monzorrobal. Solo se ha analizado su presencia en Piedratajada, con resultados prácticamente nulos. En estas condiciones, la puesta en regadío de esta zona ha provocado problemas.

CONCLUSIONES

Es evidente que en el somontano de las sierras del sector occidental de la Hoya de Huesca hay claros indicios de salinidad y sodicidad, por lo que este artículo tiene que ser considerado como un estudio parcial. Hay señales sobre su aumento, parcialmente asociado a dificultades de erosión. El problema es, por ahora, limitado, pero debería ser objeto de vigilancia. Habrían de realizarse estudios más detallados, instalar piezómetros, analizar cuidadosamente las puestas en regadío... Lamentablemente, las zonas afectadas tienen difícil solución y el abandono es la alternativa más económica.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la ayuda en los laboratorios y en el invernadero de la Escuela Politécnica Superior de Huesca de Begoña Portaña, Inmaculada Palacín, Belén Aguado, Joaquín Lanuza, Jaime Arranz, José Antonio Manso y Andoni González. Santiago Fábregas y Enrique Salamero nos ayudaron con las imágenes aéreas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abascal, E., L. Gómez-Coma, I. Ortiz y A. Ortiz (2022). Global diagnosis of nitrate pollution in groundwater and review of removal technologies. *Science of the Total Environment*, 810: 152233.
- Alastuey Morlans, M. P., y J. A. Cuchí Oterino (2016). El Molinaz en la Galliguera: una aproximación a su historia. *Joaquín Costa*, 29: 7-40.
- Alberto Giménez, F., M. Gutiérrez Elorza, M. J. Ibáñez Marcellán, J. Machín Gayarre, J. L. Peña-Monné, A. Pocoví Juan y J. Rodríguez Vidal (1984). *El Cuaternario en la depresión del Ebro en la región aragonesa: cartografía y síntesis de los conocimientos existentes*. Universidad de Zaragoza / Estación Experimental de Aula Dei. Zaragoza. 217 pp. + 2 mapas.
- Arenas, C. (1993). *Sedimentología y paleogeografía del Terciario del margen pirenaico y sector central de la cuenca del Ebro (zona aragonesa occidental)*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza.
- Badía Villas, D. (coord.) (2009). *Itinerarios edáficos por el Alto Aragón*. IEA. Huesca. 189 pp.
- Bastida, J., M. C. Osácar, A. Muñoz y C. Sancho (2010). Características mineralógicas de los sedimentos aluviales holocenos del Barranco Grande (Bardenas Reales de Navarra). *Geogaceta*, 48: 167-170.
- Benito, G. (1985). *Geomorfología del somontano de Ayerbe*. Tesina de licenciatura. Universidad de Zaragoza. 189 pp.
- Benito, G., M. Gutiérrez y C. Sancho (1993). The influence of physico-chemical properties on erosion processes in badland areas, Ebro basin, NE Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 37: 199-214.
- Birnbaum, S. J., y M. Coleman (1979). Source of sulphur in the Ebro Basin (northern Spain) Tertiary nonmarine evaporite deposits as evidenced by sulphur isotopes. *Chemical Geology*, 25 (1-2): 163-168.
- Carreras Gómez, S. (2023). *Evaluación de la degradación de terrenos agrícolas por procesos de erosión por piping a partir de la reconstrucción del paisaje histórico mediante técnicas de fotogrametría automatizada*. Trabajo de fin de máster. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Zaragoza. 44 pp. Accesible a través de <zaguan.unizar.es/>.
- Conacher, A. J. (1990). Salt of the Earth: secondary soil salinization in the Australian wheat belt. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 32 (6): 4-42.
- Cuchí, J. A. (1986). *Aportaciones al conocimiento de los suelos salinos en Aragón*. Ministerio de Agricultura, Pesca y A. INIA. Tesis doctorales. Madrid. 396 pp.
- Cuchí, J. A. (2008). Los sistemas de riego del río Riel (provincia de Huesca). *Joaquín Costa*, 25: 23-42.
- Cuchí, J. A. (2018). El canal Navarra-Aragón y proyectos asociados: el Plan Susín. *Lucas Mallada*, 20: 41-76.

- Cuchí, J. A., R. C. Díaz, O. Larrey y J. C. Lasasa (1997). Niveles de ion nitrato en aguas subterráneas de la Hoya de Huesca. *Kalium*, 4: 117-128.
- Drever, J. I. (1988). *The Geochemistry of Natural Waters*. Prentice Hall. Upper Saddle River (NJ). 437 pp.
- Ferrer Sánchez, V. (2016). *Análisis de la dinámica geomorfológica en una zona acarcazada mediante la aplicación de nuevas tecnologías con un enfoque multiescala: los Badlands de los Aguarales de Valpalmas*. Trabajo fin de máster. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Zaragoza. 52 pp. Accesible a través de <zaguan.unizar.es/>.
- Freeze, R.A., y J. A. Cherry (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs (NJ). <<https://fc79.gw-project.org/espanol/>>
- Galán, C., J. M. Rivas, M. Nieto y J. Fortsner (2016). *Notas sobre procesos de tubificación, cuevas y geoformas en la Bardena Blanca*. Publicaciones del Departamento de Espeleología. SC Aranzadi. Web aranzadi-sciences. org. Archivo PDF.
- García Benedé, C. (2002). *Estudio de los suelos salinos de la Paúl de Anzano, en Esquedas (Huesca)*. 3 vols. Trabajo fin de curso. ITA. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza.
- Garrels, R. M., y F. T. Mackenzie (1967). Origin of the chemical compositions of some springs and lakes. En W. Stumm (ed.), *Equilibrium Concepts in Natural Water Systems*: 222-242. Advances in Chemistry Series 67. American Chemical Society. Washington DC.
- Gillot, T., D. B. Badía, J. A. Manso y J. A. Cuchí (2012). Nota sobre mineralizaciones en Monzorrobal (Ayerbe, Huesca). *Lucas Mallada*, 14: 193-200.
- Giménez Banzo, J. M. (2013). *Estudio edafológico y de gestión de suelos salinos en el entorno de la Galliguera*. Proyecto fin de carrera de ingeniero agrónomo. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza.
- Gracia, Ó. (2017). *Evolución del contenido en nitratos en aguas subterráneas de la Hoya de Huesca (marzo 2016 – febrero 2017)*. Proyecto fin de carrera de ingeniero técnico industrial. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza.
- Guerra, A., F. Monturiol, T. Badorrey, J. Gallardo, J. J. Carlevaris, J. L. de la Horra y J. L. Labrandero (1970). *Mapas de suelos de las provincias de Zaragoza, Huesca y Logroño. Mapas 1 : 250 000 y Memoria explicativa*. Instituto Nacional de Edafología José María Alvareda. Madrid. 3 mapas.
- Gutiérrez, M., M. T. Alarcón-Herrera y E. Y. Calleros-Rincón (2022). Nitrate in agricultural soils. En *Nitrate Handbook*: 25-43. CRC Press. Boca Ratón. Londres / Nueva York.
- Herrero, J. (1982). *Salinidad del suelo en salobres de Monegros y somontano oscense como condicionante de la vegetación*. IFC. Zaragoza. 50 pp.
- Herrero, J. (2008). *Salinidad edáfica en varios salobres de Aragón*. Real Sociedad Española de Historia Natural (Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural, IV). Madrid. 2.^a época. 164 pp.
- INCISA (1986). *Memoria del Anteproyecto del canal de la Hoya de Huesca y su viabilidad técnico-económica*. 7 tomos.

- Kovda, V. A., y E. M. Samoilova (1969). Some problems of soda salinity. *Agrokémia és talajtan*, 18 (supl.): 21-36.
- Kovda, V. A., G. V. D. Berg y R. M. Hagan (1973). *Irrigation, Drainage and Salinity. An International Source Book*. Hutchinson FAO / UNESCO. Londres. 510 pp.
- Lal, R., G. F. Hall y P. Miller (1989). Soil degradation: I. Basic processes. *Land Degradation & Rehabilitation*, 1: 51-69.
- Lapuente, M. P., y J. A. Cuchí (2017). Estudio arqueométrico de un capitel romano de Osca. *Bolskan*, 26: 133-138.
- Lapuente, M. P., J. A. Cuchí y L. F. Auqué (2024). Compatibility assessment in the replacement of damaged sandstone used in the Cathedral of Huesca (Spain). *Heritage*, 7: 896-912 <<https://doi.org/10.3390/h707896>>.
- Lebrón Hernando, I. (1988). *Suelos salino-sódico-alcálinos de la depresión media del Ebro: condiciones de formación, características y propiedades*. Tesis doctoral. Estación Experimental de Aula Dei / Universidad de Zaragoza. 483 pp.
- Lordán Ferrer, J. (2003). *Química de los suelos de la Paúl de Anzano en Esquedas (Huesca)*. 4 volúmenes. Trabajo fin de carrera de ingeniero técnico industrial. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza.
- Maas, E. V. (1984). Salt tolerance of plants. En B. R. Christie (ed.), *The Handbook of Plant Science in Agriculture*. CRC Press. Boca Ratón (Florida).
- Maas, E. V., y G. J. Hoffman (1977). Crop salt tolerance –Current assessment. *J. Irrigation and Drainage Division, ASCE* 103 (IRZ): 115-134. Proceeding Paper 12993.
- Musacchio, A., V. Re, J. Mas-Pla y E. Sacchi (2020). EU Nitrates Directive, from theory to practice: Environmental effectiveness and influence of regional governance on its performance. *Ambio*, 49: 504-516.
- Nichols, G. J., y J. P. P. Hirst (1998). Alluvial fans and fluvial distributary systems, Oligo-Miocene, Northern Spain: Contrasting processes and products. *Journal of Sedimentary Research*, 68: 879-889.
- Omiste Rodrigo, N. (2024). *Caracterización iónica de suelos y materiales geológicos salinos de la Hoya de Huesca occidental*. Trabajo de fin de grado en Ciencias Ambientales. Universidad de Zaragoza. Accesible a través de <zaguan.unizar.es/>.
- Peña-Monné, J. L., M. M. Sampietro-Vattuone, J. V. Picazo, L. A. Longares, F. Pérez Lambán y D. Badía (2018). Application of geoarchaeological evolutionary models for the interpretation of complex archaeological structures in the central Ebro Basin (Spain). *Quaternary International*, 483: 70-82.
- Pérez-Martín, M. Á., M. Arora y T. E. Monreal (2024). Defining the maximum nitrogen surplus in water management plans to recover nitrate polluted aquifers in Spain. *Journal of Environmental Management*, 356: 120770.
- Picazo, J. V., F. Pérez Lambán, J. L. Peña Monné, M. M. Sampietro, L. A. Longares, J. Justes y J. M. Ortega (2016). Los Pedregales (Lupiñén – Ortila, Huesca): contribución al conocimiento del poblamiento altomedieval en la Hoya de Huesca. *Archivo Español de Arqueología*, 89: 225-248.

- Porta, J., R. Rodríguez Ochoa, M. T. García-González y C. Vizcayno (1992). Material originario laminado de suelos afectados por sales en el valle del Ebro: implicaciones tecnológicas y de uso. *Actas III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*: 305-310. Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. Madrid.
- Qadir, M., A. Ghafoor y G. Murtaza (2000). Amelioration strategies for saline soils: a review. *Land Degradation & Development*, 11 (6): 501-521.
- Richards, L. A. (ed.) (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. U. S. Government Printing Office, n.º 60. Washington.
- Rodríguez Vidal, J. (1986). *Geomorfología de las sierras exteriores oscenses y su piedemonte*. IEA. Huesca. 172 pp.
- Sánchez Navarro, J. A., F. J. Martínez Gil, J. San Román Saldaña y C. Castañeda del Álamo (1989). El arroyo Salado de Puibolea: físico-química de sus aguas y posibilidades de utilización. *Lucas Mallada*, 1: 151-166.
- Smith, M. S. (2005). A glimpse at the geochemistry of alkaline salt-affected soils. En I. C. Roach (ed.), *Regolith. Ten Years of CRC LEME*: 289-293. CRC LEME. Bentley.
- Traba, L. (2015). *Caracterización hidroquímica del acuífero de Huesca*. Trabajo fin de grado de Ciencias Ambientales. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza.
- Vargas, R., E. I. Pankovoy, S. A. Balyuk, P. V. Krasilnikov y G. M. Hasanhanova (2018). *Handbook for Saline Soil Management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations / M. V. Lomonósov Moscow State University. 128 pp.
- Zufiaurre, R., L. Traba y J. A. Cuchí (2015). Caracterización hidroquímica de aguas de la Hoya de Huesca. *Lucas Mallada*, 17: 17-44.
- Zufiaurre, R., Ó. Gracia y J. A. Cuchí (2017). Evolución del contenido en nitratos en aguas subterráneas de la Hoya de Huesca (marzo de 2016 – febrero de 2017). *Lucas Mallada*, 19: 185-207.
- Zufiaurre, R., P. Martín-Ramos y J. A. Cuchí (2020). Nitrates in groundwater of small shallow aquifers in the western side of Hoya de Huesca (NE Spain). *Agronomy*, 10 (1): 22 <<https://doi.org/10.3390/agronomy10010022>>.

LUCAS MALLADA, 26 (2024)

ISSN 0214-8315, ISSN-e 2445-060X

<http://revistas.ica.es/index.php/LUMALL>

LOS SUELOS DE BISCARRUÉS COMO ELEMENTO PEDAGÓGICO

David Badía Villas¹ | José Antonio Cuchí Oterino²

RESUMEN Se presentan los resultados de una jornada de estudio de suelos en Biscarrués, donde se analizaron tres calicatas en diferentes entornos edafológicos.

PALABRAS CLAVE Ciencia del suelo. Terraza del río Gállego. Biscarrués (Huesca).

ABSTRACT The results of a soil study day in Biscarrués are presented, where three soil pits were analysed in different edaphological environments.

KEYWORDS Soil science. Gallego River terrace. Biscarrués (Huesca, Spain).

INTRODUCCIÓN

La edafología estudia el suelo, interfaz entre las fases sólida y gaseosa del planeta. Materia pluridisciplinar entre agronomía, biología, geología, meteorología, geografía, hidrología, geomorfología, ecología y otras ciencias,

¹ Área de Edafología. Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Carretera de Cuarte, s/n. E-22071 Huesca. badia@unizar.es

² Área de Ingeniería Agroforestal. Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Carretera de Cuarte, s/n. E-22071 Huesca. cuchi@unizar.es

enfoca su objetivo en el conocimiento de un cuerpo, generalmente poco profundo, como mucho algunos metros, que es esencial para la vida sobre tierra firme. Pero el objeto de su estudio es frágil. Desde el punto de vista de la geología, la erosión es un fenómeno rápido que origina sedimentos y rocas. Sin embargo, para el suelo, que en materiales duros tarda muchos siglos en formarse, la erosión es una tragedia, dado que sobre la roca desnuda solo pueden proliferar algunos líquenes. Por eso el conocimiento del suelo y su adecuada conservación no ha de ser solo motivo de atención para los científicos, sino que tiene que implicar a toda la sociedad, y especialmente a la rural, dada la total dependencia de cultivos, bosques y ganadería de los suelos que los sustentan.

En el otoño de 2024 se realizaron las I Jornadas de Ciencia Ciudadana y Talleres contra el Cambio Climático en Biscarrués. Una de las actividades versó sobre el conocimiento del suelo. Con este motivo se abrieron calicatas, en tres formas del relieve características del término municipal, para identificar sus suelos. El presente artículo presenta los resultados de esta actividad que combinó docencia, divulgación e investigación.

EL MARCO GEOGRÁFICO

Biscarrués se encuentra en la ribera izquierda del río Gállego, unos kilómetros al sur de donde este sale del Prepirineo y entra en la depresión del Ebro. El término municipal se sitúa entre el mencionado río y el cauce abandonado del río Astón, que en su momento se desvió hacia la depresión de La Sotonera y luego fue aprovechado para el camino Zaragoza – Jaca y el ferrocarril Zuera – Turuñana. En la zona oeste, al sur de la localidad, encontramos el Vadiello, también tramo final abandonado del río Seco que en Ayerbe fue capturado hacia el Gállego por el actual barranco de San Julián, asimismo denominado *barranco de Ayerbe*. Entre las terrazas de ambos hay un relieve estructural, cuya mayor altura es Sangato (602 metros sobre el nivel del mar). Al este, entre los valles del Vadiello y del Astón, donde están los caseríos de La Contienda y Villabietre, hay otra serie de relieves estructurales, próximos a los 600 metros de altura, surcados por varios barrancos de dirección noreste-suroeste (Cucarbata, Bardaringo, Vallipuerto y Valderrasal).

La base geológica del territorio son los materiales distales del abanico Mioceno de Luna, cuyo ápice estaba en Biel. Básicamente, son bancos de

areniscas con algunos paleocanales separados por niveles margosos. En los cauces menores hay rellenos sedimentarios. El Vadiello presenta, al menos, dos niveles de terrazas con alguna decena de metros de diferencia. El Gállego tiene terrazas mucho más desarrolladas. La principal, unos 20 metros por encima del cauce, alberga el núcleo urbano de Erés y una parte de los campos de cultivo del municipio. La inferior, algún metro por encima del cauce natural del Gállego, fue parcialmente inundada por el embalse de Ardisa, que retiene los sedimentos del río, de característico color verde turbio.

La precipitación, con picos de lluvia en primavera y otoño, no alcanza los 500 milímetros por año. La temperatura media supera los 13 °C. La vegetación natural es de tipo mediterráneo continental, con bosque de pino carrasco (*Pinus halepensis*) y carrasca (*Quercus ilex*) en transición hacia la del centro del Ebro, con manchas de vegetación halófila. En las orillas del Gállego hay un bosque de ribera con chopos (*Populus* sp. pl.), fresnos (*Fraxinus* sp.) y sauces (*Salix* sp. pl.). Los cultivos extensivos más importantes son los cereales de invierno, sobre todo cebada, con las alternativas que impone la PAC. Olivos y en menor medida almendros y viñas son los cultivos leñosos más habituales. El porcino estabulado es una importante fuente de ingresos.

LA EXPERIENCIA DOCENTE

Como ya se ha señalado, el 14 de septiembre de 2024 (fig. 1) se realizó una sesión de suelos a la que asistieron alrededor de una docena de personas con diverso nivel de formación, desde estudiantes de universidad a agricultores y neorurales. Se realizó primero una actividad de aula y luego se visitaron las tres calicatas abiertas para la ocasión: una de ellas en un suelo de materiales del Terciario, en las cercanías del cementerio local; la segunda en la terraza principal, en el término de las Alacunas; la tercera en la confluencia del Vadiello con el Gállego. Las calicatas se describieron y muestrearon en presencia del público. El presente artículo completa ese trabajo de campo ofreciendo los resultados analíticos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las fichas con los resultados se presentan a continuación. Señalemos las diferencias entre los tres suelos estudiados, que se pueden definir como

I JORNADAS DE CIENCIA CIUDADANA Y TALLERES CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO EN BISCARRUÉS
SÁBADO 14 SEPTIEMBRE

El suelo: epidermis viva de la Tierra
por David Badía Villas, profesor en la EPS Huesca

10:00 h. Taller práctico: conceptos básicos, funciones y propiedades del suelo.

11:30 - 14:00 h. Sesión de campo: descripción de la morfología del suelo con visita a tres calicatas de suelos realizadas en diferentes lugares.

Lugar: Sala Multiservicios. Ayuntamiento Biscarrués

Inscripción: www.biscarrues.es
+ info: riogallego@gmail.com y 606340951
Gratuita y obligatoria

ORGANIZA: Ayuntamiento de Biscarrués

FINANCIA: GOBIERNO DE ARAGON

14 Septiembre
Sábado De 10-14 h

El suelo: epidermis viva de la Tierra
por David Badía Villas, profesor en la EPS Huesca

Lugar: Sala Multiservicios. Ayuntamiento Biscarrués

10:00 h. Taller práctico: conceptos básicos, funciones y propiedades del suelo.

11:30h 14:00 h. Sesión de campo: descripción de la morfología del suelo con visita a tres calicatas de suelos realizadas en diferentes lugares.

Inscripciones gratuitas y obligatorias en www.biscarrues.es + info: 606340951 y riogallego@gmail.com

Organiza: Ayuntamiento de Biscarrués

Financia: 89% GOBIERNO DE ARAGON

Fig. 1. Carteles anunciadores de las jornadas.



Fig. 2. Diversos momentos de la descriptiva de perfiles: a la izquierda, arriba, perfil en suelo sobre terciario continental del valle del Ebro; abajo, comparativa de color en profundidad en perfil del Vadiello, y a la derecha, perfil en terraza aluvial del Pleistoceno.

Situación: Chanfernández. Camino del cementerio (término municipal de Biscarrués).

Coordenadas UTM: 30 T 0685656-4678004.

Altitud: 480 m.

Geomorfología: rellano estructural, pendiente: 2%, sur.

Material original: margas y calcarenitas del Mioceno.

Vegetación o uso: rotación cereal/alfalfa, en secano.

Clima atmosférico (promedio anual): P: 460 mm, T: 13,7 °C.

Pedregosidad: poco pedregoso (< 5 % de gravas), calcarenitas.

Drenaje: bien drenado.

Profundidad efectiva: moderadamente profundo (60 cm), por contacto lítico.

Clima del suelo (STS): régimen de humedad: xérico, régimen de temperatura: méxico.

Autores de la descripción: D. Badía y J. A. Cuchí. Fecha: 11/09/24.

Camino del cementerio

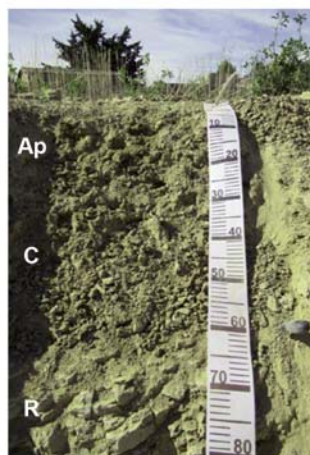


Fig. 3. Uso e imágenes del perfil y del entorno en las cercanías del cementerio de Biscarrués.

un suelo sobre materiales muy erosionados, el situado sobre el Mioceno; un segundo sobre la terraza del Gállego, en una situación de relativa estabilidad, mientras que el tercero está en unas condiciones de acumulación de sedimentos aportados por el pequeño barranco del Vadiello. Esta diversidad edáfica ofrece un evidente interés docente.

Perfil del cementerio de Biscarrués

La figura 3 presenta información sobre el perfil de las cercanías del cementerio de Biscarrués: su uso, la imagen del perfil y la imagen del entorno. Las propiedades químicas del perfil, la textura, la clasificación y la evaluación y la diagnosis de la fertilidad se ofrecen en las tablas I a IV.

<i>Descripción macromorfológica de los horizontes (FAO, 2006)</i>	
<i>Ap</i> (0-20 cm)	ESTADO DE HUMEDAD: Seco. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR DE LA MATRIZ: Amarillo pálido (2,5Y8/3) en seco y en húmedo (2,5Y6/4). MANCHAS: No hay. ESTADO REDOX: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Pocos (5 % v/v), de tamaño de la grava gruesa, angular-esferoidales, de arenisca calcárea, sin orientación definida y distribución regular. TEXTURA AL TACTO: Franco-limosa. ESTRUCTURA: Débilmente desarrollada en bloques subangulares gruesos. COMPACIDAD: Moderada. MATERIA ORGÁNICA: Poca. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: No aparente. RAÍCES: Finas y muy finas, muy pocas. TEST DE CAMPO: Efervescencia al HCl 1 : 1 muy alta. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR DEL HORIZONTE: Abrupto por laboreo, plano. HORIZONTE DE DIAGNÓSTICO: Ninguno.
<i>C</i> (20-60 cm)	ESTADO DE HUMEDAD: Seco. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR DE LA MATRIZ: Amarillo pálido (2,5Y8/3) en seco y en húmedo (2,5Y6/4). MANCHAS: No hay. ESTADO REDOX: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Muy frecuentes (30 % v/v), de tamaño de la grava gruesa y cantos, angular-esferoidal y angular-tabular, margas policromáticas, con orientación horizontal, más abundantes en la base del horizonte. TEXTURA AL TACTO: Franco-limosa. ESTRUCTURA: Débilmente desarrollada, en bloques subangulares, de finos a medianos. COMPACIDAD: Moderada. MATERIA ORGÁNICA: Muy poca. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: No aparente. RAÍCES: Finas y muy finas, muy pocas. TEST DE CAMPO: Efervescencia al HCl 1 : 1 muy alta. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR DEL HORIZONTE: Contacto lítico. HORIZONTE DE DIAGNÓSTICO: Ninguno.
<i>R</i> (60-100 cm)	Margocalizas, policromáticas. Mioceno.

Tabla I. Propiedades químicas del perfil de suelo sobre materiales terciarios en las cercanías del cementerio de Biscarrués.

Horizonte	Profundidad (cm)	pH 1:2,5 H ₂ O	Caliza total (%)	Caliza activa (%)	CE 1:5 (dS/m)	MO (%)	Fósforo Olsen (mg kg ⁻¹)	K ⁺ (mg kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (mg kg ⁻¹)
Ap	0-20	8,6	38	10,3	0,2	1,67	11,9	158	216
C	20-60	9,2	37	11,2	0,5	0,56	6,5	110	444

Tabla II. Textura del perfil de suelo sobre materiales terciarios en las cercanías del cementerio de Biscarrués.

Horizonte	Profundidad (cm)	Arena total (%)	Limo grueso (%)	Limo fino (%)	Arcilla (%)	Clase textural (USDA)	Elementos gruesos (% p/p)
Ap	0-20	17,8	8,0	49,8	24,4	Franco-limosa	5,4
C	20-60	7,6	4,1	51,3	37,0	Franco-arcillo-limosa	36,1

Tabla III. Clasificación y evaluación del perfil de suelo sobre materiales terciarios en las cercanías del cementerio de Biscarrués.

PROPIEDAD	CALIFICACIÓN
Horizontes de diagnóstico	Ninguno.
Propiedades de diagnóstico	Roca continua a 60 cm.
Materiales de diagnóstico	Calcárico, mineral.
Grupo de suelo de referencia WRB (IUSS, 2022)	REGOSOL.
Calificadores principales	Calcaric, Endoleptic.
Calificador(es) del grupo II	(Loamic, Aric, Ochric).
Denominación completa (WRB)	Calcaric, Endoleptic Regosol (Loamic, Aric, Ochric).
Sinonimia con Soil Taxonomy System	Typic Xerorthent.
Capacidad agrológica	III s (espesor efectivo limitado).

Este Regosol calcárico es el perfil topográficamente más elevado de los estudiados en un rellano estructural. Se puede considerar como típico de lo que se conoce genéricamente como *monte*. Se desarrolla sobre la alternancia de areniscas y “arcillas”, donde las segundas, en muchos casos con dominio de la fracción limo, se cultivan, como en este caso. Es un suelo de color pálido, pobre en materia orgánica y rico en carbonato cálcico. Debido a la

Tabla iv. Diagnósis de la fertilidad (en el horizonte superficial Ap, salvo que se indique otra cosa) del perfil de suelo sobre materiales terciarios en las cercanías del cementerio de Biscarrués.

PROPIEDAD	VALORACIÓN
<i>Reacción del suelo (pH)</i>	Muy básica.
<i>Carbonatos</i>	Altos, al igual que la caliza activa.
<i>Materia orgánica</i>	Contenido bajo.
<i>Fósforo Olsen</i>	Nivel medio-bajo para suelos agrícolas, de textura fina.
<i>Potasio de cambio</i>	Nivel bajo para suelos agrícolas, de textura fina.
<i>Salinidad (CE)</i>	No salino.
<i>Sodicidad</i>	No sódico.
<i>Clase textural al tacto</i>	Franco-limosa.
<i>Pedregosidad del perfil</i>	Muy poco pedregoso.
<i>Retención de agua del perfil</i>	Baja, por presencia de capa R a 60 cm.

fracción limosa y al alto pH de la roca madre, se trata de un suelo muy erosionable, con baja conductividad hidráulica, por lo que es un generador de sedimentos. El horizonte Ap se desarrolla a golpe de arado sobre el material geológico algo alterado, que se considera C. En este caso es poco profundo, dado que la arenisca subyacente está muy próxima a la superficie, con lo que la capacidad de almacenamiento de agua en el perfil resulta baja.

En el horizonte C los valores de pH superiores a 9 sugieren cierta sodicidad, pero la conductividad eléctrica es baja. Parece el material precursor de los suelos con alta sodicidad que se describen en Modrán en Cuchí y cols. (2024).

Perfil de la terraza del Gállego

La figura 4 presenta información sobre el perfil de la terraza principal del Gállego: su uso, la imagen del perfil y la imagen del entorno. Las propiedades químicas del perfil, la textura, la clasificación y la evaluación y la diagnósis de la fertilidad se ofrecen en las tablas v a VIII.

Aunque el río Gállego presenta alguna terraza de reducidas dimensiones en el tramo entre Sabiñánigo y La Peña, a partir de Riglos estas tienen un



Fig. 4. Uso e imágenes del perfil y del entorno en la terraza principal del Gállego.

<i>Descripción macromorfológica de los horizontes (FAO, 2006)</i>	
<i>Ap</i> (0-10/15 cm)	<p>ESTADO DE HUMEDAD: Seco. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR DE LA MATRIZ: Naranja pálido (7,5YR 6/4) en seco y marrón (7,5YR 4/4) en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO REDOX: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Frecuentes (15 % v/v), de tamaño grava, redondeado-plano, redondeado-esferoidal y redondeado-tabular, poligénicos, sin orientación definida y distribución regular. TEXTURA AL TACTO: Franco-arcillosa. ESTRUCTURA: Moderada, en bloques subangulares, de finos a gruesos. COMPACIDAD: Moderada. MATERIA ORGÁNICA: Poca. ACTIVIDAD HUMANA: Fragmentos de carbón, poco. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: No aparente. RAÍCES: Finas y muy finas, muy pocas. GRIETAS: No hay. TEST DE CAMPO: Baja efervescencia al HCI 1 : 1. ACUMULACIONES: No hay. CEMENTACIONES: No cementado. REVESTIMIENTOS: No hay. LÍMITE INFERIOR DEL HORIZONTE: Abrupto, plano.</p> <p>HORIZONTE DE DIAGNÓSTICO: Ninguno.</p>
<i>Bt</i> (15-45 cm)	<p>ESTADO DE HUMEDAD: Seco. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR DE LA MATRIZ: Pardo rojizo pálido (5YR 5/4) en seco y pardo rojizo pálido (5YR 4/4) en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO REDOX: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Abundantes (50 % v/v), de tamaño grava gruesa y cantos, redondeado-plano, redondeado-esferoidal y redondeado-tabular, poligénicos, imbricados y aumentando en profundidad. TEXTURA AL TACTO: Arcillosa. ESTRUCTURA: Moderada, en bloques subangulares, de finos a medianos. COMPACIDAD: Moderada. MATERIA ORGÁNICA: Poca. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: No aparente. RAÍCES: No hay. GRIETAS: No hay. TEST DE CAMPO: Baja efervescencia al HCI 1 : 1. ACUMULACIONES: Cemento geopetal, fino, poco. CEMENTACIONES: No cementado. REVESTIMIENTOS: Con caras de presión, frecuentes. LÍMITE INFERIOR DEL HORIZONTE: Neto, plano.</p> <p>HORIZONTE DE DIAGNÓSTICO: Árgico.</p>
<i>Ck</i> (45-105 cm)	<p>ESTADO DE HUMEDAD: Seco. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR DE LA MATRIZ: Marrón pálido (7,5YR 5/4) en seco y marrón (7,5YR 4/4) en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO REDOX: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Muy abundantes (80 % v/v), de tamaño grava a grandes bloques, redondeado-plano, redondeado-esferoidal y redondeado-tabular, poligénicos, más abundantes en la base del horizonte. TEXTURA AL TACTO: Franca. ESTRUCTURA: Sin estructura por la abundancia de elementos gruesos. COMPACIDAD: Baja. MATERIA ORGÁNICA: Muy poca. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: No aparente. RAÍCES: No hay. GRIETAS: No hay. TEST DE CAMPO: Efervescencia al HCI 1 : 1 muy alta. ACUMULACIONES: Cemento geopetal, mediano, abundante. CEMENTACIONES: Compacto, pero no cementado. REVESTIMIENTOS: No hay. LÍMITE INFERIOR DEL HORIZONTE: Neto, plano.</p> <p>HORIZONTE DE DIAGNÓSTICO: Cálculo.</p>

Tabla v. Propiedades químicas del perfil de suelo sobre la terraza pleistocena de Biscarrués.

Horizonte	Profundidad (cm)	pH 1:2,5 H ₂ O	Caliza total (%)	Caliza activa (%)	CE 1:5 (dS/m)	MO (%)	Fósforo Olsen (mg kg ⁻¹)	K ⁺ (mg kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (mg kg ⁻¹)
Ap	0-15	8,3	6	< 1	0,2	2,11	37	544	138
Bt	15-45	8,5	8	< 1	0,2	1,32	10	360	84
Ck	45-105	8,6	38	2,5	0,1	0,54	9	114	54

Tabla vi. Textura del perfil de suelo sobre la terraza pleistocena de Biscarrués.

Horizonte	Profundidad (cm)	Arena total (%)	Limo grueso (%)	Limo fino (%)	Arcilla (%)	Clase textural (USDA)	Elementos gruesos (% p/p)
Ap	0-15	33,0	12,0	22,3	32,6	Franco-arcillosa	16,1
Bt	15-45	30,6	6,3	16,5	46,6	Arcillosa	66,4
Ck	45-105	67,1	1,7	10,3	20,9	Franco-arcillo-arenosa	87,8

Tabla vii. Clasificación y evaluación del perfil de suelo sobre la terraza pleistocena de Biscarrués.

PROPIEDAD	CALIFICACIÓN
Horizontes de diagnóstico	Árgico (carbonatado), cálcico.
Propiedades de diagnóstico	Diferencia textural abrupta.
Materiales de diagnóstico	Material calcárico, material mineral.
Grupo de suelo de referencia WRB (IUSS, 2022)	CALCISOL.
Calificadores principales	Skeletal Luvic.
Calificador(es) suplementarios	(Loamic, Abruptic, Aric, Ochric).
Denominación completa (WRB)	Skeletal Luvic Calcisol (Loamic, Abruptic, Aric, Ochric).
Sinonimia con Soil Taxonomy System	Calcic Haploxeralf.
Capacidad agrológica	III s (limitación por elevada pedregosidad).
Observaciones	Si se confirmara la presencia de mallacán bajo el Ck, se puede añadir el calificador Bathypetric entre los suplementarios (por hallarse a más de 100 cm). Por rubefacción está cerca del calificador Chromic.

Tabla VIII. Diagnósis de la fertilidad (en el horizonte superficial, Ap, salvo que se indique otra cosa) del perfil de suelo sobre la terraza pleistocena de Biscarrués.

PROPIEDAD	VALORACIÓN
<i>Reacción del suelo (pH)</i>	Básica.
<i>Carbonatos</i>	Bajo (al igual que la caliza activa).
<i>Materia orgánica</i>	Contenido medio.
<i>Fósforo Olsen</i>	Nivel alto para suelos agrícolas, de textura fina.
<i>Potasio de cambio</i>	Nivel alto para suelos agrícolas, de textura fina.
<i>Salinidad (CE)</i>	No salino.
<i>Sodicidad</i>	No sódico.
<i>Clase textural</i>	Franco-arcillosa.
<i>Pedregosidad del perfil</i>	Muy pedregoso.
<i>Retención de agua del perfil</i>	Moderadamente limitada por la abundancia de piedras.

importante desarrollo, con múltiples niveles y subniveles. En general, de allí hacia Zaragoza se observa un desplazamiento del Gállego hacia el oeste, de modo que la serie de terrazas están más desarrolladas en la orilla derecha. Eso facilita el estudio de catenas, como las realizadas en Gurrea de Gállego para encostramiento calcáreo y rubefacción por Alberto y cols. (1979). Lewis y cols. (2009) dataron las terrazas y Gillot y cols. (2022) presentan climofunciones en esta misma zona.

En la terraza estudiada en Biscarrués el espesor de la grava oscila entre los 5 y los 10 metros sobre los ya citados materiales terciarios. Encima de esta superficie de contacto hay un pequeño acuífero, utilizado para pozos en la cercana localidad de Erés. Es el mejor suelo en la zona. Cultivado en época antigua con olivos y viñas, hoy se cultiva fundamentalmente con cereal de invierno, aunque el número de construcciones, naves y granjas está aumentando. A nivel edafológico, en este suelo destaca su color pardo oscuro por rubefacción de los óxidos de hierro. También la presencia de piedras de la cuenca superior, incluidos granitos y basaltos de Panticosa. Sus dimensiones, cercanas a 1 decímetro, hablan de la energía de la corriente fluvial que las transportó y su molestia para las labores mecanizadas. Aunque aumenta el contenido de caliza en profundidad, no se ha observado la presencia de un horizonte petrocálcico (mallacán), al igual que lo observado por Badía Villas (coord.) (2009) en una terraza similar en Murillo de Gállego.

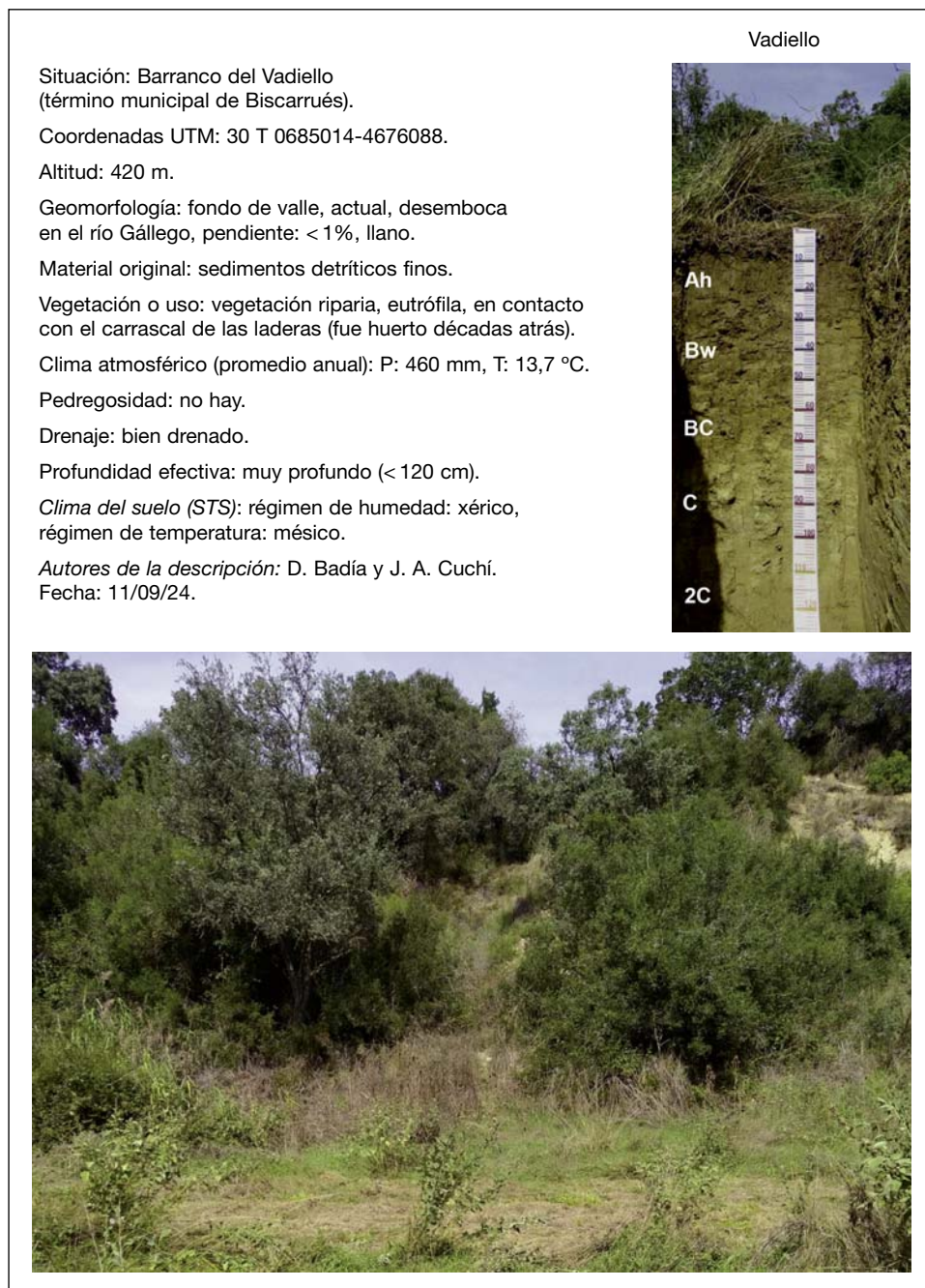


Fig. 5. Uso e imágenes del perfil y del entorno en la desembocadura del Vadiello.

Perfil del Vadiello

La figura 5 presenta información sobre el perfil en la desembocadura del Vadiello: su uso, la imagen del perfil y la imagen del entorno. Las propiedades químicas del perfil, la textura, la clasificación y la evaluación y la diagnosis de la fertilidad se ofrecen en las tablas IX a XII.

<i>Descripción macromorfológica de los horizontes (FAO, 2006)</i>	
<i>Ah1 (0-5 cm)</i>	ESTADO DE HUMEDAD: Seco. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR DE LA MATRIZ: Pardo pálido (10YR 6/4) en seco y pardo amarillento oscuro (10YR 4/3) en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO REDOX: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: No hay. TEXTURA AL TACTO: Franca. ESTRUCTURA: Fuerte, granular, de muy finos a medianos. COMPACIDAD: Muy poco compacto. MATERIA ORGÁNICA: Abundante. ACTIVIDAD HUMANA: No aparente. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: Turrículas, frecuentes. RAÍCES: De muy finas a medianas, frecuentes. GRIETAS: No hay. TEST DE CAMPO: Alta efervescencia al HCI 1 : 1. ACUMULACIONES: No hay. CEMENTACIONES: No cementado. REVESTIMIENTOS: No hay. LÍMITE INFERIOR DEL HORIZONTE: Muy abrupto, plano. HORIZONTE DE DIAGNÓSTICO: Ninguno.
<i>Ah2 (5-30 cm)</i>	ESTADO DE HUMEDAD: Seco. ESTADO REDOX: oxidado. COLOR DE LA MATRIZ: Pardo pálido (10YR 7/3) en seco y pardo amarillento oscuro (10YR 5/4) en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO REDOX: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: No hay. TEXTURA AL TACTO: Franco-limosa. ESTRUCTURA: Fuerte, en bloques subangulares, de finos a medianos. COMPACIDAD: Poco compacto. MATERIA ORGÁNICA: Abundante. ACTIVIDAD HUMANA: No aparente. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: Galerías, frecuentes. RAÍCES: De muy finas a finas, frecuentes. GRIETAS: No hay. TEST DE CAMPO: Alta efervescencia al HCI 1 : 1. ACUMULACIONES: No hay. CEMENTACIONES: No cementado. REVESTIMIENTOS: No hay. LÍMITE INFERIOR DEL HORIZONTE: Gradual, plano. HORIZONTE DE DIAGNÓSTICO: Ninguno.
<i>Bw (30-55 cm)</i>	ESTADO DE HUMEDAD: Seco. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR DE LA MATRIZ: Pardo pálido (10YR 7/4) en seco y pardo pálido (10YR 6/4) en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO REDOX: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: No hay. TEXTURA AL TACTO: Franco-limosa. ESTRUCTURA: Fuerte, en bloques subangulares, medianos. COMPACIDAD: Moderadamente compacto. MATERIA ORGÁNICA: Poca. ACTIVIDAD HUMANA: Carbón, poco. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: Galerías, vacías y rellenas, abundantes. RAÍCES: De muy finas a finas, pocas. GRIETAS: No hay. TEST DE CAMPO: Alta efervescencia al HCI 1 : 1. ACUMULACIONES: No hay. CEMENTACIONES: No cementado. REVESTIMIENTOS: No hay. LÍMITE INFERIOR DEL HORIZONTE: Neto, plano. HORIZONTE DE DIAGNÓSTICO: Cámbico.

<i>Descripción macromorfológica de los horizontes (FAO, 2006) (continuación)</i>	
<i>BC</i> (55-75 cm)	ESTADO DE HUMEDAD: Seco. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR DE LA MATRIZ: Pardo muy pálido (10YR 8/4) en seco y pardo pálido (10YR 7/4) en húmedo. MANCHAS: Escasas, muy pequeñas, poco contrastadas. ESTADO REDOX: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: No hay. TEXTURA AL TACTO: Limosa. ESTRUCTURA: Débil, en bloques subangulares, medianos. COMPACIDAD: Muy compacto. MATERIA ORGÁNICA: Poca. ACTIVIDAD HUMANA: Carbón, poco. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: Galerías, pocas. RAÍCES: De muy finas a finas, pocas. GRIETAS: No hay. TEST DE CAMPO: Alta efervescencia al HCl 1 : 1. ACUMULACIONES: No hay. CEMENTACIONES: No cementado. REVESTIMIENTOS: No hay. LÍMITE INFERIOR DEL HORIZONTE: Neto, plano. HORIZONTE DE DIAGNÓSTICO: Ninguno.
<i>C</i> (75-100 cm)	ESTADO DE HUMEDAD: Seco. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR DE LA MATRIZ: Pardo muy pálido (10YR 8/4) en seco y pardo pálido (10YR 7/4) en húmedo. MANCHAS: Escasas, pequeñas, moderadamente contrastadas (10YR 7/1, gris claro, en seco). ESTADO REDOX: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: No hay. TEXTURA AL TACTO: Limosa. ESTRUCTURA: Débil, laminar yuxtapuesta en bloques subangulares, medianos. COMPACIDAD: Muy compacto. MATERIA ORGÁNICA: Poca. ACTIVIDAD HUMANA: No aparente. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: No aparente. RAÍCES: De muy finas a finas, pocas. GRIETAS: No hay. TEST DE CAMPO: Alta efervescencia al HCl 1 : 1. ACUMULACIONES: No hay. CEMENTACIONES: No cementado. REVESTIMIENTOS: No hay. LÍMITE INFERIOR DEL HORIZONTE: Neto, plano. HORIZONTE DE DIAGNÓSTICO: Ninguno.
<i>2C</i> (100-130 cm)	ESTADO DE HUMEDAD: Seco. ESTADO REDOX: Oxidado. COLOR DE LA MATRIZ: Pardo muy pálido (10YR 8/4) en seco y pardo pálido (10YR 7/4) en húmedo. MANCHAS: Escasas, muy pequeñas, poco contrastadas, color herrumbre (10YR 6/6). ESTADO REDOX: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: No hay. TEXTURA AL TACTO: Arenosa. ESTRUCTURA: Débil, algunos bloques subangulares, medianos, en un horizonte dominado por granos sueltos. COMPACIDAD: Poco compacto. MATERIA ORGÁNICA: Poca. ACTIVIDAD HUMANA: No aparente. ACTIVIDAD DE LA FAUNA: No aparente. RAÍCES: De muy finas a finas, pocas. GRIETAS: No hay. TEST DE CAMPO: Alta efervescencia al HCl 1 : 1. ACUMULACIONES: No hay. CEMENTACIONES: No cementado. REVESTIMIENTOS: No hay. LÍMITE INFERIOR DEL HORIZONTE: Neto, plano. HORIZONTE DE DIAGNÓSTICO: Ninguno.

Tabla ix. Propiedades químicas del perfil de suelo en la desembocadura del Vadiello.

Horizonte	Profundidad (cm)	pH 1 : 2,5 H ₂ O	Caliza total (%)	Caliza activa (%)	CE 1 : 5 (dS/m)	MO (%)	P-Olsen (mg kg ⁻¹)	K ⁺ (mg kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (mg kg ⁻¹)
Ah1	0-5	7,9	35	8,8	0,3	7,73	77	494	230
Ah2	5-30	8,2	37	9,6	0,2	3,60	45	214	164
Bw	30-55	8,4	36	10,2	0,4	1,67	15	68	200
BC	55-75)	8,3	37	10,9	0,7	1,06	5	48	336
C	75-100	8,2	35	10,8	1,7	0,85	2	46	466
2C	100-130	8,7	39	3,7	0,4	0,74	4	38	206

Tabla x. Textura del perfil de suelo en la desembocadura del Vadiello.

Horizonte	Profundidad (cm)	Arena total (%)	Limo grueso (%)	Limo fino (%)	Arcilla (%)	Clase textural (USDA)	Elementos gruesos (% p/p)
Ah1	0-5	28,0	19,5	37,3	15,1	Franco-limosa	0
Ah2	5-30	10,8	20,5	46,5	22,1	Franco-limosa	0
Bw	30-55	5,5	17,3	49,0	28,2	Franco-arcillo-limosa	0
BC	55-75	1,3	9,7	59,3	29,7	Franco-arcillo-limosa	0
C	75-100	2,1	6,1	58,0	33,8	Franco-arcillo-limosa	0
2C	100-130	51,3	7,0	21,2	20,5	Franca	0

La zona inferior del Vadiello, en su confluencia con el río Gállego, fue zona de huertos hasta su expropiación para la construcción del embalse de Ardisa. Es un suelo de acumulación aluvial que recoge una parte de los materiales erosionados de los suelos sobre materiales del Mioceno.

Tabla xi. Clasificación y evaluación del perfil de suelo en la desembocadura del Vadiello.

PROPIEDAD	CALIFICACIÓN
<i>Horizontes del diagnóstico</i>	Cámbico.
<i>Propiedades del diagnóstico</i>	Discontinuidad lítica (2C) en la base (denota diferentes tiempos de depósito).
<i>Materiales del diagnóstico</i>	Material calcárico, material mineral.
<i>Grupo de suelo de referencia WRB (IUSS, 2022)</i>	CAMBISOL.
<i>Calificador(es) principales</i>	Calcaric.
<i>Calificadores suplementarios</i>	(Loamic, Humic).
<i>Denominación completa (WRB)</i>	Calcaric Cambisol (Loamic, Humic).
<i>Sinonimia con Soil Taxonomy System</i>	Fluventic Haploxerept.
<i>Capacidad agrológica</i>	I, en regadío (IIc, en secano).
<i>Observaciones</i>	Aunque el material parental se corresponda con material flúvico, el suelo muestra tal desarrollo de su estructura, por actividad biológica, que carece de la estratificación propia de sedimentos fluviales (de ahí el paso del GSR Fluvisol a Cambisol).

Tabla xii. Diagnóstico de la fertilidad (en el horizonte superficial, Ah promedio) del perfil de suelo en la desembocadura del Vadiello.

PROPIEDAD	CALIFICACIÓN
<i>Reacción del suelo (pH)</i>	Básica.
<i>Carbonatos</i>	Nivel alto, al igual que la caliza activa.
<i>Materia orgánica</i>	Contenido medio.
<i>Fósforo Olsen</i>	Nivel alto.
<i>Potasio de cambio</i>	Nivel medio.
<i>Salinidad (CE)</i>	No salino (moderada en una capa C).
<i>Sodicidad</i>	No sódico.
<i>Clase textural al tacto</i>	Franco-limosa (FL).
<i>Pedregosidad del perfil</i>	No pedregoso.
<i>Retención de agua del perfil</i>	Potencialmente muy alta, dada la ausencia de piedras y la elevada profundidad efectiva.

CONCLUSIONES

La actividad tenía dos objetivos: el docente y el más científico. Ambos se han cumplido, entre otras cosas por la gran variabilidad entre los tres suelos estudiados. Sería recomendable ampliar este tipo de actividades.

AGRADECIMIENTOS

A la alcaldesa de Biscarrués, María Dolores Giménez, por apoyar y patrocinar la idea. A José María Giménez, por abrir las calicatas con su excavadora, una en uno de sus campos. A José Antonio Torralba, por el acceso a un campo suyo. Y a todos los participantes, por la interesante jornada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alberto, F., J. Machín, J. A. Cuchí y R. Poza (1979). *Suelos sobre terrazas y glaciares de la depresión media del Ebro. Memoria y guía de las excursiones científicas de la VIII Reunión Nacional de Suelos*. CSIC / Estación Experimental de Aula Dei. Zaragoza.
- Badía Villas, D. (coord.) (2009). *Itinerarios edáficos por el Alto Aragón*. IEA. Huesca. 189 pp.
- Cuchí Oterino, J. A., N. Omiste Rodrigo y R. Zufiaurre Galarza (2024). Algunas características de materiales geológicos y suelos salinos en la zona occidental de la Hoya de Huesca. *Lucas Mallada*, 26: 113-142.
- Gillot, T., I. Cojan y D. Badía (2022). Paleoclimate instabilities during late Oligocene-Early Miocene in SW Europe from new geochemical climofunctions based on soils with pedogenic carbonate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 591: 110882.
- Lewis, C. J., E. V. McDonald, C. Sancho, J. L. Peña y E. Rhodes (2009). Climatic implications of correlated Upper Pleistocene glacial and fluvial deposits on the Cinca and Gállego Rivers (NE Spain) based on OSL dating and soil stratigraphy. *Global and Planetary Change*, 67: 141-152.

LUCAS MALLADA, 26 (2024)

ISSN 0214-8315, ISSN-e 2445-060X

<http://revistas.ica.es/index.php/LUMALL>

APORTACIÓN A LA HISTORIA DE LAS PRESAS DEL ALTO FLUMEN

José Antonio Cuchí Oterino¹ | Almudena Bollaín Covarrubias² |
José Luis Villarroel Salcedo¹

RESUMEN El presente artículo pretende brindar información sobre la construcción de las presas del alto Flumen a principios del siglo xx. La zona tiene importantes rasgos kársticos que influyeron en la viabilidad del proyecto.

PALABRAS CLAVE Embalse de Belsué. Embalse de Cienfuens. Karst. Río Flumen (Huesca).

ABSTRACT This paper hopes to provide information on the construction of the upper Flumen dams at the beginning of the 20th century. The area has important karst features that influenced the feasibility of the project.

KEYWORDS Belsué dam. Cienfuens dam. Karst. Flumen River (Huesca, Spain).

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad, al menos desde época romana, el río Flumen ha sido ampliamente utilizado para riego de sus localidades ribereñas. Sin embargo, hasta inicios del siglo xx no se realizaron obras de regulación en

¹ Grupo de Tecnologías en Entornos Hostiles (GTE). Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A). Campus Río Ebro. Edificio I+D+i. Universidad de Zaragoza. C/ Mariano Esquillor, s/n. E-50018 Zaragoza. cuchi@unizar.es, jlvilla@unizar.es

² almudena.bollain@cultura.gob.es

su cauce, en contraste con su vecino Isuela, donde sus riegos, mantenidos por el concejo de Huesca, contaban con albercas en derivación en Cortés y Loreto desde la Edad Media, y con el embalse de Arguis desde finales del siglo XVII en la cabecera del río.

La idea de la construcción de un pantano en el alto Flumen, en funciones y posición similares a las del de Arguis, debió de ser antigua. Balaguer (1954) señala como causas del retraso la jurisdicción del monasterio de Montearagón sobre parte de la zona regada y diversos molinos, aunque esta desaparece con la desamortización de Mendizábal y es posible que influyeran los conflictos entre los sindicatos preexistentes. Sin embargo, a finales del siglo XIX se tomó la decisión de realizar regulaciones en este río en una ubicación similar a la del pantano de Arguis, en la cabecera del estrecho situado aguas abajo de la hoy desaparecida localidad de Santa María de Belsué. Las obras se iniciaron a principios del siglo XX a partir de un largo proceso, descrito por Mur (1919). Pero el asunto fue más complicado. El presente artículo tiene como objetivo ofrecer alguna información sobre las vicisitudes de este pantano y sus asociados de Cienfuens, Salto de Roldán y el Escalerón.

MARCO NATURAL

El río Flumen

El Flumen nace en la sierra de Bonés, aguas arriba de la ermita de la Malena. En su cabecera se encuentra un trasvase al Isuela realizado en el siglo XVII (Cuchí y cols., 2006; Garcés, 2006). El río sigue inicialmente una clara dirección oeste-este hasta cruzar la A-23, paralela a la estratificación. Después desciende hacia el sureste en zigzag, en tramos alternantes paralelos y transversales a la estratificación. Cerca de la pardina de Ascaso discurre por meandros encajados hasta salir a la depresión margosa de Santa María de Belsué, donde toma una clara dirección sur. Recibe por la izquierda el barranco de Lúsera, también denominado *Carruaca* o, según algunos mapas, *Flumen*, y que tiene su cabecera cerca de la pardina de Orlato. Un centenar de metros aguas abajo, por la orilla derecha, llega el barranco de Belsué, de caudal mucho más reducido, que también presenta un pequeño cañón inciso en las calizas del Paco As Lianas. A partir de allí el río se

encaja hacia el sur para salir al somontano oscense en las cercanías del castillo de Montearagón. Es un cañón complejo. La zona superior, de interés para el presente artículo, está encajada en calizas hasta la depresión de La Piatra, donde recibe varios barrancos temporales, incluido el que cae de Valleclusa por el Saltadero. Vuelve a encajarse en el estrecho de Palomeras, entre los espectaculares mallos de Salto de Roldán. Al sur de estos continúa encajado durante bastantes kilómetros en el somontano, hasta las cercanías de Tierz.

Geología y geomorfología

La cuenca alta se enmarca en las Sierras Exteriores altoaragonesas. Para el presente artículo es de interés el tramo superior, desde la presa del embalse de Santa María de Belsué hasta la antigua zona de cultivo que rodea el dolmen de Belsué, aguas arriba del desfiladero de Las Palomeras, en Salto de Roldán.

En la zona afloran materiales del Keuper, el Cretácico superior, el Paleoceno y el Eoceno (Millán, 2006; Montes, 2009). Salvo la primera unidad, de tipo arcilloso, las demás son, fundamentalmente, calcáreas. Su nivel superior son las calizas de Guara, que hacia el norte dan paso a las margas grises, el salagón, donde está el vaso del embalse de Santa María de Belsué. Calizas y margas se estructuran en un sinclinal de fondo plano entre los anticlinales del Águila y Gabardiella. El cañón del Flumen presenta una clara disimetría entre las orillas. La derecha, el denominado *Paco As Lianas*, deriva topográfica a *Paco Adriana*, es una suave cuesta monoclinál con un buzamiento de unos 20 grados hacia el norte, cuya caída al cañón del Flumen se resuelve en un acantilado de un centenar de metros. La orilla izquierda del cañón, en las estribaciones del pico Gabardiella, es más abrupta: está formada por un anticlinal de eje norte-sur, que retrocabalga hacia el Guatizalema con repliegues menores perpendiculares al Flumen. Sus ejes confluyen en abanico hacia el este, de modo que, en la orilla del río se miden buzamientos de hasta 60 grados al noroeste. El cañón del Flumen marca una discontinuidad. Millán (2006) indica la existencia de dos ejes: en la zona norte hay un eje sinclinal, de dirección noreste-suroeste, que asciende por la ladera izquierda del río, hacia Gabardiella; en la inferior, marca otro eje, esta vez anticlinal, de dirección noroeste-sureste. También

la fracturación presenta direcciones distintas en los dos lados del cañón, bien visibles en ambos estribos de la presa de Santa María de Belsué. El cañón termina de forma abrupta y se abre especialmente al oeste, al llegar al río, a un cabalgamiento de dirección este-oeste que da paso a materiales del Keuper, en una colección de pequeñas escamas cabalgantes donde se ha excavado la depresión que Lucien Briet denominó del *barranco de San Mamés*. Aquí está el dolmen de La Piatra. En esta zona el paisaje sigue mostrando una disimetría entre ambas orillas: la izquierda es abrupta y presenta el espectacular sinclinal colgado de Valleclusa, que finaliza por el oeste en un impresionante salto; la derecha es más suave, cultivada en el pasado y separada de la cuenca del Isuela por el anticlinal del Puy Acuto. Al sur el estrecho formado por los conglomerados oligocenos de Salto de Roldán da paso hacia el somontano, donde dominan las margas y areniscas del Mioceno.

LAS PRESAS DEL ALTO FLUMEN

Como se ha señalado, a inicios del siglo xx se comenzó a construir un embalse en el alto Flumen, denominado de *Santa María de Belsué* o simplemente *Belsué*. Después se construyó otro de dimensiones menores conocido como de *Cienfuens*. Se estudió pero no se realizó un tercero en el estrecho de Salto de Roldán. Aguas abajo se encuentra el actual pantano de Montearagón.

El embalse de Salto de Roldán

Era inevitable que el emblemático estrecho de Salto de Roldán, bien visible desde Huesca, suscitara el interés en construir allí un embalse. Balaguer (1958) y Bolea (1986) citan que la primera idea fue de Serafín Casas, catedrático del Instituto de Huesca. Este era el padre de Conchita Casas, con quien Joaquín Costa aspiraba a casarse hacia 1878 (Ara, 2011). Pero la idea era anterior. En el Archivo General de la Administración (AGA) constan las autorizaciones concedidas por el gobernador civil en 1874 a Antonio M. Costa “para estudiar un pantano en las cuencas de los ríos Isuela y Flumen”; en 1876 a Miguel Casaús y otros “para estudiar construir dos pantanos en el punto denominado Salto de Roldán”, y en 1878 a Francisco Bescós

y a Sixto Vilas “para estudiar un pantano en la cuenca del río Flumen”. Y entre 1875 y 1879 Miguel Costa y Pablo Blanch presentaron proyectos de riego con aguas del Isuela y del Flumen.

En los antecedentes de la presa de Santa María de Belsué se indica que, el 14 de marzo de 1888, Ramón García, jefe de la División Hidrológica del Ebro, remitió a la Dirección General de Obras Públicas el proyecto de un pantano que denominaba de *Santa María de Belsué*. El 30 de enero del siguiente año elevaba otro en Salto de Roldán. Ambos proyectos se refundieron en uno solo por decisión del 12 de octubre de 1893.

Según el *Diario de Avisos de Zaragoza* del 30 de diciembre de 1898, el pantano debía ser construido por concesión en cinco años, junto con el de Belsué, por real decreto de 10 de junio de ese año. En el primer año debían construirse todas las obras accesorias de Belsué, cimientos y los primeros 5 metros. En Salto de Roldán se debería hacer lo mismo, pero la obra solo subiría a 3 metros, más 7 kilómetros de la acequia de la izquierda y 8 de la derecha. En el segundo año, 13 metros en Santa María y 20 en la de Roldán, más 11 y 12 kilómetros de canal. En el tercero se acabaría Roldán y se elevaría Belsué a 33 metros, más tantos kilómetros de canales como el año anterior. En el cuarto se subiría Belsué a 35 metros, se terminaría el canal de la izquierda y se prolongaría otros 12 kilómetros el de la derecha. El último año se acabaría todo y el concesionario podría comenzar a hacer contratos de riego en función de la zona dominada. La obra estaba subvencionada al 30 %, con un premio de 220 380 pesetas. Según la prensa, Manuel Camo esperaba que hubiera postores en la subasta. Una carta, con membrete del Senado, indicaba que se había autorizado al Ministerio de Fomento para la concesión con ciertas condiciones (archivo personal de Luis Gonzaga de Azara, marqués de Nibbiano, en el Archivo Histórico Provincial de Huesca, AHPHu, F/000069/000006).

No funcionó el sistema concesional, pero no decayó la idea. Apoyado el embalse por Joaquín Costa desde la Cámara Agrícola del Alto Aragón, la ubicación en Salto de Roldán fue incluida en el Avance de un Plan General de Pantanos y Canales de Riego de 1899, realizado por Saturnino Bellido Díaz (Gil Olcina, 2001), con la participación de Cleto Miguel Mantecón. Más tarde, los proyectos de Salto de Roldán y Belsué pasaron al Plan General de Canales de Riego y Pantanos de 1902 o *Plan Gasset*. Señalemos que

este era un simple listado que incluía numerosas cerradas sin estudios geológicos e hidrológicos.

Preterido el embalse de Salto de Roldán al de Santa María de Belsué, periódicamente se ha resucitado la posibilidad de construirlo. Balaguer (1958), tras el fracaso de los embalses en la zona superior, indica que se volvió a considerar la idea. Así, el Ayuntamiento de Huesca solicitó en 1951 un estudio geológico allí y más al sur. Es posible que a este estudio se deban los agujeros barrenados a uno y otro lado de las dos peñas que Almudévar (2005) cita que había observado José María Oliván, de Santa Eulalia la Menor.

El embalse de Santa María de Belsué

Ya se ha señalado el origen del proyecto. En marzo de 1901 se dio la orden de redacción definitiva de varios proyectos en la cuenca del Ebro, indicando que se revisaran los existentes para corregir los perfiles según las nuevas teorías de Lévy. *El Diario de Huesca* del 3 de mayo de 1902 señalaba que “en la Dirección General estaba pendiente de aprobación cuando el Sr. Camo tuvo la feliz idea de intentar fuera esa una de las grandes obras cuya ejecución se decretase con motivo de la coronación del Rey”.

Cleto Miguel Mantecón fue encargado tanto de la modificación del proyecto como del inicio de las obras (Mantecón, 1902). Su memoria, redactada a mano (fig. 1), se basaba en los anteriores proyectos. La memoria indica que la presa se construía en el kilómetro 10 del itinerario del río, 300 metros por encima de la Roca de la Toba y 6 kilómetros antes de Salto de Roldán.

El proyectista, con el fin de acercarse, en la medida de lo posible, a soluciones tipo Lévy, planteó dos alternativas. Una, la escogida, adaptando el perfil a la citada condición, como se había realizado en el pantano de La Peña. La otra, añadiendo una pantalla de hormigón armado con drenes al perfil primitivo, que no llegó a estudiar en detalle por premura de tiempo (Mantecón, 1902; Díez Gascón y Bueno, 2001). La obra se presupuestaba inicialmente en 1 330 167,65 pesetas y se haría por administración. Se preveía realizar toda la obra en siete años.

La actual presa de Santa María de Belsué, por la localidad cercana, se basa inicialmente en el proyecto firmado el 8 de marzo de 1902 por Mantecón y

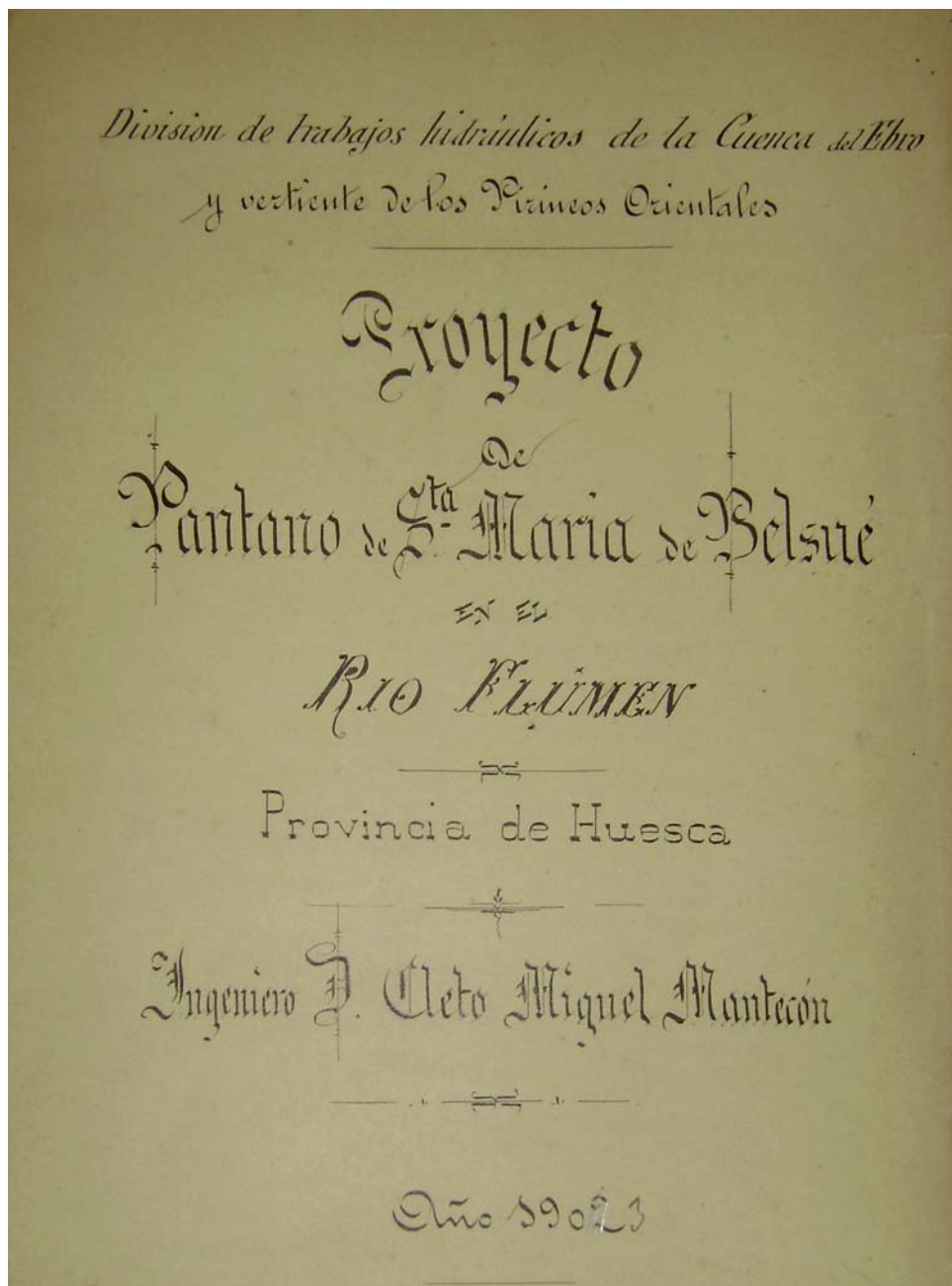


Fig. 1. Portada del borrador del segundo proyecto reformado del embalse de Santa María de Bestué (1903).

desarrollado por este y otros dos ingenieros (fig. 2). Es una presa de gravedad y perfil cóncavo, con un radio de 182 metros, de 43 metros sobre el cauce y una longitud de 111 metros en mampostería con piedra local. Tiene una cabida de 13 hectómetros cúbicos y una superficie de 82,75 hectáreas. La coronación es de 126,61 metros. La cota del cauce está a 853,4 metros s. n. m., y la coronación, a 896,4 metros.

El proyecto original (Ministerio de Cultura, AGA, Obras Públicas, Dirección General de Obras Hidráulicas, caja 25/07785 - 07793, expediente de la Confederación Hidrográfica del Ebro. Pantano de Santa María de Bel-sué en el río Flumen, Huesca, 1902) se limitó solo a la presa, remitiéndose en el tema de canales a un resumen de la memoria que presentó para incluir esta obra en el Plan Gasset. También indica que, a 1700 metros aguas abajo, hay un manantial con un caudal cercano a los 200 litros por segundo. Cifra el volumen anual de lluvia en la cuenca superior en 89 hectómetros cúbicos. Sin embargo, señala que el aforo de 1891, el de menor caudal, fue de 113,5 hectómetros cúbicos y en anejos hay datos de otros años que llegan a 233, pero medidos aguas abajo, a la altura de la carretera de Barbastro. Estima en 46 hectómetros cúbicos las necesidades anuales de riego. Con un volumen máximo embalsable de 12,560 hectómetros cúbicos, señala que el embalse podrá vaciarse para su limpieza en otoño, que se rellenará en invierno y que sobrarán aguas para los regadíos antiguos, almacenables en los embalses de Salto de Roldán y en los del Escalerón, además de abastecer adecuadamente a los nuevos.

Como materiales de construcción, destacaba la presencia de roca en la zona. Aguas abajo de la presa estaba la primera cantera, a la que se accedía con una vía por el fondo del cauce. El autor se decanta por el uso de cal de Zumaya. Cita el uso de cemento “natural” de Tardienta, donde Joaquín Montestruc Rubio, además de médico, era fabricante de yesos y cementos (Díaz, 2020). Pero señala que sería mejor utilizar los artificiales, que debían, a ser posible, “fabricar cerca de la obra”. La arena se obtendría por molinenda de roca caliza local.

Según la memoria, de la obra de la presa, que contaba con tres galerías de limpia, salían dos tubos de 0,9 metros de diámetro para riego, con sus correspondientes compuertas. El aliviadero, excavado en la primera fase en la orilla izquierda, se proyectó para 189,36 metros cúbicos por segundo, lo que,



Fig. 2. Cara exterior del pantano de Santa María de Belsué.
El cuerpo central aparece como diferente al resto. Mayo de 2025.

sumado a las galerías de la presa y los dos tubos de riego, daría un caudal de 285,40 metros cúbicos por segundo, “doble de la máxima avenida observada”. Calcula que, a embalse lleno, este se podía vaciar en treinta y nueve horas. Se proyectó también una ataguía para proteger los trabajos.

La *Gaceta de Madrid* de 31 de octubre de 1903 publica un real decreto por el que este embalse, con los de Cueva Foradada y Buseo, debían ejecutarse por administración. Ese mismo año, en noviembre, con las montañas nevadas, Rafael Gasset, entonces ministro de Agricultura, estuvo en la ciudad de Huesca. En ese momento la obra estaba nevada. *El Diario de Huesca* del 4 de mayo del año siguiente informa de que en la Diputación Provincial “se aprueban los gastos causados con motivo de la visita del Rey a la provincia y del Ministro de Agricultura Sr. Gasset para inaugurar las obras del Pantano de Santa María de Belsué”.

Aguas abajo de los manantiales de Cienfuens se construyó una central eléctrica para proporcionar energía a las obras. Hoy está abandonada.

El proyecto se complicó y los precios subieron. En el AGA se encuentra el proyecto para 1902, por 1 455 468,63 pesetas, y un reformado del mismo año, por 1 839 839,81. En 1903 hubo un segundo reformado por 1 963 389,07 pesetas. En 1907, un nuevo reformado de 2 396 462,83 pesetas. En *El Diario de Huesca* del 11 de mayo de 1908 se puede leer:

Publica la *Gaceta de Madrid* el real decreto, de que dimos cuenta en uno de nuestros anteriores números, de aprobación del proyecto reformado y definitivo de las obras del Pantano de Santa María de Belsué, redactado por su competentísimo muy celoso ingeniero-director, D. C. Miguel Mantecón. He aquí el texto de esa importante resolución: “Ministerio de Fomento.—De acuerdo con el Consejo de ministros, a propuesta del de Fomento, vengo en decretar lo siguiente: Artículo único. Se aprueba el proyecto reformado de las obras del Pantano de Santa María de Belsué, redactado por el ingeniero-director de las mismas con fecha 30 de diciembre de 1907, por su presupuesto total de administración de 2 155 559,42 pesetas, que origina un adicional de 353 972,79 pesetas al aprobado en 30 de octubre de 1903, debiendo cumplirse en la ejecución de las obras las prescripciones propuestas por el Servicio Central hidráulico en su informe de 27 de Marzo último. Dado en Palacio a ocho de Mayo de mil novecientos ocho.—Alfonso.— El ministro de Fomento, Augusto González Besada”.

Trabajando solo en el periodo sin hielos, se consideraba que la obra se terminaría en cuatro años. Pero ya se habían avanzado pasos. La carretera se acabó en 1906. Ya estaba también hecho el túnel de desviación del río. La Junta de Obras, con sede en calle de los Argensolas, 7, de Huesca, sacó concurso para comprar una amasadora mecánica y el transporte de 4000 toneladas de cemento y cal desde la ciudad a los almacenes del pantano. En la *Gaceta de Madrid* de 20 de junio de 1907 se adjudicó el concurso de suministro y montaje del material hidráulico y eléctrico necesario para las obras del pantano de Santa María de Belsué a la proposición presentada por Boetticher y Navarro, por un importe de 24 946,25 pesetas. En 1908 Fomento asignó 184 313,69 pesetas al pantano de Santa María de Belsué. En ese mismo año llegaban a Huesca Rodolfo Gilabert, jefe del Servicio Central Hidráulico del Ministerio de Fomento, y Alejandro Mendizábal, jefe de la División Hidrológica de la Cuenca del Ebro, y con Mantecón giraron visita a Santa María de Belsué para acordar la fundación de la presa

(*El Diario de Huesca*, 8 de junio). La elevación de esta comienza en 1909. En ese año se adjudica a la Sociedad Cementos Portland de Pamplona el aporte de 4000 toneladas de cemento en el almacén de Huesca, al precio de 68,50 pesetas por tonelada. En el transporte al pantano hubo problemas al solicitar los transportistas en carro precios mayores a lo que considera razonable el ingeniero. Según *El Diario de Huesca* del 22 de septiembre de 1909, la primera piedra de los cimientos se puso a las 4 de la tarde del día 20 en presencia de Manuel Camo, Domingo del Cacho, Lorenzo Rufas, Cleto Miguel Mantecón y su auxiliar, Manuel del Cacho, el concejal oscense Leandro Pérez, el pagador, Ángel Boned, Antonio Estaún, de Apiés, y Salvador M. Martón, director de *El Diario de Huesca*.

En enero y febrero de 1910 el ingeniero inspector general Alfredo Álvarez Cascos visitó las obras del pantano de Santa María de Belsué. En 1912 Mantecón fue nombrado jefe de Negociado de Puertos en la Dirección General de Obras Públicas, en Madrid.

Primer cambio de ingeniero

El 31 de agosto de 1912 se fechó el acta de entrega a un nuevo ingeniero, Francisco Larrañeta Ilzarbe. El documento especificaba que la obra se encontraba casi ejecutada a excepción de 4000 metros cúbicos.

El nuevo ingeniero desplegó una actividad notable. El 12 de noviembre de 1912 firmó el estudio de la zona regable del pantano. Entre otras cosas, dudaba de los datos previos sobre las aportaciones del río que ofrecía el primitivo proyecto de 1892, firmado por Juan Llanas, ingeniero jefe de la División Hidrológica del Ebro, a partir de datos de 1888 a 1891, en el kilómetro 34,620 del itinerario del río, a la altura de Tierz.

Larrañeta, a partir de una comparativa con las cuencas vecinas del Isuela y del Guatizalema, usando evidentemente a falta de otra, la topografía decimonónica de Saint-Saud, y de la aplicación de diversos coeficientes de escorrentía, indicaba que la lluvia en la cuenca alta del Flumen, con los datos antiguos, correspondería a una cantidad inverosímil de lluvia de 2533 milímetros. Por ello, le parece más realista utilizar los datos de la propia cuenca, probablemente de la casa de la presa, entre 1907 y 1911, que oscilaron entre los 982 y los 1143 milímetros, con los que obtiene una aportación

media del orden de los 21 hectómetros cúbicos por año y procede a realizar aforos sistemáticos. Datos de aforo del Flumen, tomados entre 1913 y 1921 y presentados por su sucesor, ofrecen una aportación media de 25,2 hectómetros cúbicos, con un rango de entre 8,2 y 45,3.

En 1913 Larrañeta ejecutó proyectos de edificios auxiliares, el denominado *Lugaré*, por valor de 19 343 pesetas. En 1914 se realizó el concurso para suministrar en Huesca 2000 toneladas de cal hidráulica y 700 toneladas de cemento Portland. También redacta, por 58 562,56 pesetas, el proyecto de vía desde una nueva cantera en el molino de Santa María de Belsué hasta la presa, indicando que la cantera local se había agotado al haberse ejecutado 20 000 metros cúbicos de obra y quedando otros 31 000 metros cúbicos por realizar. Para esta cantera se construyó una vía de vagones de la que subsisten un gran estribo en el embalse y las zapatas y varios pilares de puentes hacia Santa María de Belsué.

El Diario de Huesca del 22 de octubre de 1914 señala que trabajan 130 obreros y la presa ha llegado a los 14 metros de altura. La cantera se explota en dos frentes de ataque y con sendas grúas Derrick, movidas a brazo, que proporcionan los bloques para la construcción. Se verifica el asiento de materiales en la presa por medio de tres grúas eléctricas procedentes del pantano de La Peña y cedidas por el Estado a la Junta de Obras del pantano de Belsué. La fuerza necesaria se obtiene mediante una central, inaugurada ese año, a base de un motor de gas pobre de 35 caballos de fuerza y procedente de las obras del pantano de Cueva Foradada. A finales de septiembre la presa es visitada por el duque de Solferino. Se señala, por otra parte, que el sindicato no cumple con los compromisos económicos contraídos, algo que se convierte en crónico.

En 1915 se realiza un reformado de compuertas y obras de toma por 207 817,26 pesetas. En 1916 y 1918 se presentan sendas versiones de reformados de las obras que debían ejecutarse a partir del 1 de septiembre de 1912 y la liquidación de las efectuadas: el primero, por 3 738 022,84 pesetas, y el segundo, por 3 752 795,29. Aunque se da por finalizada la presa en 1918, en 1922 se firma un segundo concurso para suministro de compuertas por 54 024,50 pesetas. El mismo año presenta Larrañeta los proyectos de canales para riego: el de la izquierda, por 728 657,05 pesetas; el de la derecha, por 1 672 532,51. En la documentación hay un escrito del sindicato

del embalse, donde se consigna que los futuros regantes han pagado dos tercios del compromiso de auxilios, firmado por Javier Cavero, también vicepresidente de la Asociación de Agricultores del Alto Aragón.

Sin embargo, los problemas de impermeabilidad toman un claro protagonismo y obligan a adoptar medidas de envergadura: el embalse no se llena y aumentan las fugas de agua por debajo del pantano. En 1920 plantea Larrañeta dos líneas de trabajo: investigar e impermeabilizar el vaso o construir un nuevo embalse aguas abajo. Se opta por ambas soluciones. En 1922 firma el proyecto de impermeabilización del vaso del pantano por 823 162,65 pesetas.

Segundo cambio de ingeniero

Hacia 1922 Federico Jiménez del Yerro, reingresado en el servicio público tras dirigir obras en la central de Seira, se hace cargo de las obras. De esta época, fechado en 1924, es un catastro de los diversos sindicatos de riego, que guarda el Sindicato de la Ribera del Flumen, firmado por Santos Coarasa Nogués. Es una detallada cartografía a escala 1 : 100 cuya portada recoge el nombre de “Sindicato del Pantano de Nuestra Señora de Belsué”.

En marzo de 1926 se crea la Confederación Sindical Hidrográfica del Ebro (CSHE), que recoge diversas obras en curso, entre ellas las de Belsué. Según el primer número de su revista, en las obras de Belsué se gastaban 45 500 pesetas al mes, frente a las 70 000 del embalse de Yesa. En ese mismo año Jiménez del Yerro redacta un proyecto, con una escueta memoria de 5 páginas y cuarto, que describe las actuaciones llevadas a cabo desde 1924, donde se relacionan las zonas de pérdidas, los trabajos ejecutados y dos balances de agua realizados en 1924 y 1925. Divide las futuras obras de impermeabilización, por un total de 150 000 pesetas, en tres etapas: la primera incluye la inyección de grietas, la realización de una galería bajo la presa y la exploración del contacto marga-caliza en la orilla derecha; en la segunda se continuaba con la exploración y la impermeabilización, y en la tercera se terminaban estas tareas y se ejecutaba una pantalla en los cimientos de la presa. También plantea construir una galería bajo la presa.

Según la revista número 3 de la CSHE, en agosto de 1927 estaban pendientes de aplicación 559 318,51 pesetas para atenciones de la Junta de Obras

del pantano. En septiembre eran 629 318,51 pesetas; en noviembre fueron 709 318,51. Para 1928 se proponía invertir en Belsué un presupuesto de 2 151 250 pesetas, más otras 92 250 en el Escalerón.

En 1931 Jiménez del Yerro publicaba un artículo en la *Revista de Obras Públicas*, que reproduce en el número 48 del *Boletín de la CSHE* sobre los pantanos de Belsué, Arguis y Las Navas. Sobre el primero, señalaba que se había dado por finalizado en 1918 y que al intentarse el llenado se descubrieron las pérdidas, que se procuraron eliminar mediante inyecciones de cemento.

En ese momento, hacia 1930, tendría lugar el último intento de llenado del embalse. De esta época pudieran ser las fotos de Ildefonso San Agustín, hoy en la fototeca de la Diputación Provincial de Huesca, que se pueden consultar en DARA.

El embalse de Cienfuens

Para minimizar las fugas desde el embalse superior, se propuso la construcción de una presa aguas abajo del manantial de Cienfuens. La obra se plantea a partir de una primera presa de 10 metros de altura, que sería recrecida en función del éxito obtenido (fig. 3). El proyecto, firmado en 1925 por Jiménez del Yerro, tenía un presupuesto de 79 436 pesetas. El proyecto de recrecimiento, del mismo autor, en 1927, elevaba el coste a 983 864,71 pesetas. Efectivamente, se comprobó que disminuía las pérdidas del embalse superior, aunque se detectaron fugas aguas abajo de la nueva, que se intentaron restañar (Jiménez del Yerro, 1931). La presa se construyó en hormigón, con perfil triangular, y el volumen embalsado era de 1 hectómetro cúbico. Se dio por finalizada en 1931. Tampoco se la llegó a dotar de un aliviadero convencional, pero dispone de una salida por la coronación de la orilla izquierda. Previamente, se realizó el actual camino de acceso entre ambos embalses, que sustituyó al inferior, que también llevaba hacia Huesca, inundado al realizar Cienfuens. Es muy probable que este fuera el proyectado en 1925, por un valor de 48 005,59 pesetas.

El final de las obras

Es difícil saber cuándo se decide cesar los trabajos en la obra. En la relación de preferencia de obras hidráulicas en construcción que aparecen en



Fig. 3. Presa de Cienfuens. Se observan las dos fases, la inferior en mampostería y la superior en hormigón. Vaciado desde hace varios años, el vaso ha sido ya colonizado por la vegetación. Mayo de 2025.

un documento de la entonces Mancomunidad Hidrográfica del Ebro, firmado por Félix de los Ríos, nuevo ingeniero director, se dice que “La obra está ya terminada y en explotación, pero requiere obras complementarias destinadas a impermeabilizar el vaso, las cuales se están llevando a cabo con resultado satisfactorio” (AHPHu, BOLEA/00055_0002/0005). El mismo informe señala que para Belsué se ha pagado cemento por valor de 248 022,30 pesetas. Hoy ambas presas figuran en CHE (1976).

Por otro lado, en la memoria popular hay diversas historias sobre la desesperación ante la imposibilidad de cerrar las fugas de agua: se menciona desde una técnica rústica para sellar grietas por hinchazón de garbanzos sobre los que luego cementar, hasta el arrojado de sacos de cemento, arpillera incluida, por las grietas.

La constatación de la poca utilidad de las obras, solo para los regadíos ya existentes, permeó lentamente en la sociedad altoaragonesa, especialmente en la oscense, y debió de causar tensiones y evidente malestar. *El Diario de Huesca* del 18 de agosto de 1932 señaló un incidente entre periodistas y un funcionario de la CHE.

El embalse de Montearagón

Como señala el citado Balaguer (1958), tras el fracaso de los embalses en la zona superior se volvió a considerar la idea de almacenar agua en Salto de Roldán. El Ayuntamiento de Huesca solicitó en 1951 un estudio geológico que se decantó hacia un embalse en el cañón inferior. Esta es la historia del embalse de Montearagón. Los testigos de los sondeos de una primera iniciativa estaban en el molino de Loporzano. Aún es pronto para describir la historia de este embalse, construido entre 1995 y 2006, con una reforma en 2013.



Fig. 4. Azud del Flumen en el Escalerón (Barbués). Mayo de 2025.

El embalse del Escalerón

Como se ve en el apartado de riegos, una de las obras menores relacionadas con la construcción del embalse de Belsué era la del Escalerón, que se planteaba en derivación del Flumen, en las cercanías del molino de Barbués, aparentemente con toma en el azud de la acequia de Malpartir. Según la memoria local, no se hizo, aunque el azud, inicialmente de sillares de arenisca locales, se revistió de hormigón (fig. 4). Cabe recordar que en algún documento se hablaba de *pantanos del Escalerón*, en plural. *El Diario de Huesca* del 14 de enero de 1932 indica que solo hay un anteproyecto de Mantecón de 1900 y que se acaba de redactar el proyecto de la presa de Barbués. A finales de ese año (*El Diario de Huesca*, 8 de noviembre) se da por descartado el embalse al quedar la zona englobada en los Riegos del Alto Aragón (RAA).

EXPROPIACIONES, CARRETERA Y OBRAS AUXILIARES

Expropiaciones

Uno de los temas siempre conflictivos son las expropiaciones. En 1902 se preveía una expropiación a razón de 2 céntimos de peseta por metro cuadrado. Se expropiaron 30 hectáreas de monte bajo a 15 pesetas, 6 hectáreas de secano de primera a 1000 y 2 hectáreas de regadío a 2000, más 2000 extra por daños y perjuicios. Lucien Briet en 1907 señala que “se acordó una indemnización de 60 000 pesetas por cada uno de los vecinos afectados” (Briet, 1990). Según alguna de las memorias, la cantidad señalada es la total. En 1909 *El Diario de Huesca* aún mencionaba que todavía había expropiaciones por pagar.

El aliviadero

Excavado durante la primera fase, no se hormigonó, salvo un zócalo (fig. 5). Rara vez ha corrido el agua por él. Su ladera izquierda muestra abundantes fracturas. Sin embargo, las pérdidas más evidentes están en la orilla opuesta.

La carretera y otros accesos

Una de las primeras actuaciones fue la construcción de un camino de acceso para transportar materiales hasta el lugar de las obras. El punto



Fig. 5. Aliviadero del embalse de Santa María de Belsué. Mayo de 2025.

carretero más cercano era la localidad de Nueno, donde finalizaba en esta época la carretera a Arguis. La distancia hasta el lugar de la presa era considerable, por lo que se valoraba incluso la posibilidad de construir un cable aéreo. El proyecto, de 1906, valoraba dos soluciones, por 103 643,45 y 110 402,49 pesetas respectivamente. Mantecón se decantó por la construcción de la actual carretera por Sabayés, Santa Eulalia la Menor, collado de Salto de Roldán, fuente de San Mamés y Paco As Lianas. Según *El Diario de Huesca* del 14 de marzo de 1906, el presupuesto era de 64 321,15 pesetas. Esta carretera también podía servir para la construcción de la presa de Salto de Roldán. Lucien Briet indica que 486 jornaleros hicieron la actual carretera, de 22 kilómetros de longitud y 4,5 metros de anchura, en 22 días. Al final, el precio de la obra fue de 133 253,70 pesetas y se precisaba que serían necesarios entre 4 y 8 peones camineros para su mantenimiento. La carretera se inauguró el 22 de mayo de 1906, con la asistencia de Wenceslao Retana, gobernador civil; Julio Sopena y Ricardo Lapetra, presidente y vicepresidente de la Diputación

Provincial de Huesca; los diputados provinciales Manuel Batalla, Antonio Pérez Solana y Agustín Viñuales; Gaspar Mairal, alcalde de Huesca, y Leopoldo Navarro, teniente de alcalde; Cleto Miguel Mantecón; Domingo del Cacho, presidente de la Junta de Obras, y el pagador, Ángel Boned. La carretera al embalse llega hoy hasta las cercanías del actual refugio del club Peña Guara, en su época parte de las edificaciones auxiliares de las obras. Briet dice que la carretera del pantano hubiera podido prolongarse hasta Mesón Nuevo. Pero añade “Solo Dios sabe”, en referencia a cuándo se llevaría a cabo otra por Barluenga a Nocito y el Guarga. Las vicisitudes de esta última están relatadas en Monesma (2022).

Uno de los temas polémicos, como ya se ha señalado, fue el coste del transporte de diverso material desde Huesca, donde se encontraba la estación de ferrocarril más cercana. Se estimaba en algún momento en 7000 toneladas, sobre todo de cemento, lo que había de transportarse, y se dudaba



Fig. 6. Traza del plano inclinado construido por el ingeniero Cleto Mantecón. La casa de administración estaba junto al árbol de la zona superior.

entre carros o automóviles. En 1909 el Ministerio de Fomento adjudicó a Julio Peña Martí la adquisición de dos camiones de vapor para el arrastre de materiales al pantano de Belsué.

Desde la casa de administración, un plano inclinado, cuya traza es aún visible (fig. 6), llevaba el material al cauce del río, aguas arriba de la presa, donde estaba ubicada la zona de trabajos.

Además de la carretera, hay varios caminos en el entorno del embalse, entre ellos uno con diversos túneles entre Belsué y Cienfuens. En 1925 Jiménez del Yerro firmó el proyecto de caminos, para sustituir los ocupados por el embalse, por 48 005,59 pesetas.

La central eléctrica de Cienfuens

Aguas abajo de la presa de Cienfuens se encuentra una central eléctrica construida por Cleto Miguel Mantecón para dar energía a las obras. Está vandalizada. Fue autorizada y proyectada en 1906. Se presupuestó en 34 057 147 pesetas. El suministro y el montaje del material hidráulico y eléctrico necesario ascendió a 26 148,00 pesetas. Hoy está inutilizada. El caudal del río condicionaba el funcionamiento de la central. Así, en agosto de 1918 no funcionaba por estiaje. Se hizo necesaria la adquisición de un generador térmico.

La casa de administración y el poblado obrero

En el primer proyecto solo se hablaba de casa para oficina y guarda del pantano y oficinas, situadas al final de la carretera. La casa de administración contaba con dos pisos: el inferior, con tres habitaciones para el guarda; el superior, con cinco para el sobrestante de las obras. Está hoy derruida, así como otros edificios, laboratorios y oficinas, salvo el actual refugio de Peña Guara. En la primera fase los trabajadores no disponían de viviendas adecuadas y se encuentran diversos refugios rústicos, meros vivacs, en algunas cavidades cercanas. Posteriormente, siguiendo el ejemplo de las obras en La Peña y luego en RAA, se construyeron viviendas obreras en el *Lugaré*, entre ambas presas. Es de reseñar que la obra tuvo problemas para conseguir trabajadores, especialmente durante la Primera Guerra Mundial, en que se insertaron repetidos anuncios en la prensa local solicitando peones, canteros y carpinteros. La cooperativa estaba situada en el camino de la presa, junto al plano inclinado.



Fig. 7. Puente para vagonetas desde la cantera en Santa María de Belsué. Febrero de 2012.

Las canteras

Aunque el primer proyecto señalaba una cantera cerca de la confluencia de cauces en la cola del vaso proyectado, al principio se usó la situada aguas abajo de la presa grande. Posteriormente, se utilizó la primera, desde la localidad de Santa María de Belsué, mediante varios puentes. La figura 7 presenta los restos de uno de ellos sobre el vaso del embalse.

LOS PROBLEMAS: EL KARST

Como ya se ha señalado, el gran problema de la obra del embalse de Belsué es la falta de impermeabilidad del vaso. Ya durante las obras surgieron voces locales que planteaban dudas. Almudévar (2005) menciona al pelirrojo pastor Mairal, de Bentué de Nocito, usuario estentóreo del término

tresminar. Si la información es correcta, Mantecón contestó “que nunca había visto ingeniero con abarcas”.

El mismo Mantecón hizo varios sondeos de unos 7 metros de profundidad y, a partir de sus observaciones en la excavación del aliviadero, estimó que no habría problemas. Refleja en las memorias la posible existencia de algún problema de filtraciones que descarta por la impermeabilidad de las margas del vaso y con el ejemplo de la impermeabilidad de la cerrada de Arguis, y añade que, en Belsué, la certeza absoluta sobre este aspecto se confirmará cuando la presa alcance unos 10 metros de altura.

Los problemas, derivados de la fuerte karstificación de las calizas, se fueron manifestando durante las primeras fases de llenado de la presa y hacia 1920 comienza a notarse una clara preocupación en la prensa, como en *El Diario de Huesca* del 9 de junio.

Cavidades en la zona

El karst local era ya conocido en ese momento. La cavidad más visible, la cueva del Toro, había sido visitada el 5 de agosto de 1648 por el erudito oscense Vincencio Juan de Lastanosa, acompañado por el presbítero Lorenzo Aguasca. Lastanosa describió la visita y envió criados a cortar varias estalagmitas grandes para su jardín. Unos meses más tarde, el 23 de octubre, el rector de la iglesia de Santa María de Belsué informaba de que había entrado acompañado de gentes armadas. Además de encontrar monedas y vasijas, uno de sus guías le informó de que había entrado hacía cuarenta años y entonces había montones de huesos humanos (Cuchí y cols., 2012b, 2012c). De esta época es la leyenda de que Poncio Pilato, alumno y profesor en tiempos de Quinto Sertorio, habitó en la cueva. Lucien Briet dice que está inexplorada. Durante las obras de los embalses, los obreros de un contratista jacetano, según alguna noticia, excavaron en ella en busca de un buey de oro. Hacia 1960 el Grupo de Investigaciones Espeleológicas de Peña Guara (GIEPG) encontró cerámica *sigillata* en su acceso y algunas monedas romanas en su interior.

La karstificación es también muy clara e importante en el resto de la orilla derecha. El Paco As Lianas presenta un denso lapiaz estructural señalado por Rodríguez (1986). La zona se conoce localmente como *grimas*

de Lobartas. En esta, junto a la carretera de acceso, se abre la cavidad Esteban Felipe, por el nombre de su descubridor, practicante sanitario en las obras, quien, al desaparecer un conejo por una grieta, la amplió mediante un cartucho de dinamita. La cavidad tiene más de 2 kilómetros de longitud (Borràs y Quiroga, 2020; Cuchí, 2020). La cueva de la Artica, de menores dimensiones, se descubrió en la escalera de la presa superior a la casa de administración hacia 1970. Su topografía está en Cuchí y cols. (2012a). Todas estas cavidades son fósiles y están por encima del nivel del embalse, aunque hay una zona activa, en uno de los sumideros bajos de un sifón paralelo a la grieta del Huevo en Esteban Felipe. En la orilla derecha, a pesar de las fracturas observables en el inacabado aliviadero, solo se observan algunas bocas, en su mayoría hoy ciegas. En su momento, bajo el agua del pantano de Cienfuens el GIEPG exploró una pequeña cavidad, denominada *Adelfos*, en la orilla izquierda del río (GIEPG, 1972). En el propio vaso del embalse superior hay varias dolinas, de las que se habla más adelante.

Evidentemente, el tema relevante en la permeabilidad del terreno es la zona activa del karst, por donde de forma natural o inducida fluye el agua subterránea. La zona de descarga más importante, conocida de antiguo, tiene la denominación explícita de *Cienfuens* y está situada por debajo del pantano superior. La presencia de tobas en el cauce da nombre al farallón cercano, visible desde la localidad de Huesca a través de Salto de Roldán. Para algún documento técnico es aquí donde nacería realmente el Flumen. Hay una estación de aforo aguas abajo del embalse de Cienfuens y otras dos estructuras, posiblemente también para aforar, aguas arriba de esta presa, en relación con una gran surgencia. En el entorno de la presa inferior hay otros manantiales. Alguno de los más importantes, por cota topográfica e hidroquímica, no tiene relación con las aguas embalsadas (Buera y cols., 1997).

El manantial de Cienfuens

Situado en la orilla derecha del cauce del Flumen (fig. 8), Mantecón y Briet citan para él un caudal de 150-200 litros por segundo antes del comienzo de las filtraciones masivas. Pudiera ser el desagüe subterráneo del Paco As Lianas e incluso del calizo flanco este del anticlinal del Águila, del que no se conocen surgencias. Fue reconocido por los proyectistas originales, que pudieron pensar que tendría un comportamiento independiente del vaso,



Fig. 8. Manantial de Cienfuens. Mayo de 2025.

como sucede en el embalse de Arguis con la cavidad de Sanclemente (Gimeno y Cuchí, 1996). Pero, en la práctica, actúa como zona de descarga de las pérdidas del vaso superior. En los documentos del embalse hay datos de aforos dos veces al día de esta surgencia y de todas las entradas al embalse. Hay un perfil de aforo aguas arriba de la surgencia y una estructura con apariencia de presa provisional justo aguas abajo.

Las zonas de pérdida en el vaso superior y las medidas correctoras

En el vaso superior, en aguas bajas, se observan varias depresiones en el sedimento del fondo, solo accesibles en algunos momentos. La mayoría están situadas en la ladera derecha, cerca del plano inclinado (fig. 9).

En el fondo del vaso se observan varias depresiones, en alguna de las cuales se perdían las aguas de estiajes. En la orilla derecha se señalan dos zonas de cierta importancia, que denominan en los informes grietas de las



Fig. 9. Depresiones, simas y sumidero en la orilla derecha del embalse de Belsué. Diciembre de 2012.



Fig. 10. Sumidero del molino. Enero de 2012.



Fig. 11. Sumideros en la orilla derecha del vaso. Enero de 2012.

amasadoras y del *molino* (fig. 10). La primera está al pie del plano inclinado, normalmente bajo las aguas. En la actualidad está muy colmatada por lodos y maderas. La segunda, más al norte, es más fácilmente visitable. En aguas bajas el cauce fluvial se desvía hacia la orilla derecha y se pierde por un sumidero. Hay otras simas en las cercanías (fig. 11).

Por encima de las dolinas, en la ladera de caliza, se observan numerosas diaclasas y fallas. Algunas de ellas han sido rellenadas manualmente con cemento, como describe el proyecto de impermeabilización. También hay grietas naturales ampliadas de forma artificial. En ellas todavía se puede observar alguna tubería de inyección. Grietas y tareas disminuyen hacia el barranco de Belsué y también conforme se asciende en altura.

Es posible que los primeros problemas ya se le presentaran a Mantecón, dado que Jiménez del Yerro habla de cavernas macizadas durante la construcción. Larrañeta propuso hacia 1920 las primeras soluciones, entre ellas la construcción del embalse de Cienfuens a modo de sello hidráulico dentro de un proyecto con un presupuesto de 823 162,65 pesetas. Pero la mayor parte de esta tarea corresponde a Jiménez del Yerro. En 1925 la Junta de Obras del pantano vio obras en Cienfuens por 79 436 pesetas. En 1926 este ingeniero presentó una memoria sobre el problema más un proyecto de las obras de impermeabilización presupuestado por etapas: primera etapa, 49 547,40 pesetas; segunda etapa, 49 945,87, y tercera etapa, 49 723,80.

En la memoria de Jiménez del Yerro se señala que las pérdidas se observaron entre febrero y octubre de 1924, al subir el nivel del agua de las cotas 862 a 864 de 6 a 8 metros por encima de la cimentación. En 1925, tras excavar rellenos, se descubrió una desgarradura de 40 metros de largo en la caliza de la orilla derecha en la que se inyectó cemento. También se reinyectó cemento en otras grietas, alguna ya trabajada con anterioridad, y se rejuntó la ladera. Para el llenado del año siguiente se observó una pérdida menor con un interesante proceso de histéresis entre llenado y vaciado. Propuso el ingeniero un programa de exploraciones por excavación, inyecciones de cemento y una pantalla bajo los cimientos. Señala que con esto se “llegará al límite de la mejora ya que por la escasez de aportaciones durante el estiaje siempre se resentirán los embalses de este vicio de origen imposible de remediar”. Una nota tras una fotografía del embalse parcialmente lleno

señala que el 31 de diciembre de 1927 se alcanzó una altura de 29,18 metros (máxima hasta la fecha) sobre los 40 metros de la presa.

LOS CANALES (NO CONSTRUIDOS) DEL EMBALSE DE BELSUÉ

El objetivo del embalse era mejorar los regadíos existentes y ampliar su superficie. La cuantificación de los derechos consolidados, tanto en riegos como en actividades industriales, resultaba fundamental, aún más conociendo las polémicas entre sistemas de riegos y de estos con los industriales. El catastro de regadíos ya existentes ascendía a 4010,5883 hectáreas, de las cuales 10,7260 hectáreas eran de Loporzano; 283,26987, de Quicena; 682,4789, de Huesca; 393,7338, de Tierz; 341,4225, de Ballobar y Monflorite; 458,9218, de Los Molinos y Lascasas; 164,1700, de Sangarrén; 187,6980, de Barbués; 285,9650, de Torres de Barbués; 472,9770, de Almuniente, y 729,2255, de Grañén. Las actividades industriales, la mayoría de uso no consuntivo, eran la fábrica de papel de la viuda de Cacho, el molino harinero del Batán, las fábricas de harinas de la Santeta, viuda de Casayús, Juan Gómez y Luna, la fábrica de papel baja de González, el molino bajo de Pedro Labata, la fábrica de harinas de la Granja, el molino de Lascasas, la fábrica de harinas de Sangarrén y los molinos harineros de Barbués, Torres de Barbués y Almuniente. A lo existente se sumaría la nueva superficie regable.

Hubo varias propuestas de canales derivados de este embalse. El proyecto inicial se ha reseñado al hablar del de Salto de Roldán, con dos acequias por cada orilla del orden de unos 30 kilómetros cada una. El segundo proyecto sería el que realizó Cleto Miguel Mantecón en el trabajo de Saturnino Bellido. En una de las memorias iniciales del embalse se cifran en 19000 hectáreas entre ambas orillas, de las que 15000 corresponden al canal de la derecha. Los módulos de riego eran bajos y se señalan barbechos de año y vez en regadío.

En 1910 Mantecón redactó un proyecto de ampliación del aprovechamiento hidráulico del pantano para la División Hidrológica del Ebro y la Junta de Obras del mismo, con un presupuesto de 18 040,37 pesetas. Apparentemente, el canal saldría al pie de las sierras, de manera similar a como lo hace la acequia madre de Arguis. Sin embargo, habría que tener en cuenta

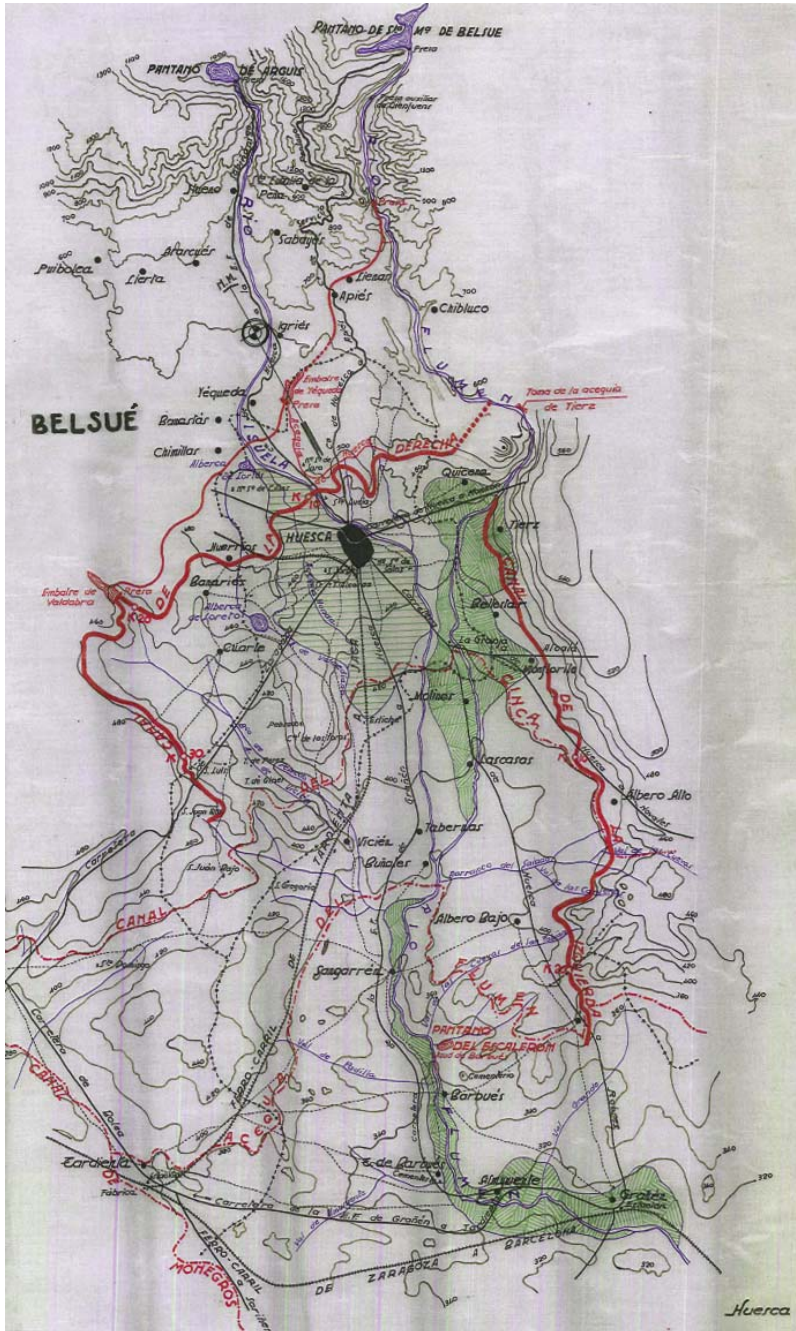


Fig. 12. Plano de canales de la presa del Flumen.

la topografía, especialmente el encajamiento del Flumen y la inestabilidad de las laderas de su cañón aguas abajo de Salto de Roldán.

Larrañeta en 1912 hizo un nuevo proyecto en el que señalaba las dos acequias, izquierda y derecha (fig. 12). La de la derecha saldría desde Montearagón en túnel hasta las cercanías de la ermita de Santo Domingo, en Almudévar, hoy sede de un gran embalse por elevación del canal de Monegros. La de la izquierda, saliendo a la altura de Tierz, pasaría entre Albero Alto y Albero Bajo hasta Callén, donde se proyectó el embalse del Escalerón. Recortaba ligeramente la superficie regable de 11 500 a 10 000 hectáreas, a partir de un minucioso cálculo donde comparaba con datos de Arguis, RAA y el canal de Aragón y Cataluña. Establecía una dotación de agua de 2000 metros cúbicos por hectárea para cereal y leguminosas de invierno, 1200 para viñas y olivos y 4000 para forrajes y cereales de verano. Se sugería una variante por la orilla derecha, saliendo de Salto de Roldán, con un embalse en Yéqueda, idea que dio lugar a otro proyecto de pantano denominado *Manjarrés*, algunas de cuyas más tardanas vicisitudes se describen en Cuchí y Garcés (2008). Hay que indicar que ya estaba en tramitación el proyecto de RAA, donde se suponía, en una primera redacción, que el canal del Cinca llegaba hasta el embalse de La Sotonera (fig. 13), pero luego desviado al abrazo de Tardienta, de modo que una parte de la zona regable por Belsué lo sería dentro de RAA. De cualquier manera, la dotación era escasa. Asociable a esa inquietud es una rotunda nota del ingeniero Larrañeta, en *El Diario de Huesca* del 12 de febrero de 1920, negando que fueran a detraer las aguas del trasvase de Bonés hacia el embalse de Belsué.

Evidentemente, este cambio de trazado fue objeto de polémicas y *El Diario de Huesca* del 19 de diciembre de 1918 recogía una gran discusión entre los señores Susín y Pablo Chapullé en el Pleno del Ayuntamiento de Huesca sobre la variación del trazado. A la vista de la virulencia, el Ayuntamiento no se pronunció. Pero, fuera cual fuera el trazado, y como era de esperar, la construcción de los canales, especialmente el de la derecha, interesaba mucho al Ayuntamiento de Huesca. Durante la II República el tema se reavivó, especialmente por parte de Jorge Cajal Lasala, quien firmó numerosas cartas a la prensa insistiendo en su construcción (*El Diario de Huesca*, 21 de agosto de 1931; 12 de enero, 21 de mayo y 5 de junio de 1932;

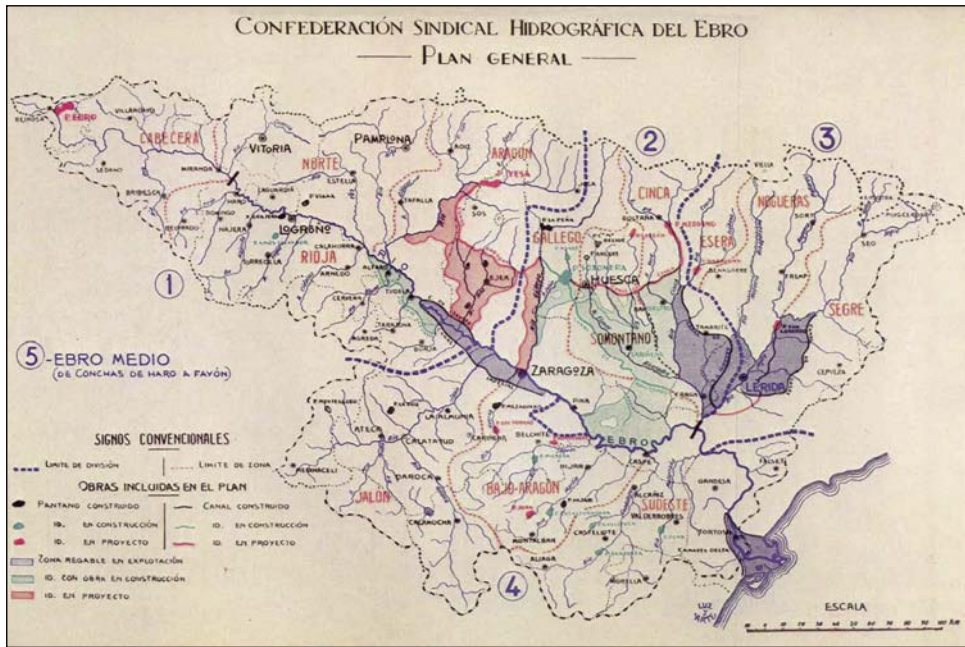


Fig. 13. Detalle de mapa de la Confederación Sindical Hidrográfica del Ebro (entre 1926 y 1931). El canal del Cinca pasaba junto a Huesca y desembocaba en el embalse de La Sotonera.

7 de diciembre de 1935; 7 de julio de 1936...). Mariano Carderera y Jorge Cajal también entraron en conflicto periodístico con Manuel Marraco, ministro de Obras Públicas, entre otras obras por las de Belsué (*El Diario de Huesca*, 28 de octubre de 1932). En ese año Manuel Sender, alcalde de Huesca, Agustín Delplán, primer teniente de alcalde, y el concejal Clemente Asún se desplazaron a Zaragoza para solicitar a Félix de los Ríos el inmediato comienzo de las obras del canal de la derecha del Flumen. Este les prometió una inmediata redacción de proyecto y una rápida aprobación por su baja cuantía (*Boletín de la Mancomunidad Hidrográfica del Ebro*, 59). Sin embargo, en el presupuesto del organismo para 1933 solo figuraban 50 000 pesetas para el pantano de Belsué, muy por debajo de los de Vadiello y Senegüé (200 000 y 500 000 pesetas, respectivamente) y de Yesa (2 500 000 pesetas), obra favorita del entonces ingeniero director. En ese año, en la recepción del segundo tramo del canal del Flumen (RAA), De los Ríos señaló que el proyecto presentado del canal de la derecha del

Flumen (de Belsué) era muy elevado y que había encargado al ingeniero que estudiase una modificación. En el mismo año Jiménez del Yerro ya admitía que no se conseguiría la impermeabilización, y sugería una modificación en la zona regable. Informaba de que esto podría suponer la devolución de las cantidades pagadas por los regantes expectantes, entre los que no figuraban los de Tierz, e indicaba varias soluciones.

El documento de zona regable existente en el Sindicato de Riegos de Arguis sería probablemente la última versión. La pregunta es si hubo un modificado acorde con las palabras de Félix de los Ríos al inicio de la década de los treinta. Un interesante documento de 25 de marzo de 1932 firmado por Jiménez del Yerro va acompañado de una nota de Félix de los Ríos. En este informe se vuelve a insistir en la presa de Salto de Roldán para la toma del canal de la derecha. Acompaña un plano similar al de la figura 12.

Evidentemente, que se dieran por acabados los embalses de la zona alta y no se hubieran hecho los canales tuvo que crear tensiones, sobre todo en la década convulsa de 1930. Años más tarde, Balaguer (1958) recordaba que los propietarios habían pagado sin recibir nada.

INGENIEROS Y PERSONAL, SINDICATO DEL PANTANO Y COMUNIDAD DE REGANTES

Los ingenieros

Varios fueron los ingenieros de Caminos que participaron en la larga obra de los pantanos de Belsué:

Cleto Miguel Mantecón Arroyo. Nacido en Almazán en 1866 y fallecido en la misma localidad en 1949. Cursó la enseñanza media en Zaragoza. Pasó a la Escuela de Caminos de Madrid, promoción de 1890. En 1891 fue destinado a la Jefatura de Obras Públicas de Ávila y en 1894 a la de Soria, en la que se encargó del estudio de la carretera de El Burgo de Osma a San Leonardo. En 1898 pasó a Zaragoza y en 1900 a la División Hidrológica del Ebro, donde colaboró en la redacción del Plan de Canales y Pantanos de 1902. A principios del siglo xx, permuta su plaza en Huesca por la de Zaragoza, que ostentaba Manuel Abascal Pérez.



Fig. 14. Cleto Miguel Mantecón fotografiado por Lucien Briet el 23 de septiembre de 1907 en la cantera del cauce del Flumen, aguas debajo de la presa. Posiblemente, la figura acompañante sea Joaquín Buisán, guía de Briet en ese año. Al fondo, la rampa del Escalar, parte del camino antiguo. (Château Fort – Musée Pyrénéen, Lourdes)

En 1901 fue consejero de Teledinámica del Gállego, constructora en 1906 de la central de Carcavilla, en el Gállego. En 1910, al incorporarse esta sociedad a Eléctricas Reunidas de Zaragoza, formó parte de su consejo, cuya presidencia ocupó entre 1927 y 1936.

Como ingeniero, realizó el anteproyecto del pantano de Vadiello. En 1905 es nombrado ingeniero director de la presa de Belsué, donde fue fotografiado por Briet (fig. 14). Ingeniero jefe de Cuerpo en 1909, fue destinado en 1912 a Madrid, al Negociado de Puertos y luego a Explotación de Ferrocarriles. En 1914 fue responsable de la Jefatura Provincial de Obras Públicas de Zaragoza. Solicitó excedencia para dedicarse a la empresa Vías y Riegos que había fundado con Félix de los Ríos y Mariano Baselga. Esta empresa realizó obras en las presas de Ardisa y de Mediano, así como el ferrocarril de Soria a Castejón de Ebro y el encauzamiento del Urumea en

San Sebastián. Promovió el ferrocarril Gallur – Sádaba. Fue consejero del Banco de Crédito de Zaragoza. En 1928 creó Cementos Portland de Zaragoza, S. A., de la que fue primero vocal del Consejo y luego vicepresidente. Inspector del Cuerpo de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos en 1929, fue consejero inspector general en 1931. Este año solicitó su reingreso, pero se le denegó, hasta pasados cinco años de su cese al frente de Vías y Obras. En 1932 se vio en la Sala Tercera del Tribunal Supremo la vista por su reincorporación a su destino. En 1933 se jubiló como presidente de sección, supernumerario, del Consejo de Obras Públicas, con un haber pasivo de 14 400 pesetas. Su biografía ha sido publicada por Germán (2009).

En 1916 fue miembro fundador de la Academia de Ciencias de Zaragoza. Recibió la Medalla de Oro de esta ciudad por haber urbanizado y pavimentado sus accesos por carretera.

Francisco Larrañeta Ilzarbe. Nacido el 21 de junio de 1879. En 1908 estaba destinado en León, donde inspeccionó la obra del viaducto de Villafranca del Bierzo. En 1912 estaba en las obras de Belsué. Al parecer, había participado en la topografía y en el gabinete en el canal del Cinca. En 1931 prestaba servicio en el canal de Isabel II, en Madrid. Ingeniero jefe de primera clase en 1935. El 29 de julio de 1936 hace entrega de un donativo en nombre del personal de Obras Públicas para socorrer a los heridos y familiares (*ABC*, Madrid, 30 de julio). Consejero inspector en 1942 y presidente de Sección de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos en 1946. En 1947 formaba parte de la Junta de Gobierno de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos por el Consejo de Obras Públicas (*Revista de Obras Públicas*, 2791, de noviembre de 1947). Se jubiló en 1965.

Federico Francisco Isidro Alejandro Jiménez del Yerro. Nacido en Madrid el 4 de octubre de 1874, en 1904 pasó de ingeniero aspirante a ingeniero del Cuerpo de Caminos, Canales y Puertos con categoría de oficial segundo. Tuvo multitud de destinos en Palencia, Burgos y León. Trabajó en las obras del ferrocarril de Andoaín. En agosto de 1912 solicitó la excedencia para dedicarse a la central de Seira para Catalana de Gas y Electricidad. En 1921 volvió a la División Hidrológica del Ebro. Fue destinado como ingeniero director de las obras del pantano de Belsué y otras como las de Arguis, Cortés, Loreto y Las Navas. Pasó a la Confederación Sindical Hidrográfica del

Ebro. Durante su última etapa, en Madrid, donde se jubiló, realizó diversos proyectos de puentes metálicos. Varias fotografías de este ingeniero y de su familia se pueden ver en <<https://seirapowerplant.blogspot.com/>> y en <<https://seira1.rssing.com/chan-6383427/latest.php>>.

Santos Coarasa Nogués. Natural de Huesca (11 de octubre de 1895), era hijo del abogado, muy activo en el Partido Liberal, Santos Coarasa Añaños, quien en 1911 fue portador de cinta del féretro de Manuel Camo (*Diario de Madrid*, 28 de diciembre de 1911) y en 1913 era miembro de la comisión que encargó su estatua, cuyo busto está hoy en el Círculo Oscense (Calvo, 2004). Ganó un premio en la famosa lotería de 1932.

En 1912 Santos Coarasa Nogués aprobó los exámenes de ingreso para ingeniero de Caminos (*Madrid Científico*, 752). Pertenece a la promoción de 1921. En 1923, con sus colegas José Núñez Casquete y Luis Fuentes López, redactó el folleto *Los riegos del Alto Aragón. Plan económico y social para su ejecución en quince años*. En 1924, con Luis Fuentes, publicó una memoria sobre reforma y ampliación del abastecimiento de agua en Huesca (*El Diario de Huesca*, 13 de febrero de 1926). En 1925 leyó una conferencia sobre Lucas Mallada en el Teatro Principal durante los actos en su memoria. En 1926 fue nombrado ingeniero en prácticas (*El Diario de Huesca*, 25 de mayo de 1926; *Madrid Científico*, 1162) y destinado en 1927 a la Confederación Hidrográfica del Ebro. Con Manuel Lorenzo Pardo proyectó la reforma de la presa de Arguis. Al año siguiente ascendió a ingeniero segundo y fue nombrado vicepresidente del Consejo Provincial de Fomento y vocal de la Cámara de Comercio e Industria. En 1929 era el ingeniero encargado en la Confederación Hidrográfica del Ebro. Trabajó en Belsué a las órdenes de Jiménez del Yerro. En 1930 Antonio Uceda y Coarasa pleitearon, en nombre de la S. A. Ferrocarriles y Construcciones A. B. C., con el Ayuntamiento de Huesca. Diseñó el Parque Miguel Servet con Bruno Farina y Antonio Uceda, y la colaboración del arquitecto José Luis de León y el artista Ramón Acín (*El Diario de Huesca*, 28 de abril de 1931). Fue presidente de la Hidroeléctrica de Huesca. Ingeniero primero en 1934, en 1936 fue destinado a la Jefatura de Zaragoza y obsequiado con un banquete en el Círculo Oscense. Fue presidente de Turismo de Aragón y precursor del club Peña Guara en el periodo 1931-1934. Falleció en Zaragoza el 12 de agosto de 1937. En 1944 se propuso su nombre para el futuro

embalse de Vadiello, señalándolo como autor del proyecto (*Nueva España*, 2 de abril de 1944).

Saturnino Bellido Díaz. Nació en Ablitas (Navarra) en 1840. Perteneció a la promoción de ingenieros de Caminos de 1871. Trabajó en Huesca entre 1873 y 1880, donde realizó el canal de abastecimiento de Jaca y varios puentes como el de Puente la Reina. En Tarragona (1881-1889) diseñó los muelles del puerto. Radicado posteriormente en Zaragoza, con licencias por mala salud, participó técnica y económicamente en el desarrollo hidroeléctrico del Gállego y tuvo intereses en el balneario de Panticosa y en Gurrea de Gállego (Germán, 1999). En esta localidad compró una finca de 2000 hectáreas que se labraba mediante arados eléctricos. Murió en Zaragoza en 1920.

José Sans Soler. Por ahora tenemos poca información de la participación directa de este ingeniero, de característica figura, en las obras de Belsué. En 1920 reemplazó al asesinado Alberto Varela Hidalgo de Quintana en el replanteo del ferrocarril de Tánger a Fez. En 1928 era jefe de la Segunda División de la Confederación Hidrográfica del Ebro y director de Obras Públicas en la provincia de Huesca. Aparece en una fotografía conmemorativa, en la puerta del Círculo Oscense, de la visita del subsecretario de Fomento, general Pedro Vives, para inspeccionar las obras de Arguis y Belsué. La imagen fue tomada por Ildefonso San Agustín (Fototeca de la Diputación Provincial de Huesca).

Luis Ferrater y Sarrión. Ingeniero jefe de la División Hidrológica del Ebro. Según *El Diario de Huesca* del 10 de noviembre de 1906, la provincia de Huesca le debe gratitud, “pues encargado el difunto de la inspección del pantano de Santa María de Belsué, supo con la firmeza de su carácter y con su privilegiada inteligencia remover los obstáculos que se presentaron para la realización de las obras, empresa con la cual se hallaba identificado”.

Ayudantes y otro personal

Es evidente que cientos de personas trabajaron en la obra. Manuel Solans fue ayudante de la Dirección Hidrográfica del Ebro en la fijación de la zona de riego de los pantanos de Salto de Roldán y Santa María de Belsué. Gregorio Franco fue ayudante de Mantecón; Eduardo Lafarga, de Larrañeta, y García Miravalles, de Jiménez del Yerro. Antonio de Caso era contratista de

las obras de la carretera en 1906. Vicente Añón Moreno era ingeniero industrial afecto a las obras del pantano en 1910. José Amiral era albañil en 1906. En 1909 sufrieron un accidente grave Miguel Reyes y Pedro Aguiló. El capataz, Julián Loriente, cayó de la presa en 1914, con heridas de consideración. En 1915 se suicidó el cucharero y obrero eventual Pablo Montel, de Aguas. El mismo año, Joaquín Morlans Vinué fue juzgado por robar herramientas del taller de herrería por valor de 34 pesetas. Úrbez Lafita era capataz de la carretera en 1918. En 1929 al encargado de garaje Pedro Callao Ferrer, al chófer José Alvero y al aprendiz Miguel Boráu, del garaje del pantano de Belsué, les cayó el gordo de la lotería de Navidad. En 1928 el capataz José María Jordán, de Murillo de Gállego, cayó desde una roca a una altura de 10 metros, resultando con lesiones de pronóstico reservado. Los Lucán trabajaron como carreteros en las obras. Diego Jiménez Ruiz, guardia civil retirado, fue ordenanza de oficinas en la sede de Huesca.

Mención aparte merece Francisco Javier Cavero Lasús (1895-1957), perito agrícola y presidente del sindicato del pantano durante muchos años. En 1926 Cavero fue elegido síndico de la CHE por los pantanos de Huesca frente a Del Arco, candidato del pantano de Belsué, lo que provocó un pequeño conflicto (*El Diario de Huesca*, 12 de junio). Una mínima parte del artículo fue censurada. Luis Mur Ventura y Ricardo del Arco son suficientemente conocidos en el Alto Aragón.

El Sindicato del Pantano de Santa María de Belsué

Un clásico problema en este tipo de actuaciones fue la integración entre los intereses de los nuevos, expectantes, regantes, secaneros de año y vez, y los derechos adquiridos de los regantes antiguos. En la zona dominada por los riegos de Belsué había sindicatos muy antiguos como el del pantano de Arguis; regantes de *huertas, panes y habas* o *sotos*; grandes y pequeños propietarios; delicados sistemas de reparto de agua como el *compromís* de la Ribera del Flumen; rencillas como las de los sindicatos de la Ribera y el de Tierz, o entre los de río *arriba* y los de río *abajo*, especialmente duras en las sequías; áreas regables por más de un sistema de acequias, etcétera.

En consonancia con el decreto de 1903, se constituyó el correspondiente sindicato. Hay noticia de su existencia en 1906. En 1909 cesó Anselmo Sopena como presidente y se nombró a Ignacio Zamora, y como vocales a

Luciano Montestruc, Ramón Abad, Pablo Asín, Mariano Borderías, Manuel Gabarre, Mariano Lavilla, Domingo Mendoza, Manuel Peleato, Cristino Lacasa, Eloy Canals, Rudesindo Blasco, Rafael Arnal, Ricardo Canals y José Fortuño, y como secretario interino, a Ramón Arcas.

En 1910 Manuel Gabarre, Mariano Lavilla, Manuel Peleato, Domingo Mendoza y Cristino Lacasa formaban parte de su directiva. Un problema era el cobro de los descubiertos en los auxilios a las obras del pantano (*El Diario de Huesca*, 8 de noviembre). Por algún tiempo, en 1911 y 1912, las obras estuvieron paradas. El 22 de diciembre de 1912 era presidente Ramón Abad. En una reunión general, celebrada en la Diputación Provincial, se dio un voto de confianza al recién llegado ingeniero Larrañeta. Pero intervinieron diversas personas por el tema de la financiación correspondiente a los futuros usuarios del agua. Especialmente dura fue la de Bonifacio Martín, médico y propietario en Grañén, quien propuso nombrar una comisión para realizar un empréstito y, una vez conseguido, solicitar de la Junta de Obras que los transportes al pantano se realizasen en carro para que el beneficio fuera local. Cervero hace constar que las deficiencias en la recaudación de cuota no son imputables al sindicato, sino la notable diferencia que resulta entre el número de hectáreas asignadas a la zona y las que resultan suscritas para el riego. La comisión quedó formada por Manuel Gabarre, de Barbués; Lorenzo Rufas, de Torres y Cuarte; Raúl Batout, apoderado del barón de Couteson, colonia de San Luis; Bonifacio Martín Costea, de Grañén; Eloy Canals y Javier Cervero, de Huesca; Mariano Bara, de Monflorite; Melchor Giménez, de Tabernas de Isuela; Ángel Paño, de Sangarrén; José María del Campo, apoderado del duque de Solferino; Manuel Lasierra, de Chimillas; Joaquín Val, de Albero Alto; Juan José Puisac, de Albero Bajo; Rafael Arnal, de Callén; Mariano de Ribas, de Vicién; Martín Rapún, de Banariés, y Emilio Torres Solanot, de Poleñino. A corto plazo, el objetivo era aportar, a cuenta de los débitos del sindicato por auxilios de la ejecución de las obras, la cantidad de 25 000 o 30 000 pesetas a ingresar en la cuenta corriente de la Junta de Obras. Aparentemente, los compromisos de los regantes siempre fueron con retraso. En 1916 el sindicato debía aportar 200 000 pesetas a las obras.

En 1919 estaba presidido por Javier Cervero, con Mariano Gella como vicepresidente y Luis Canela como tesorero, según *El Diario de Huesca* del 28 de septiembre, que daba cuenta de su reelección. Un tema de interés es

ver cómo se integraban los sindicatos ya existentes. Así, en 1922, el Sindicato de la Ribera del Flumen, entonces presidido por Luis Lalaguna, acordó “excitar el celo de toda la Comunidad para que ingresen en el Sindicato del Pantano de Belsué” (*El Diario de Huesca*, 19 de diciembre). En 1932 un documento firmado por Jiménez del Yerro señaló que los de Tierz no habían entrado en el sindicato.

El 6 de septiembre de 1922, Javier Cavero, como presidente del Sindicato de Belsué, firmó un informe sobre la zona regable. Sobre la superficie del proyecto de 1912, con 10 800 hectáreas regadas con 38,38 hectómetros cúbicos, aproximadamente lo calculado por el proyecto de Cleto Miguel Mantecón, señaló que, una vez conseguida la impermeabilidad, se podrían hacer los embalses de Salto de Roldán e inferiores. También se indicaba que los regantes expectantes habían pagado más de dos terceras partes de los auxilios requeridos y que este sindicato no veía ningún problema en la superposición con zonas regables del pantano de Arguis y de RAA. Se manifestaba contrario a la elevación del canal de la derecha, “solicitada por muy pocos elementos”, pues eso supondría una modificación de la zona regada, pero no veía inconveniente en una permuta de zonas regables con el sistema de Arguis. Analizaba el coste de ambos canales, 2 173 490,56 pesetas por administración y 2 401 189,56 por contrata sobre las 9500 hectáreas, que, descontando barbechos, correspondían a un coste de 228,72 y 252,75 pesetas, a lo que el sindicato manifestaba su conformidad. Por último, sobre los plazos de cuatro años para el canal de la derecha y dos para el de la izquierda, solicitaba que se hicieran a la vez.

El sindicato en 1924 sacó a exposición pública el recién realizado parcelario de la zona regable, uno de cuyos ejemplares es el que se encuentra en el Sindicato de Riegos de Arguis. Entonces tenía su sede en el Coso Alto, 61, y era recaudador Agustín Liesa. En 1926 el sindicato exponía los planos parcelarios por segunda vez con Pascual Campo como vicepresidente (*El Diario de Huesca*, 19 de marzo). En 1932 era presidente Campo y entraba en conflicto con Mariano Carderera y Jorge Cajal.

La Comunidad de Regantes

El sindicato estaba inserto en la correspondiente comunidad, que, al menos entre 1922 y 1930, estuvo presidida por Ricardo del Arco. El 3 de

enero de 1932 la Junta de la Comunidad estaba compuesta, además de Del Arco, por Pascual Campo como presidente del sindicato y por Javier Cavero como tesorero. Como vocales: Cavero y Luis Mur, por Huesca; Pascual Campo, por Quicena; José Arnal, por Barbués; Agustín Liesa, por Torres de Barbués; Mariano Gella, por Tabernas de Isuela; Ramón Moréu, por Bellesstar; Mariano Bara, por Monflorite; Gregorio Ciria, por Sangarrén; Francisco Bolea y José Cremallé, por Almuniente; Bonifacio Martín Costea y Sabino Domingo, por Grañén; Manuel Sierra Pomares, por Pompién. En esa reunión, en relación con las obras en el Escalerón, se acuerda enviar un telegrama al ministro de Obras Públicas pidiendo el cese de la comisión gestora, juntas y organismos de la Mancomunidad del Ebro (*El Diario de Huesca*, 9 de enero de 1932). Como respuesta, José Jarné, en nombre de la Junta Provisional Administrativa de Obras, señalaba que Manuel Lorenzo Pardo en 1930 ya había contestado sobre este tema al duque de Solferino, alcaldes y otros propietarios.

Junta de Obras y Junta Social

Inicialmente, la Junta de Obras la componían, además del ingeniero de las obras, Domingo del Cacho Floría, como presidente, y dos o tres vocales. En 1909 eran Lorenzo Rufas y Antonio Otal. En 1912 José Lasierra, de Almudévar; Rufas, de Barbués, y Julio Sopena, de Huesca (pronto sustituido, por su muerte, por Melchor Giménez, de Tabernas de Isuela). En *El Diario de Huesca* del 8 y del 11 de marzo de 1913, Domingo del Cacho salía al paso de unas afirmaciones de Bonifacio Martín referentes a la cantidad gastada en el pantano y señalaba que se pidieran informes a los ingenieros de la obra y a Alejandro Mendizábal, ingeniero jefe de la División Hidrológica del Ebro.

Del Cacho, nombrado comisario real, fue probablemente presidente de la Junta de Obras hasta su fallecimiento en 1923. Javier Cavero, quizás relacionado familiarmente con Joaquín Cavero Sinchar, síndico, primer vicepresidente de la CSHE hasta 1927, fue también presidente de la Junta de Obras del pantano.

En 1926 quedó constituida la Junta Social de los Pantanos de la zona de Huesca con Juan Lacasa con vicepresidente y Luis Mur como secretario.

CONCLUSIONES

El pantano de Santa María de Belsué, en la cuenca alta del Flumen, fue primero ilusión y luego amarga desilusión. Los problemas derivados de la profunda karstificación del estrecho de La Toba ocasionaron el fracaso del proyecto a pesar de su gran inversión.

AGRADECIMIENTOS

Al bibliotecario José Manuel Almécija y a otros funcionarios de la Confederación Hidrográfica del Ebro. A Lorenzo Clemente, antiguo secretario de la Comunidad de Regantes de la Ribera del Flumen. A la familia Arnal, de Barbués. A Ana Oliva y Ester Puyol, de la biblioteca del Instituto de Estudios Altoaragoneses; y a Elena Escar, Adriana Oliva, Rosa Serrano, Nieves Hijós, Isabel Arner, Luis Blanco y María Antonia Escar, de la biblioteca de la Escuela Politécnica Superior de Huesca. A Juan José Generelo, Mario Alfranca, Luis Fernando Jaime, José María Tierz y al resto del personal del Archivo Histórico Provincial de Huesca. Asimismo, agradecemos la colaboración de Leopoldo Serena y Castor Belío.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS*

- Almudévar, I. (2005). *Retablo del Alto Aragón en el último tercio del siglo xx (artículos, charlas y conferencias)*. IEA. Huesca. 452 pp.
- Ara, J. C. (2011). *Memorias de Joaquín Costa*. PUZ / IEA / IET y Gobierno de Aragón. Zaragoza. XLVII + 573 pp.
- Balaguer, F. (1954). Los riegos en la Plana de Huesca. *Argensola*, 17: 49-56.
- Balaguer, F. (1958). Consideraciones sobre el pantano del Flumen. *Argensola*, 34: 135-139.
- Bolea, J. A. (1986). *Los riegos de Aragón*. 2.^a ed. Cortes de Aragón. Zaragoza. 579 pp.
- Borràs, J., y E. Quiroga (2020). Trabajos topográficos en la sima Esteban Felipe. *Exploracions sota terra*, 1: 4-21.
- Briet, L. (1990). *Soberbios Pirineos*. Diputación Provincial de Huesca. Huesca. 498 pp.
- Buera, J., J. A. Cuchí y J. A. Manso (1997). Hidroquímica de las aguas naturales de los sectores occidental y central de la sierra de Guara (Huesca). *Lucas Mallada*, 9: 35-63.

* Una parte importante de la documentación se ha obtenido de diversos archivos de la Confederación Hidrográfica del Ebro. Otra información básica procede del listado de una transferencia de fondos desde el Ministerio de Obras Públicas al Archivo General de la Administración.

- CHE (1976). *Memoria 1946-1975*. CHE. Zaragoza. 474 pp.
- Cuchí, J. A. (2020). Geología del sistema de Esteban Felipe y otras cuevas del Paco As Lianas (Belsué-Huesca). *Exploracions sota terra*, 1: 22-24.
- Cuchí, J. A., J. L. Villarroel, C. Garcés, S. Fábregas, R. Hurtado y J. Bernués (2006). La localización de la mina de Bonés: una obra hidráulica inacaba de la Huesca del siglo XVII. *Argensola*, 116: 171-185.
- Cuchí, J. A., y C. Garcés (2008). Aportaciones a la evolución del sistema de riegos del Isuela en la ciudad de Huesca. *Joaquín Costa*, 25: 43-58.
- Cuchí, J. A., V. Viñals, J. A. Rausa y J. L. Villarroel (2012a). La cueva de la Artica (Belsué, Huesca). *Lucas Mallada*, 14: 41-54.
- Cuchí, J. A., C. Garcés, J. L. Villarroel, R. Larma y J. Angulo (2012b). Vincencio Juan de Lastanosa y Lorenzo Agüesca: protoespeleólogos del siglo XVII en el Alto Aragón. En J. J. Durán y P. A. Robledo (eds.), *Las cuevas turísticas como activos económicos: conservación e innovación*: 287-297. IGME / Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. Madrid.
- Cuchí, J. A., J. L. Villarroel, C. Garcés, J. A. Manso, R. Larma y J. Angulo (2012c). Rasgos morfológicos y estado de conservación de la cueva del Toro, Belsué, Huesca. Primeros resultados. En A. González (coord.), *Avances de la geomorfología en España, 2010-2012: actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología, Santander, 17-20 septiembre de 2012*: 405-408. Universidad de Cantabria. PubliCan-Ediciones. Santander.
- Díaz Castán, V. (2020). Joaquín Costa y los médicos. *Joaquín Costa*, 32: 11-44.
- Díez Gascón, J., y F. Bueno (2001). *Ingeniería de presas: presas de fábrica*. Universidad de Cantabria. Santander. 925 pp.
- Fontana, M. C. (2004). El Círculo Oscense: todo un símbolo que celebrar y conservar. *Argensola*, 114: 7-12.
- Garcés, C. (2006). La mina de Bonés: agua y fracaso en la Huesca del siglo XVII. *Argensola*, 116: 111-170.
- Germán, L. (1999). *Obras públicas e ingenieros en Aragón durante el primer tercio del siglo XX*. IFC/Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Zaragoza. 184 pp.
- Germán, L. (2009). *Grandes empresarios aragoneses*. LID Editorial. Barcelona. 600 pp.
- GIEPG (1972). *Boletín de contribución al catálogo espeleológico de la provincia de Huesca*, 1. Grupo de Investigaciones Espeleológicas Peña Guara. Huesca. 33 pp. + 18 mapas.
- Gil Olcina, A. (2001). Del Plan General de 1902 a la planificación hidrológica. *Investigaciones Geográficas*, 25: 5-31.
- Gimeno, Y., y J. A. Cuchí (1996). El karst de la cuenca alta del río Isuela (Prepirineo, Huesca). En *Congreso sobre recursos hídricos en regiones kársticas*: 145-156. Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. Vitoria.
- Jiménez del Yerro, F. (1931a). Pantanos de Santa María de Belsué, Arguis y Las Navas. *Confederación Hidrográfica Sindical del Ebro*, v/48: 7-9.

- Jiménez del Yerro, F. (1931b). Pantanos de Santa María de Belsué, Arguis y Las Navas. *Revista de Obras Públicas*, 79 (2574): 212-216.
- Mantecón, C. M. (1902). Pantano de Santa María de Belsué. *Revista de Obras Públicas*, 50: 391-397.
- Millán, H. (2006). *Estructura y cinemática del frente de cabalgamiento surpirenaico en las Sierras Exteriores aragonesas*. IEA. Huesca. 398 pp. + 5 mapas.
- Monesma, E. (2022). La carretera soñada: una vía de unión con el Pirineo siguiendo el río Guatizalema. *Joaquín Costa*, 34: 99-175.
- Montes, M. (2002). *Estratigrafía del Eoceno-Oligoceno de la cuenca de Jaca: sinclinorio del Guarga*. IEA. Huesca. 355 pp. + 1 mapa.
- Mur Ventura, L. (1919). *Los riegos en el término municipal de Huesca*. Consejo Provincial de Agricultura y Ganadería. Imprenta de Justo Martínez. Huesca. 118 pp.
- Rodríguez Vidal, J. (1986). *Geomorfología de las Sierras Exteriores oscenses y su piedemonte*. IEA. Huesca. 172 pp. + 8 mapas.

LUCAS MALLADA, 26 (2024)

ISSN 0214-8315, ISSN-e 2445-060X

<http://revistas.ica.es/index.php/LUMALL>

NOTA SOBRE MINERALIZACIONES DE COBRE EN EL PICO BORÓN (VADIELLO)

Ana Ortas del Río¹ | José Antonio Manso Alonso² |
José Antonio Cuchí Oterino²

RESUMEN Se documenta la presencia de azurita y malaquita en calizas eocenas situadas en la zona de Vadiello, en la cuenca del río Guatizalema.

PALABRAS CLAVE Eoceno. Cobre. Vadiello (Loporzano, Huesca).

ABSTRACT The presence of azurite and malachite is documented in Eocene limestones located in the Vadiello area, in the Guatizalema River basin.

KEYWORDS Eocene. Copper. Vadiello (Loporzano, Huesca, Spain).

INTRODUCCIÓN

El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) señalaba en 2014: “No existen en el ámbito de la hoja de Apiés explotaciones mineras en la actualidad, ni existen indicios de ellas. Se localizan en las inmediaciones del embalse de Vadiello algunos indicios de malaquita, localizados en pequeñas diaclasas de las calizas de Guara”. El primer aserto también aparece en la hoja “Huesca” del *Mapa metalogénico de España*, a escala 1 : 200 000, donde solo aparece la mina de cobre de Labata.

¹ Sección de Espeleología del Club Atlético Sobrarbe. anao_32@hotmail.com

² Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Carretera de Cuarte, s/n. E-22071 Huesca. manso@unizar.es, cuchi@unizar.es

Sin embargo, sí que ha habido minería de cobre en el entorno oscense. Dejando aparte el debate sobre el origen del cobre de las monedas de bronce de Bolskan, ya Lucas Mallada señalaba indicios en el Guatizalema y una mina de cobre a 1 kilómetro al este de La Almunia del Romeral (Mallada, 1878). En la zona industrial de esta localidad, a la salida del Bullitero, quedan los restos de un martinete de cobre. Nieto (1996) cita esta fundición, inactiva a finales del siglo XVIII. El *boom* minero de principios del siglo XX llevó a numerosas denuncias. En 1900, 1905 y 1906, La Fe, en Barluenga (AHPHu, IN 000199/000177, IN 191/559, IN-191/580). En el mismo año, Famosa en Sipán (AHPHu, IN 200/166), y La Niña, en Santa Eulalia la Mayor (AHPHu, IN 200/163). A su vez, son vueltas a denunciar en 1905 (AHPHu, IN 191/560, IN 191/562) por el incansable y omnipresente Luciano Labastida Oliván. La única que no es suya es Baldarruego, en Santa Eulalia, en 1913 (AHPHu, IN 204/756). En la práctica totalidad de ellas la actividad debió de ser mínima, a no ser que fueran minas solo sobre el papel. Pero de esa época es la existente en la orilla derecha del Flumen en Lienas (Apiés), cuyas galerías están topografiadas en Cuchí (1996); la de la orilla de enfrente, aguas arriba de Sagarillo, y la de Petracanera, al este de Santa Eulalia la Mayor. Hacia 1956 Julián Dorao y Díaz Montero, ingeniero de Caminos malagueño, solicitó permiso en numerosas minas de cobre de los somontanos de Zaragoza y Huesca trabajadas a cielo abierto. Probablemente, dirigió el socavón a la entrada de la mina de Lienas. Subías y cols. (1989 y 2003) también señalan las minas de Sagarillo.

Pero la segunda afirmación de la memoria del *Magna* es correcta. Diversas personas han recogido muestras de mineral de cobre, bien visible por su color azul (azurita) o verde (malaquita) sobre calizas, en el camino situado entre Vadiello y Nocito, por el embalse. El presente artículo da algunos detalles sobre esta mineralización.

EL MARCO GEOLÓGICO

La zona de presencia de cobre se encuentra en la orilla derecha del valle del río Guatizalema, en la cola del embalse de Vadiello. Estructuralmente, es zona complicada en la zona terminal del gran anticlinal de Guara, también llamado de *La Pillera*, cuyo flanco oeste es el pico Fragneteto.

El Guatizalema se ha abierto paso por calizas del lateral oeste de la terminación de esta estructura, sepultada por los conglomerados oligoceno-miocenos de Vadiello y San Cosme.

Los estratos calizos que conforman el pico Borón se encuentran verticalizados, con alguna relación con los cabalgamientos situados al oeste. Accediendo desde la presa, superados los conglomerados, se pasa a materiales calizos del Eoceno, básicamente Eoceno medio (formación Guara, del Luteciense), que forman crestas espectaculares y cuyas zonas bajas están recubiertas de canchales periglaciares.

UBICACIÓN

El mineral se puede encontrar en el camino natural que lleva desde el final de la HU-330 hacia Nocito, pasados los conglomerados de Vadiello. Se ha encontrado mineral al norte de la denominada *cresta del pico Borón*. Desde el collado del camino en la citada cresta (fig. 1) se inicia un descenso que pasa por una glera y llega luego al entronque con una senda que desciende hacia el río. Hay un resto de un letrero rojo pintado en la piedra en el que se lee “A Nocito”, y otros dos, en amarillo, con flechas indicando hacia la ladera. En el camino a Nocito, frente a un cajigo grande, se ve un estrato oscuro con pequeños indicios de mineral de cobre. El estrato resulta también visible en el camino que desciende al embalse. Es del orden de 2 metros de anchura y presenta vetillas milimétricas de mineral de cobre. En las inmediaciones hay también algún nivel de caliza rojiza.

El canchal inmediatamente situado al sur del punto anterior parece ser la fuente de los clastos con indicios de cobre que se observan en el camino (fig. 2). Al ascender por este, se ve que solo hay mineral en una bifurcación hacia el norte que lleva hacia la pequeña cresta del horizonte izquierdo en la figura 1. A su pie (localización aproximada ETRS89, H 30, X: 724339, Y: 4681486, Z: 848 metros s. n. m.) encontramos una serie de estratos calizos con numulites del orden de 1-2 metros de potencia total con los indicios (fig. 3). En algún nivel los fósiles son muy abundantes. El mineral de cobre aparece en pequeños cristales aciculares azules y verdes, así como en masas amorfas. Se muestran paralelos a la estratificación, a partir de lo que parecen estilolitos. También hay cristales aislados en la masa calcárea.



Fig. 1. Imagen de la zona de afloramiento desde el collado de la cresta al pico Borón, en el camino de Vadiello a Nocito. El mineral se encuentra al pie de la pequeña cresta del horizonte izquierdo.



Fig. 2. Ejemplo de clasto con azurita en el canchal.



Fig. 3. Detalle del estrato vertical que contiene mineral de cobre.
El tamaño de los numulites no excede de 1 centímetro.

No se han encontrado indicios de minería. Hay alguna carbonera (carbón vegetal) en la zona.

ANÁLISIS

Una serie de muestras, no representativas, se recolectaron en febrero y mayo de 2025. La tabla I las describe sucintamente.

Tabla I. Muestras, no representativas, recolectadas al norte de la cresta del pico Borón.

1	Material rojizo al norte de la cresta del pico Borón.
2	Roca con lámina de hierro y mineral de cobre. Posible <i>hardground</i> .
3	Roca oscura del filón del canchal norte.
4	Caliza gris con azurita. Canchal sur de la cresta del pico Borón.
5	Canto fracturado con acículas de cobre, supuestamente malaquita.
6	Canto con mineral acicular azul oscuro, supuestamente azurita.

Las muestras se analizaron mediante un espectrómetro de rayos X portátil modelo Niton™ XL3t GOLDD+ de Thermo Fisher Scientific (Waltham, Massachusetts, EE. UU.), empleando el modo de medida *mining*, con tiempos de detección superiores a 120 segundos y una apertura del colimador de 3 milímetros. Los elementos con número atómico inferior al

Tabla II. Análisis mediante pXRF de algunas muestras con cobre y hierro en el entorno de la cresta este del pico Borón, camino de Nocito. La muestra 2 se analiza en dos puntos.

	Muestra 1 (%)	Muestra 2 Fe (%)	Muestra 2 Cu (%)	Muestra 3 (%)	Muestra 4 (%)	Muestra 5 (%)	Muestra 6 (%)
Ba	0,042	0,069	0,026	0,035	0,044	0,038	0,063
Bal	68,318	31,868	68,071	60,534	61,319	61,443	50,739
Mo	<LOD	0,008	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Zr	0,003	0,004	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Sr	0,01	0,003	0,009	0,015	0,026	0,008	0,014
Rb	0,003	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
As	<LOD	0,206	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Pb	<LOD	0,19	0,002	0,003	<LOD	0,002	<LOD
Zn	<LOD	0,031	0,005	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Cu	<LOD	1,323	0,075	0,127	0,03	10,527	37,762
Ni	<LOD	0,033	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Fe	1,738	56,285	1,577	0,645	0,225	0,365	0,137
Mn	<LOD	0,09	0,055	0,046	0,023	<LOD	<LOD
Cr	0,009	0,09	0,008	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
V	<LOD	0,158	0,011	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Ti	0,083	0,096	0,14	0,039	<LOD	<LOD	<LOD
Ca	23,825	1,218	23,541	37,062	36,789	27,061	9,105
K	0,775	0,275	0,683	0,145	0,192	0,051	0,098
Al	0,893	2,896	1,124	<LOD	<LOD	<LOD	0,716
P	<LOD	0,142	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Si	4,218	3,719	3,77	1,126	1,002	0,466	1,423
Cl	0,019	0,046	0,032	0,02	0,054	0,028	<LOD
S	0,045	0,204	0,194	0,079	0,131	<LOD	0,022
Mg	<LOD	1,043	0,674	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

Bal: suma de porcentajes de elementos con número atómico igual o inferior al potasio.

Sb, Sn, Cd, Pd, Ag, Nb, Bi, Se, Hg, Au, W y Co, por debajo del límite de detección.

del magnesio (como el carbono, el oxígeno o el sodio), que el equipo no es capaz de discriminar, quedan clasificados como *Bal*. El método debe considerarse semicuantitativo.

DISCUSIÓN

Como se ha señalado, los minerales de cobre se encuentran en calizas de la formación Guara, del Luteciense. Es una formación calcárea compleja, actualmente subdividida en tres unidades. De forma resumida, se trata de una plataforma marina previa al levantamiento pirenaico, con variaciones en profundidad, fases erosivas con *hardgrounds* ferruginosos, pero sin evidencias de exposición subaérea ni carstificación (IGME, 2014). Tras el levantamiento pirenaico la karstificación en el Prepirineo fue muy intensa, con depósitos secundarios de arcillas de descalcificación, como las de la cavidad Esteban Felipe (Cuchí, 2020), y de ocre ferruginosos, como los de la mina cueva Sotarraña (Villarroel y Cuchí, 2013).

Todas las muestras parecen estar sobre calizas, dado el bajo nivel de magnesio. La mayoría de las calizas de esta zona son de color marrón claro en fresco y grises en alteración, aunque se encuentran algunas con un color rojizo (muestra 1) debido a la presencia de ligeras cantidades de hierro. Como se ha señalado, en la zona estudiada se encuentran pequeñas láminas de hierro sobre roca (muestra 2 y análisis 2 Fe). El contenido en hierro es importante, un 56 %, similar a los valores que se hallan en otras zonas del Prepirineo central (Cuchí y cols., 2024; Ortas y cols., 2024). La existencia de un fondo de hierro general en las calizas de Guara debiera ser objeto de un estudio específico. El nivel de azufre es muy bajo para sospechar la presencia de algún sulfuro.

Pero lo que destaca en la zona estudiada es la presencia de minerales de cobre, que se asume son malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3[\text{OH}]_2$) y azurita ($\text{Cu}_3[\text{CO}_3]_2[\text{OH}]_2$), los dos minerales de cobre más comunes en medios carbonatados. La muestra número 6, un mineral acicular de un color azul muy oscuro, casi negro, tiene un interesante nivel de cobre. La presencia de estos minerales en calizas resulta relativamente habitual, aunque suelen aparecer en calizas paleozoicas o más antiguas (Tourtelot y Vine, 1976). En el Pirineo francés, donde Palassou (1784) cita minas de cobre en Baigorri, se explotaron de este

mineral en calizas del Devónico–Carbonífero (Dubois y Guilbaut, 1989). Fuera de la cadena pirenaica, hay ejemplos de minerales de cobre en rocas sedimentarias. Smirnov (1970) pone como ejemplo el nivel cuprífero existente en un estrato de esquistos arcillosos del Zechstein inferior (Pérmico) en Mansfeld (Alemania). Neukirchen y Ries (2020) señalan estas manifestaciones como *sediment-hosted stratiform copper*. Brown (1992) describe sus características y un mecanismo de génesis. Para Vázquez (2012), el cobre en series sedimentarias (SH) es estratoligado y restringido a un estrecho rango de capas dentro de una secuencia sedimentaria. Todos los autores consideran estos yacimientos epigenéticos y diagenéticos. Cox y cols. (2007) catalogan la génesis de estos depósitos como USGS *model 30b* y describen tres subtipos: modelo de facies reducida (RF), modelo *redbed* (RB) y modelo Revert (RV). En fecha más reciente, Brown (2017) presenta modelos conceptuales sobre la hidroquímica de la formación de estos yacimientos. Evidentemente, con los conocimientos actuales sobre la mineralización de Vadiello poco se puede realizar, excepto una breve descriptiva de campo.

En Vadiello, como ya se ha dicho, la mineralización se encuentra en un estrecho espesor de calizas del Eoceno. Son cristales aciculares de azurita y malaquita que aparecen muy cercanos, en general como costras de pequeñas dimensiones, del orden de algún centímetro cuadrado de superficie y un espesor milimétrico. Sugieren estilolitos. En algunos casos parecen estar tiñendo o reemplazando la calcita de algún nummulite. Los mecanismos teóricos del reemplazamiento de caliza por minerales de cobre fueron estudiados en detalle, teóricamente y en laboratorio, por Garrels y Drever (1952), quienes señalaron la complejidad de la formación de malaquita en laboratorio pese a lo observado en la naturaleza.

Es de reseñar, por otro lado, que en el entorno de las Sierras Exteriores prepirenaicas centrales no hay indicios de vulcanismo ni manifestaciones hidrotermales. La única singularidad es el pequeño afloramiento de ofitas asociadas al Keuper en Las Valles, situado a unos 2 kilómetros al este de la zona estudiada, tras la alineación Montidinera–Fragineto, ya señalado por Mallada (1878), Almela y Ríos (1952) y cartografiado por el IGME (2014). Sin embargo, no hay información sobre la presencia de cobre en los afloramientos ofíticos del Pirineo.

Un tema de algún interés es la posible relación con los depósitos en las areniscas miocenas situadas más al sur, de amplia extensión desde Sos hasta Panzano y especialmente en las inmediaciones de Biel, estudiados por Gimeno (1924a, 1924b y 1925) y, más recientemente, por Subías (1989) y Subías y cols. (1989 y 2003). Estos autores postulan la circulación de fluidos en la génesis de los minerales de cobre en el entorno de Biel en la formación Campodarbe. Esta es más moderna que la caliza de Guara.

Por último, sorprende un poco que no haya habido ningún tipo de noticia, aunque fuera especulativa, sobre esta mineralización, dada la fácil visualización del mineral para quienes transitan el camino, incluso para personas no expertas. Sorprende dadas las solicitudes y las minas abiertas en la zona de areniscas del cercano somontano. Salvo la sucinta cita en el *Magna* (IGME, 2014), tampoco ha llamado la atención de ingenieros de Minas o geólogos. Es raro que no lo citara Lucas Mallada (Mallada, 1878), gran conocedor de su provincia natal y que sí se refiere a los criaderos de La Almunia del Romeral. Tampoco dice nada Gimeno (1924a y 1924b), que señala que en esta última localidad citada hubo horno de cobre y hoy se encuentran restos de un martinete.

AGRADECIMIENTOS

Miguel Ortega, gran estudioso de las sabinas centenarias, fue quien nos puso en canción, y Enrique Salamero aportó también sus observaciones. Eugenio Monesma nos hizo ver la importancia del martinete de La Almunia del Romeral y diversas minas cercanas. María José Calvo nos señaló las catas mineras del entorno de la acequia molinera de Sipán. Por último, María Dolores Giménez nos acompañó en alguna de las exploraciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almela, A., y J. M. Ríos (1952). *Hoja y memoria del mapa geológico de España 1 : 50 000 n.º 247 (Apiés)*. IGME. Madrid.
- Brown, A. C. (1992). Sediment-hosted stratiform copper deposits. *Geoscience Canada*, 19 (3): 125-141.
- Brown, A. C. (2017). Constraints on conceptual and quantitative modeling of early diagenetic sediment-hosted stratiform copper mineralization. *Minerals*, 7 (10): 192.

- Cox, D. P., D. A. Lindsey, D. A. Singer, B. C. Moring y M. F. Diggles (2007). *Sediment-Hosted Copper Deposits of the World: Deposit Models and Database*. United States Geological Survey. Open-File Report 03-107 v.1.3. 53 p.
- Cuchí, I. (1996). Introducción a la minería medieval en el Alto Aragón: las minas de cobre de Santa Eulalia (Huesca). En *Actas de las I Jornadas sobre Minería y Tecnología en la Edad Media Peninsular (León, 26 al 29 de septiembre de 1995)*: 217-224. Fundación Hullera Vasco-Leonesa. La Robla (León).
- Cuchí, J. A. (2020). Geología del Sistema de Esteban Felipe y otras cuevas del Paco Adriana (Belsué, Huesca). *Exploracions sota terra*, 1: 4-8.
- Cuchí, J. A., A. Ortas, E. Salamero, M. Oliván, M. Gil y R. Ruiz (2024). Minas y petróleo en el Sobrarbe meridional y central. *Nabaín*, 27: 25-30.
- Dubois, C., y J. E. Guilbaut (1989). Un exemple d'exploitation minière antique dans les Pyrénées ariégeoises: la mine du Rougé à Esplas-de-Serrou. *Revue archéologique de Narbonnaise*, 22 (1): 363-370.
- Garrels, R. M., y R. M. Drever (1952). Mechanism of limestone replacement at low temperatures and pressures. *Geological Society of America Bulletin*, 63 (4): 325-380.
- Gimeno Conchillos, Á. (1924a). Las areniscas cupríferas en Aragón, I parte. *Boletín Oficial de Minas y Metalurgia*, 89: 1031-1097.
- Gimeno Conchillos, Á. (1924b). Las areniscas cupríferas en Aragón, II parte. *Boletín Oficial de Minas y Metalurgia*, 90: 1103-1151.
- Gimeno Conchillos, Á. (1925). Explotación y beneficio de los cobres de Aragón. *Publ. Academia de Ciencias de Zaragoza. Curso Conf. Subsuelo de Aragón*: 5-17. Zaragoza.
- IGME (2014). *Mapa geológico de España 1 : 50 000 (Magna). Hoja 48: Apiés*. Madrid. 75 pp. + 2 mapas.
- Mallada, L. (1878). *Descripción física y geológica de la provincia de Huesca*. Imprenta y Fundición de Manuel Tello. Madrid. 439 pp. + 2 mapas. (Edición facsímil, 1990: IEA, Huesca).
- Millán Garrido, H. (2006). *Estructura y cinemática del frente de cabalgamiento surpirenaico en las Sierras Exteriores aragonesas*. IEA. Huesca. 396 pp.
- Neukirchen, F., y G. Ries (2020). *The World of Mineral Deposits: A Beginner's Guide to Economic Geology*. Springer Nature. Berlín. 371 pp.
- Nieto, J. J. (1996). El proceso siderometalúrgico altoaragonés: los valles de Bielsa y Gistaín en la Edad Moderna (1565-1800). *Llull*, 19 (37): 471-508.
- Ortas, A., M. Oliván, E. Salamero, J. A. Manso y J. A. Cuchí (2024). Una mina de hierro en Santa Marina (Bagüeste). *Lucas Mallada*, 26: 99-111.
- Palassou, P. B. (1784). *Essai sur la minéralogie des Monts-Pyrénées*. Didot. París. 330 pp.
- Smirnov, V. L. (1970). *Geologie der Lagerstätten mineralischer Rohstoffe*. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig. 563 pp.

- Subías, I. (1989). *Estudio metalogénico del yacimiento de cobre de Biel (Zaragoza)*. Tesina de licenciatura. Universidad de Zaragoza. 157 pp.
- Subías, I., C. Fernández-Nieto y J. M. González (1989). Mineralogía de las areniscas cupríferas de Biel (Zaragoza). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 12: 315-327.
- Subías, I., I. Fanlo, E. Mateo y J. García-Veigas (2003). A model for the diagenetic formation of sandstone-hosted copper deposits in Tertiary sedimentary rocks, Aragón (NE Spain): S/C ratios and sulphur isotope systematics. *Ore Geology Reviews*, 23 (1-2): 55-70.
- Tourtelot, E. B., y J. D. Vine (1976). *Copper deposits in sedimentary and volcanogenic rocks*. Geological Survey Professional paper 907 –C. US Government Printing Office. USA. 34 pp.
- Vázquez, F. (2012). *Manual de yacimientos minerales*. ETS Ingenieros de Minas de Madrid. Madrid. 597 pp.
- Villarroel, J. L., y J. A. Cuchí (2013). La cavidad conocida como *Sotarraña*, en Betorz (Huesca). *Lucas Mallada*, 15: 191-201.

NORMAS DE PUBLICACIÓN DE LA REVISTA

Lucas Mallada publica artículos de investigación inéditos encuadrados en las distintas ramas de la ciencia.

1. Los trabajos se enviarán en soporte digital a la redacción de la revista (IEA / Diputación Provincial de Huesca. Calle del Parque, 10. E-22002 Huesca. Teléfono: 974 294 120. Correo electrónico: publicaciones@iea.es), como máximo el 15 de febrero del año en que se deseen publicar, incluyendo una versión en Word (existe una plantilla a disposición de los autores) y una versión completa (con ilustraciones y tablas, si las hubiera) en PDF.
2. No podrán sobrepasar las 20 páginas. Excepcionalmente, a juicio del consejo de redacción, se podrán aceptar textos de mayor longitud.
3. Los artículos constarán, en principio, de los apartados que a continuación se describen. En todo caso, siempre que el trabajo lo requiera, esta estructura podrá modificarse del modo que resulte más conveniente.

Título El título será conciso pero suficientemente indicador de su contenido.

Nombre del autor o autores, con su dirección postal y su correo electrónico.

Resumen en castellano, y su correspondiente *abstract* en inglés, que no supere las doce líneas y que recoja lo esencial del trabajo.

Palabras clave en castellano e inglés, que orienten sobre el contenido del trabajo en orden de importancia, dejando en último lugar el área geográfica.

Introducción Se ofrecerá en la introducción una idea de los antecedentes históricos del tema, así como del interés y la finalidad del trabajo.

Material y métodos Incluirá la información pertinente de las especies estudiadas, aparatos utilizados, métodos de estudio y de análisis de los datos, y zona de estudio.

Resultados En esta sección se presentarán únicamente los datos obtenidos (inéditos).

Discusión Se discutirán los resultados y su comparación con trabajos relacionados. Las sugerencias de investigaciones futuras podrán aportarse al final de este apartado.

Conclusiones Si las hay, deberán presentarse en forma de afirmaciones concretas y ordenadas.

Referencias bibliográficas Cada trabajo deberá ir acompañado de las referencias bibliográficas correspondientes a las publicaciones citadas en el texto. Las citas de autores en el mismo se pueden indicar entre paréntesis al final de una frase (Peña, 1995; León y Cuchí, 2019; Martínez-León y cols., 2019) o directamente entre el texto: “Es preciso mencionar las aportaciones de León y Cuchí (2019) y Peña (1995)”.

Las referencias irán en orden alfabético y seguirán los modelos siguientes:

Artículos de revista Martínez-León, J., R. López-Flores y E. Pérez-Collazos (2019). El tritón pirenaico en la Canal del Palomo (Vadiello). *Lucas Mallada*, 21: 203-233.

Libros León, J. L., y J. A. Cuchí (2019). *Guía del Sendero Botánico de la Galliguera*. Coordinadora Biscarrués – Mallos de Riglos y Galliguera Ediciones. Biscarrués (Huesca). 205 pp.

Capítulos de libros Peña, J. L. (1995). Los Pirineos. En M. Gutiérrez (coord.), *Geomorfología de España*: 159-225. Rueda. Madrid.

Recursos digitales Castillo Miralbés, M. (2007). La fauna en la comarca del Cinca Medio. En J. Sanz Ledesma (coord.), *Comarca del Cinca Medio*: 65-77 <<https://cutt.ly/2hHPba1>>. Gobierno de Aragón (Territorio, 26). Zaragoza.

4. El texto podrá redactarse en cualquiera de las lenguas en uso en la comunidad autónoma de Aragón, en francés o en inglés.

Los caracteres en cursiva se utilizarán para los nombres científicos de géneros y de especies (entre paréntesis si siguen al nombre común) y para los neologismos intraducibles; las citas textuales, independientemente de la lengua, figurarán en letra redonda y entre comillas, y los nombres de autor que sigan a un taxón irán en redonda.

Los topónimos se escribirán, salvo excepciones que lo justifiquen, en la lengua en que esté escrito el trabajo.

Se procurará no incluir notas a pie de página.

5. Si hubiera tablas o ilustraciones (gráficos, mapas, esquemas, figuras o fotografías), el autor las ubicará en el sitio aproximado donde desee que figuren. Además del archivo completo del trabajo, las ilustraciones se enviarán en archivo específico aparte (formato TIFF, JPG...) para garantizar la máxima calidad en su reproducción.

Las ilustraciones se designarán con el nombre de **figura** y se numerarán 1, 2, 3... Las **tablas** se numerarán I, II, III... Todas ellas deberán estar reseñadas en el texto (fig. 1, tabla I...).

Las leyendas incluidas al pie de las figuras serán claras y concisas, así como los títulos de las tablas, que figurarán en su parte superior.

6. La selección y aprobación de los trabajos es competencia del consejo de redacción de la revista. Todos los trabajos serán revisados previamente por un mínimo de dos expertos. Dichos **referees** serán seleccionados entre científicos del ámbito del CSIC, de la universidad o de otras instituciones, o entre personas de reconocida valía en el tema de que se trate. Cuando el resultado de dicha revisión lo exija, el original con las pertinentes anotaciones será devuelto al autor, que deberá tenerlas en consideración.

7. El texto publicado será el resultante de la corrección de pruebas por el autor —sin añadidos que modifiquen la maquetación—, o ese mismo borrador si no se contesta en el plazo fijado.

CONTENIDOS

Despedida

José Antonio Cuchí Oterino

Suplementación vitamínica y mineral para la mejora de la reproducción del quebrantahuesos (*Gypaetus barbatus*) en el Pirineo central

Juan Antonio Gil, Gonzalo Chéliz, Óscar Díez y Juan Carlos Ascaso

Propuesta de determinación de aerinita en pigmentos mediante pXRF

José Antonio Manso Alonso, María Puértolas Clavero, Sheila Ayerbe Lalueza, Pablo Martín-Ramos y José Antonio Cuchí Oterino

Variedades de olivo tradicionales en el Alto Aragón: caracterización molecular, aceites monovarietales y árboles monumentales

Javier Viñuales Andreu, Alfredo Serreta Oliván, Rubén Sancho Cohen, Ana Cristina Sánchez Gimeno, Pablo Martín-Ramos, José Antonio Cuchí Oterino y José Casanova Gascón

Una mina de hierro en Santa Marina (Bagüeste)

Ana Ortas del Río, Mariano Oliván Esteban, Enrique Salamero Pelay, José Antonio Manso Alonso y José Antonio Cuchí Oterino

Algunas características de materiales geológicos y suelos salinos en la zona occidental de la Hoya de Huesca

José Antonio Cuchí Oterino, Nicolás Omiste Rodrigo y Raquel Zufiaurre Galarza

Los suelos de Biscarrués como elemento pedagógico

David Badía Villas y José Antonio Cuchí Oterino

Aportación a la historia de las presas del alto Flumen

José Antonio Cuchí Oterino, Almudena Bollaín Covarrubias y José Luis Villarroel Salcedo

Nota sobre mineralizaciones de cobre en el pico Borón (Vadiello)

Ana Ortas del Río, José Antonio Manso Alonso y José Antonio Cuchí Oterino



IEA
Instituto
de Estudios
Altoaragoneses

**DIPUTACIÓN
HUESCA**