

Influencia del sustrato cenozoico en el origen y sedimentación de la laguna hiperalcalina de Caballo Alba (Segovia)

Influence of the Cenozoic substrate on the origin and sedimentation of a soda lake (Caballo Alba, Central Spain)

M. Esther Sanz-Montero¹, J. Pablo Rodríguez-Aranda² y Pablo del Buey¹

¹ Dpto. Mineralogía y Petrología. Fac. Geológicas. UCM. C/ José Antonio Novais, 2. 28040-Madrid. España. mesanz@ucm.es; pablodelbuey@ucm.es

² IES Camilo José Cela. Av. Monte, 16. 28223-Pozuelo de Alarcón (Madrid). España. juanparo@ucm.es

ABSTRACT

Caballo Alba is a highly alkaline and ephemeral lake located in a wetland area of the Duero basin (central Spain). The lake contains sodium chloride water and overlies Miocene marlstone deposits and Quaternary terraces. The purpose of this paper is to study the impact of the structure and lithology of the Cenozoic substrate in both the origin of the lake and mineralogy of the lake deposits. The origin and shape of Caballo Alba was controlled by NNW-SSE fractures affecting the substrate. These fractures provide the main pathways of groundwater to the lakes. Lacustrine deposits are comprised of clays and authigenic calcium, magnesium and sodium carbonates, and sulfates. The comparative analysis of the mineralogy between Miocene marls and lacustrine deposits reveals that authigenic smectites are also forming in the lake.

Key-words: Ephemeral lake, Duero basin, authigenic deposits, smectites, tectonic origin.

RESUMEN

La laguna de Caballo Alba (Segovia) es un pequeño lago efímero hiperalcalino del Humedal Coca-Olmedo de salmueras clorurado-sódicas, cuyo sustrato y área de drenaje están formados por rocas margosas miocenas y retazos de terrazas cuaternarias. Este trabajo se centra en analizar la influencia de la estructura y litología del sustrato Cenozoico en el origen de la laguna y composición mineralógica de sus sedimentos. Se muestra que el origen y forma de Caballo Alba están controlados por las fracturas NNW-SSE que afectan al Cenozoico y constituyen las principales vías de alimentación de agua mediante flujos subterráneos. El sedimento reciente de Caballo Alba incluye sulfatos y carbonatos (cálcicos, magnésicos y sódicos), y arcillas. El estudio comparativo de las margas miocenas y del sedimento lagunar revela que en Caballo Alba probablemente se están depositando esmectitas autigénicas.

Palabras clave: Laguna estacional, Cuenca del Duero, sedimentos autigénicos, esmectitas, origen tectónico.

Geogaceta, 70 (2021), 27-30
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 05/02/2021
Fecha de revisión: 23/04/2021
Fecha de aceptación: 28/05/2021

Introducción

El "Complejo lagunar de Coca-Olmedo" (Fig. 1) se ubica en las provincias de Segovia y Valladolid, dentro de la Cuenca Cenozoica del Duero. Las lagunas se caracterizan como *soda lakes* de acuerdo con su alta alcalinidad y elevado contenido en sodio (Sanz-Montero *et al.*, 2013). Caballo Alba (Segovia) es uno de los pequeños cuerpos de agua estacionales que se incluyen en dicho complejo (Fig. 1). Las lagunas son alimentadas esencialmente por agua de lluvia, arroyadas efímeras y flujos subterráneos (Cabestrero y Sanz-Montero, 2018). Se encuentran conectadas con el acuífero de *Los Arenales*, una unidad hidrogeológica regional cuyas aguas realizan un largo recorrido desde el Sistema Central hasta el centro de la Cuenca del Duero (IGME, 2015). La orientación dominante del acuífero (N15°W) sigue una directriz tectónica (Fernández-Escalante, 2005). Por su parte, Desir *et al.* (2003) sugieren que estas lagunas se han formado por erosión fluvio-eólica. Caballo Alba se



Fig. 1. Localización del Humedal Coca-Olmedo con la zona de estudio recuadrada y foto de satélite mostrando la laguna de Caballo Alba y la cantera estudiadas. Las líneas discontinuas marcan la posición de fracturas en el sustrato cenozoico. Ver figura en color en la web. *Fig. 1.* Coca-Olmedo wetland and location of the study zone (squared). The satellite photo shows lake Caballo Alba and the nearby quarry. Dashed lines indicate fractures in the Cenozoic substrate. See color figure in the web.



Fig. 2. Secuencia sedimentaria que forma el sustrato Vallesiano de Caballo Alba. Ver figura en color en la web.

Fig. 2. Vallesian sedimentary sequence forming the substrate of Lake Caballo Alba. See color figure in the web.

asienta en una suave depresión desarrollada en materiales margosos del Mioceno (Portero *et al.*, 1982).

En este trabajo se analiza la génesis de la laguna de Caballo Alba y se estudia la mineralogía de su sustrato para determinar qué influencia tiene en el sedimento lagunar.

Metodología

Se han llevado a cabo estudios cartográficos, de fotografía de satélite y de campo. Se ha analizado la mineralogía del sedimento lagunar (hasta 20 cm de profundidad) y del sustrato mioceno mediante difracción de rayos X, métodos del polvo total y agregados orientados para las fracciones $<2\mu\text{m}$ y $<0,5\mu\text{m}$. Se han realizado, además, observaciones con microscopía óptica y electrónica de barrido (MEB). También se ha analizado la hidroquímica de la laguna (4 muestras tomadas en marzo, 1 en diciembre y 1 en abril) y de un cuerpo de agua que aflora en una cantera próxima a Caballo Alba en julio.

Área de estudio

La laguna Caballo Alba (CA) se localiza en el término municipal de Villeguillo (Segovia) a 768 m de altura, tiene un área de 0,17 km² y una profundidad máxima de 30 cm. Durante el verano se seca (Cabestrero y Sanz-Montero, 2018). Se puede considerar un ambiente de tipo *playa lake* que presenta elevados valores de pH (9-10,4) y una hidroquímica clorurada sódica con porcentajes variables de bicarbonato, carbonato y sulfato (Cabestrero y Sanz-Montero, 2018). Se ha observado la presencia de una surgencia de agua subterránea próxima a su margen oriental, existiendo una pequeña laguna seca al NE de Caballo Alba (Fig. 1).

La laguna se asienta en materiales vallesianos horizontales, constituidos por margas gris-verdosas con ostrácodos, que se incluyen en la *Unidad de Cuestas* del sector centro/occidental de la Cuenca del Duero (Fig. 2). Estas facies se depositaron en ambientes marginales de lagos salados (Alonso-Gavilán *et al.*, 2004). En el entorno, se observan, además, depósitos fluviales cuaternarios del sistema Eresma - Adaja - Voltoya (Portero *et al.*, 1982).

No existen buenos afloramientos de las rocas miocenas donde se pueda evaluar su carácter arcilloso, salvo en una pequeña cantera, situada 1 km al NE de CA, con 10 m de altura de frente, en la que se explotaban arcillas comunes para uso cerámico estructural (IGME y SIEMCALSA, 2016) (Figs. 1 y 2). En ésta se observan secuencias de margas verdes y dolomías margosas (Fig. 2). El conjunto está coronado por una capa de lutitas calcáreas. En la cantera se observa la traza de una falla NNW-SSE (Fig. 1) afectando a una terraza fluvial del Pleistoceno Medio, según la datación de Portero *et al.* (1982), constituida por conglomerados cuarcíticos. En la zona más deprimida de la cantera, siguiendo la traza de la falla, existe un cuerpo de agua permanente de profundidad superior a 1 m.

Los sedimentos actuales de Caballo Alba son de color blanquecino y constan fundamentalmente de arcillas, carbona-

tos y sulfatos (Fig. 3). Se hallan directamente relacionados con tapices microbianos, que producen microambientes donde precipita un cortejo variado de minerales (Fig. 4) (Cabestrero, 2018; Cabestrero y Sanz-Montero, 2018). Localmente, se observan cantos de gravas sobre el fondo de la laguna heredados de los depósitos de las terrazas cuaternarias.

Resultados

El estudio cartográfico y de imágenes de satélite permite concluir que CA se localiza en una zona de intersección entre dos sistemas regionales de fractura (NNW-SSE y NE-SW), de hecho, su morfología *cuasi* triangular está controlada por la orientación de dichas fracturas y otra pequeña laguna seca se alinea con ella hacia el NE (Fig. 1). Además, la fractura reconocida en la cantera se puede continuar unos 5 km desde la misma hasta la Laguna de las Eras (Fig. 1), que, según Sanz-Montero *et al.* (2013) se dispone también siguiendo esa directriz tectónica.

Los análisis minerales del sustrato mioceno se muestran en la tabla I. El porcentaje de filosilicatos varía entre 35 y 55% y el de carbonatos (calcita y/o dolomita) es de 25-50%; los granos detríticos de cuarzo y feldespato suman 10-30% del total en peso. Las observaciones al mi-



Fig. 3. Aspecto de campo del sedimento lagunar de Caballo Alba en marzo de 2017. Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- Field view of the lake sediment, in March 2017. See color figure in the web.

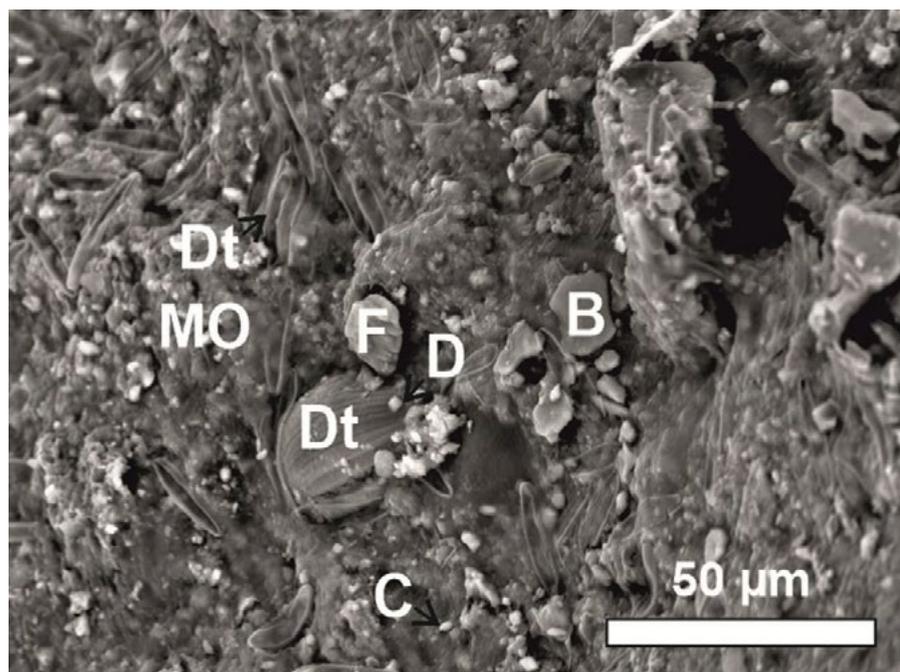


Fig. 4. Fotografía de microscopio electrónico (MEB) del sedimento de Caballo Alba. Dt: diatomea, D: dolomita, C: Calcita, F: Feldespato. B: Biotita. MO: Matriz orgánica.
 Fig. 4. SEM picture showing several features of the lake sediment in Caballo Alba. Dt: diatom. D: Dolomite. C: Calcite. F: Feldspar. B: Biotite. MO: Organic matrix.

croscopio petrográfico revelan que parte del contenido en calcita se debe a la presencia de ostrácodos en las muestras. Res-

pecto a la composición de las fases arcillosas, se ha determinado que existe siempre illita, palygorskita y sepiolita con trazas de clorita y caolinita. Se han registrado interstratificados R0 y tentativamente R1 de illita/esmectita. Así pues, el contenido en esmectita es muy reducido y se restringe, sobre todo, a la parte superior de la serie (cota 778-780 m).

Los sedimentos de la laguna de Caballo Alba poseen una gran diversidad mineralógica que se expone resumida en la tabla II. Este cortejo mineral se halla aglutinado en una matriz orgánica producida por los organismos que integran los tapices microbianos (Fig. 4).

Junto a los minerales, se pueden encontrar valvas de ostrácodos y frústulas de diatomeas. Estas últimas, son particularmente abundantes tras los episodios de proliferación primaveral (*algal blooms*). A grandes rasgos, el contenido en filosilicatos puede alcanzar proporciones notables de hasta el 70%. La presencia de determinadas fases minerales depende de la época del año, por ejemplo, $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$ (hidromagnesita) y los carbonatos sódicos como northupita ($Na_3Mg(CO_3)_2Cl$), trona ($Na_3(HCO_3)(CO_3) \cdot 2H_2O$) y natrón ($Na_2CO_3 \cdot 10 H_2O$), son típicos del estío; el yeso aparece todo el año, fundamentalmente en las orillas.

Las arcillas más abundantes son illita, palygorskita y esmectita, con trazas de clo-

rita, caolinita y sepiolita inferiores al 5%, a diferencia del Mioceno, donde el contenido en sepiolita es importante y el de esmectita se restringe a los interstratificados.

Desde el punto de vista hidroquímico (Tabla III), el cuerpo de agua aflorante en la cantera, con pH 9,5, se caracteriza como clorurado sódico y muestra concentraciones muy bajas respecto a las de la laguna (pH entre 9 y 10); sobre todo, en Cl^- , Na^+ y SO_4^{2-} . Es destacable que la proporción de As (0,17 ppm) es muy superior a la permitida en el agua potable (0,01 µg/mL) (Carretero, 2015).

Discusión

Nuestros resultados confirman que las estructuras NNW-SSE y NE-SW que se observan en la zona de estudio han controlado la formación de CA, descartando la hipótesis de erosión fluvio-eólica propuesta por Desir *et al.* (2003). Asimismo, la localización de una fractura en la cantera que se continua con otras lagunas de la zona, apoya la canalización de flujos subterráneos siguiendo las directrices tectónicas NNW-SSE (Fernández-Esca-

Mineral	% peso	% peso
Calcita	0-40	---
Dolomita	0-50	---
Cuarzo	0-10	---
Feldespato K	10-20	---
Filosilicatos	35-55	---

Arcilla	<2 µm	<0,5 µm
<i>Illita</i>	46-52	38-58
<i>Clorita</i>	2-3	0-4
<i>Caolinita</i>	3-5	0-6
<i>Sepiolita</i>	4-23	4-17
<i>Palygorskita</i>	21-35	13-45
<i>Int. R0 ill/esm</i>	3-16	0-22

Tabla I. Mineralogía de los sedimentos del sustrato Mioceno para 6 muestras. Las cursivas son resultados de agregados orientados de arcillas; indicándose las fracciones estudiadas.

Table I. Mineralogical composition of 6 samples of Miocene succession. Italics refer to oriented aggregate mounts of clays; studied fractions are indicated.

Mineral	% peso	% peso
Calcita	5-20	---
Dolomita	5-10	---
Hidromagnesita	0-30	---
Magnesita	0-5	---
Trona	0-15	---
Natron	0-10	---
Northupita	0-20	---
Halita	0-15	---
Yeso	0-40	---
Thenardita	0-35	---
Cuarzo	5-55	---
Feldespato K	5-30	---
Filosilicatos	20-70	---

Arcilla	<2 µm	<0,5 µm
<i>Illita</i>	30-65	20-40
<i>Palygorskita</i>	15-35	30-60
<i>Esmectita</i>	20-45	19-30

Tabla II. Mineralogía de los sedimentos de Caballo Alba para 12 muestras. Las cursivas son resultados de agregados orientados de arcillas; indicándose las fracciones estudiadas.

Table II. Mineralogical composition of Caballo Alba sediments for 12 samples. Italics refer to oriented aggregate mounts of clays.

Soluto (ppm)	Cantera	Laguna
F ⁻	2	1,8
Cl ⁻	60	1860
Br ⁻	0,15	4,4
NO ₃ ⁻	<0,25	<2
SO ₄ ²⁻	40	1550
CO ₃ ²⁻	---	700
HCO ₃ ⁻	---	1640
Na ⁺	100	2000
K ⁺	5,5	90
Mg ²⁺	35	190
Ca ²⁺	12	10
Si ⁴⁺	2,5	1,2
Al ³⁺	<0,02	---
Ba ²⁺	0,07	---
Fe ²⁺	0,025	---
Li ⁺	0,2	---
Sr ²⁺	0,8	---
S	15,5	6,8
As	0,17	---
P	<0,1	---

Tabla III. Hidroquímica del cuerpo de agua aflorante en la cantera de Villeguillo y de la laguna Caballo Alba. N° muestras cantera=1. N° muestras laguna=6

Table III. Hydrochemistry of the waterbody in Villeguillo quarry and lake Caballo Alba. Sample N° quarry=1. Sample N° lake=6.

lante, 2005). Estos flujos alimentan tanto las lagunas como el cuerpo de agua de la cantera, que recibiría aportes constantes como demuestra su carácter permanente y la baja salinidad registrada, incluso en verano. El alto valor de As detectado en esta agua es típico de los flujos profundos del acuífero de *Los Arenales* (Carretero, 2015). De este modo, se corrobora la conexión del cuerpo de agua de la cantera con el acuífero profundo a través de la fractura.

La concentración de los iones en la salmuera de CA es bastante mayor que en el cuerpo de agua de la cantera, revelando el intenso efecto de la evaporación en la laguna. La desecación de ésta favorece la degradación de los tapices microbianos, lo que induce la precipitación de distintas especies minerales, particularmente de carbonatos magnésicos (Sanz-Montero *et al.*, 2019). Por otro lado, cuando el fondo expuesto de CA se vuelve a inundar en otoño-invierno (Cabestrero, 2018), muchas de las fases minerales precipitadas anteriormente se disuelven con lo que la composición de la salmuera lacustre nunca refleja las características del agua subterránea. Así, una gran parte de los sedimentos lagunares no se conservan de un año para otro y, por tanto, no se preservarían ni acumularían en el registro geológico. Se ha visto que en profundidad fundamentalmente permanecen los carbonatos de Ca y Mg, el yeso y las arcillas. Estas últimas incluyen tanto sedimentos heredados detríticos como fases autigénicas.

La existencia de fases arcillosas autigénicas se pone de manifiesto al comparar la mineralogía del sustrato Mioceno con las arcillas del sedimento de CA. La presencia de sepiolita e interestratificados de illita/esmectita en el sustrato no se corresponde con los depósitos lagunares. Además, la mayor cantidad de esmectitas en CA respecto al sustrato, más patente en la fracción <0,5 µm (Tabla II), apoya un origen autigénico para dichos minerales en la laguna. En este mismo sentido, redundan la ausencia de esmectitas descrita por Del Buey *et al.* (2019) en los depósitos de la laguna de las Eras, que se dispone en un entorno geológico semejante (Sanz Montero *et al.*, 2013).

Conclusiones

Las fracturas regionales NNW-SSE han determinado la formación de las cubetas de la laguna Caballo Alba y otras de su entorno y representan las principales vías de aporte de agua a éstas.

Desde el punto de vista hidroquímico, las aguas de las lagunas se clasifican como clorurado sódicas, alcalinas y ricas en Mg.

Estas condiciones favorecen la precipitación de carbonatos de magnesio y sodio, sulfatos y otras sales más solubles. Además, la mayor abundancia de esmectitas en la laguna que en los afloramientos miocenos, sugiere que hay autigénicas de esmectitas.

El presente estudio refleja la complejidad de los ambientes sedimentarios lacustres y ayuda a la interpretación de facies análogas en el registro geológico.

Agradecimientos

Se agradece la financiación de los proyectos CGL2015-66455-R y Grupo de Investigación UCM 910404, la foto y otras aportaciones del Dr. O. Cabestrero, los comentarios sobre mineralogía de arcillas del Dr. X. Arroyo y las revisiones realizadas por los Dres. José Pedro Calvo y M. Ángeles García del Cura.

Referencias

- Alonso-Gavilán, G., Armenteros, I., Carballera, J., Corrochano, A., Huerta, P. y Rodríguez, J. (2004). En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 550-556.
- Cabestrero, Ó. (2018). *Mineralogénesis, procesos geobiológicos y evolución sedimentaria en lagunas salinas del centro peninsular (Cuenca del Duero y Guadiana)*. Tesis Doctoral. 186 p.
- Cabestrero, O. y Sanz-Montero, M.E. (2018). *Journal of Paleolimnology* 59, 139-157.
- Carretero, M.C. (2015). *Hidro-geoquímica de aguas subterráneas de un sector de la Cuenca del Duero con altos niveles de arsénico*. Tesis Doctoral. Univ. Valladolid. 339 p.
- Del Buey, P., Cabestrero, Ó. y Sanz-Montero, M.E. (2019). *34 IAS Congress. Roma*. Abstracts, 1317.
- Desir, G.M., Gutiérrez Elorza, M. y Gutiérrez Santaolla, F. (2003). *Boletín Geológico y Minero* 1-14, 395-407.
- Fernández-Escalante, E. (2005). *Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales: Criterios técnicos derivados de la experiencia en la cubeta de Santiuste (Segovia)*. Tesis Doctoral. UCM, 1331 p.
- IGME (2015). *Masa de agua 45 Los Arenales. Actividad 2*. IGME y Dirección General de Agua. 114 p.
- IGME y SIEMCALSA (2016). *Mapa de rocas y minerales industriales de Castilla y León*. IGME. N° explotación 1867.
- Portero, J.M., Carreras, F., Olivé, A. y del Olmo, P. (1982) *Mapa Geológico de España 1:50.000, Hoja 428 (Olmedo)*. IGME, Madrid. 56 p.
- Sanz-Montero, M.E. *et al.* (10 más). (2013). *Geogaceta* 53, 97-100.
- Sanz-Montero, M.E., Cabestrero, Ó. y Sánchez-Román, M. (2019). *Frontiers in Microbiology* 10, 148.