

Procesos de sedimentación y biomineralización en la laguna alcalina de las Eras (Humedal Coca-Olmedo)

Sedimentation and biomineralization processes in Las Eras Lake (Coca-Olmedo wetland)

M. Esther Sanz-Montero¹, Xabier Arroyo², Óscar Cabestrero³, J. Pedro Calvo¹, Enrique Fernández-Escalante⁴, Concepción Fidalgo⁵, M. Angeles García-del-Cura⁶, Javier García-Avilés⁷, J. Antonio González-Martín⁵, J. Pablo Rodríguez-Aranda¹ y J. Vicente Rovira⁷

¹ Departamento de Petrología y Geoquímica, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Novais, 2. 28040 Madrid, España. mesanz@geo.ucm.es

² CAI de Geología, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Novais, 2. 28040 Madrid, España. xarroyo@geo.ucm.es

³ REPSOL, C/ Laguna, 2. 28923 Alcorcón (Madrid), España. oscarcabestrero@gmail.com

⁴ Departamento de Estratigrafía, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Novais, 2. 28040 Madrid, España. aefernan@geo.ucm.es

⁵ Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid, Avenida Tomás y Valiente, 1. Cantoblanco, 28049 Madrid, España. juanantonio.gonzalez@uam.es

⁶ IGEO (CSIC-UCM) C/ José Antonio Novais, 2. 28040 Madrid, España. agcura@geo.ucm.es

⁷ Departamento de Ecología, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Novais, 2. 28040 Madrid, España. hecaro@bio.ucm.es

ABSTRACT

Las Eras Lake is one of the small and shallow bodies of water, which form the highly alkaline Coca-Olmedo wetland (Duero Basin), a unique feature within Europe. The lake brine is a Na-Mg-Cl-SO₄ type. The lake hosts benthic microbial mats and its surface shows microbially influenced sedimentary structures (MISS). Associated with the microbial mats, several authigenic minerals are recognized such as thenardite, hydromagnesite, magnesium-bearing sulphate and phosphate, halite and sulphur. Among these we highlight the occurrence of natron and trona because the sodium-bearing carbonates are uncommon in the European region. The scanning electron microscopy study reveals that the minerals are closely related to microbial structures, suggesting some influence of microorganisms in the mineral precipitation. Recent microbial mats as those hosted in Las Eras Lake are good analogues for understanding geobiological processes. Knowledge of these processes provides a model for paleoenvironmental reconstruction of alkaline endorheic lakes that have existed since the Archean.

Key-words: Soda-lake, microbial mats, trona, biosedimentation, magnesium-bearing biominerals.

RESUMEN

La Laguna de Las Eras es uno de los pequeños y someros cuerpos de agua, que forman el humedal de la zona Coca-Olmedo (cuenca del Duero), caracterizado por su elevada alcalinidad, lo que constituye un rasgo singular dentro de Europa. La laguna presenta una salmuera de tipo Na-Mg-Cl-SO₄ y su superficie está colonizada por tapices microbianos, donde se desarrollan estructuras sedimentarias inducidas por los microorganismos (MISS). Se reconocen diversos minerales autígenicos asociados a los tapices: thenardita, hidromagnesita, sulfatos y fosfatos magnésicos, azufre y halita. Junto a éstos destacan, por ser carbonatos atípicos en Europa, natrón y trona. El estudio petrográfico de los precipitados revela que éstos guardan una estrecha relación con las estructuras microbianas, sugiriendo cierta influencia de los microorganismos en la precipitación mineral. Los tapices microbianos de la laguna de Las Eras constituyen buenos análogos para comprender los procesos geobiológicos y ahondar en la reconstrucción paleoambiental de los lagos alcalinos que han existido desde el Arcaico.

Palabras clave: Lago sódico, trona, tapiz microbiano, biosedimentación, biominerales magnésicos.

Geogaceta, 53 (2013), 97-100.

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 12 de julio de 2012

Fecha de revisión: 25 de octubre de 2012

Fecha de aceptación: 30 de noviembre de 2012

Introducción

Los lagos alcalinos son cuerpos de agua comúnmente someros y endorreicos que presentan valores de pH que suelen oscilar entre 8,5 y 12. Estos valores elevados pueden producirse por mecanismos de origen microbiano o químico (Jones *et al.*, 1998). Dichos lagos se caracterizan, en general, por sus altas concentraciones de Na, y bajas de Mg y Ca, en comparación con el agua del mar (Jones *et al.*, 1998; Arp *et al.*, 1999). A pH elevados, las salmueras se enriquecen

en cloruro, carbonato y/o sulfato que se unen con los iones de sodio disueltos, lo que favorece la precipitación de carbonato sódico. Por ello, estos lagos se denominan también lagos sódicos (*soda lake*). Dadas las condiciones extremas de alcalinidad, son pocos los seres que habitan en dichos lagos. Entre éstos se encuentran determinados microbios (Guerrero y De Wit, 1992; Jones *et al.*, 1998), que se pueden agrupar, formando tapices bacterianos. A pesar de las condiciones hostiles en las que habitan, se da la paradoja de que los lagos alcalinos re-

presentan uno de los medios más productivos de biomasa del mundo (Jones y Grant, 1999).

Los lagos sódicos son relativamente escasos y están confinados a ciertas regiones geográficas (Zavarzin, 1993). Así, la presencia de este tipo de lagos se restringe, en el continente europeo, al complejo lagunar que se ubica en la Cuenca del Duero denominado "Complejo Coca-Olmedo" (Rey Benayas, 1991) por extenderse entre estas localidades. El complejo, con valores de pH superiores a 9,5, es de marcado carácter al-

calino (Bernáldez y Rey, 1992; Guerrero y De Wit, 1992; Velasco *et al.*, 2004; Fernández Escalante, 2005). Según Bernáldez y Rey (1992), la alcalinidad se debe a que dichas lagunas se alimentan mediante flujos de agua subterráneos de largo recorrido que contienen altas concentraciones de carbonato, bicarbonato y sodio.

A pesar de la peculiaridad de estas lagunas, sus características sedimentarias han sido escasamente estudiadas. En este trabajo se hace un estudio mineralógico y geoquímico de los sedimentos de la laguna de Las Eras y de sus aguas en el periodo 2010-2012. Además, se describen las estructuras sedimentarias presentes en relación con los tapices microbianos que colonizan su fondo.

Área de estudio

A una altura media de 780 m, la laguna de las Eras ocupa una depresión natural somera, con menos de 1 m de profundidad, y fondo plano, al oeste de la localidad de Villagonzalo de Coca (Segovia) (Fig. 1).

Esta área se incluye dentro de la región subhúmeda caracterizada por un clima mediterráneo degradado por su continentalización y altura.

La laguna se emplaza en un ámbito climático perteneciente a la serie supra - mesomediterránea de *Quercus ballota*, faciación sobre arenales con *Adenocarpus aureus* (Rivas Martínez, 1987). Sin embargo, en la actualidad y como en otras áreas de la zona, domina en las márgenes la superficie dedicada a los cultivos y de forma muy dispersa aparecen prados húmedos del *Molinium-Holoschoenion*, junto con pastizales de *Juncetalia maritimi*, totalmente mediados por la presión antrópica y con intrusiones de especies cultivadas.

La laguna se asienta sobre materiales terciarios constituidos por arcillas arenosas grises oscuras y limos, con altos contenidos en materia orgánica, depositados en el sector suroccidental de la Cuenca del Duero durante el Mioceno medio. Los materiales terciarios aparecen localmente recubiertos por depósitos arenosos cuaternarios que forman parte de un amplio sistema dunar correspondiente a la Formación Arévalo (Portero *et al.*, 1982; Desir *et al.*, 2003).

La depresión es de morfología alargada (Fig. 1), con dos cuencos separados en épocas de aguas bajas. La orientación N15W del eje principal se adapta a la directriz tec-

tónica dominante en esta Unidad Hidrogeomorfológica (Acuífero de los Arenales), lo que refleja su origen tectónico (Fernández Escalante, 2005). Alternativamente, Desir *et al.* (2003) sugieren que el origen de la depresión se debe a deflación eólica.



Fig. 1.- Situación geográfica de la laguna de Las Eras.

Fig. 1.- Geographic location of Las Eras lake.

De acuerdo con Fernández Escalante (2005), el acuífero que alimenta principalmente la laguna tiene aportes de aguas subterráneas de largo recorrido que se mueven desde el Sistema Central hacia el Terciario Detrítico de la Cuenca Duero. Así, las aguas subterráneas con largos periodos de residencia y áreas fuente cristalinas van aumentando su salinidad por envejecimiento. Este acuífero presenta una extensión superior a 1500 km², espesores variables, alta permeabilidad y elevado coeficiente de almacenamiento. Por otro lado, el carácter endorreico de la laguna facilita la captación de agua de lluvia, por tanto la extensión del humedal y el espesor de la lámina de agua tienen un marcado carácter estacional y una cierta relación con el carácter hidrológico de los distintos años.

Las lagunas de Coca-Olmedo están incorporadas en la Red Natura 2000, por su buena representación de hábitats halófilos y por sus condiciones extremas que facilitan la aparición de endemismos. Un valor ecológico añadido es que este complejo lagunar sustenta destacadas comunidades de aves acuáticas como ánade real, focha, zampullín chico, etc.

Métodos

Se han realizado tres campañas de campo para el estudio de las lagunas del complejo: una previa en el invierno (diciembre) de 2010 y dos sistemáticas en invierno (diciembre) y primavera-verano (junio) de

2012. Los valores de pH del agua medidos en junio oscilan entre 8,5 y 9,6 lo que confirma la elevada alcalinidad del complejo lagunar.

La metodología utilizada para el análisis del agua correspondiente al invierno ha sido: Los aniones se analizaron por electroforesis, los cationes por absorción atómica y los carbonatos y bicarbonatos por valoración.

Las muestras de sedimento se han analizado mediante Difracción de Rayos X (DRX), lupa binocular y microscopía electrónica de barrido, en modo de electrones secundarios (se) y retrodispersados (bse) y microanálisis por energías dispersivas (EDS).

Descripción limnológica

Hidroquímica

Los análisis químicos de agua efectuados en la laguna indican que el contenido en sales 13,29 g/L corresponde a aguas salinas. Los resultados de la composición iónica obtenidos son, en meq: Cl⁻:107,36; SO₄²⁻:75,84; NO₃⁻:0,13; HCO₃⁻:12,00; Ca²⁺:0,70; K⁺:21,40; Mg²⁺:27,65; Na⁺:166,61. Esta composición define a una salmuera de tipo Na-Mg-Cl-SO₄.

Estructuras sedimentarias

El sedimento de la laguna está cubierto por tapices microbianos bentónicos fototróficos de 0,5 cm de espesor máximo en los que se reconocen una lamina superior cohesiva de color verde, formada por cianobacterias filamentosas y las sustancias poliméricas que ellas generan. Bajo éstas, se diferencia una lámina gelatinosa de color púrpura, posiblemente formada por bacterias rojas sulfúreas. El tapiz fototrófico recubre una capa de sedimento con colores oscuros donde prevalecen procesos de sulfato reducción. Durante el estío, la laguna puede desecarse por completo y su superficie se encuentra cubierta por precipitados masivos de textura pulverulenta, de color blanco que, en algunas zonas, coexisten con productos de color amarillo. En estos casos, la superficie, cubierta por los tapices microbianos, se encuentra completamente fragmentada en polígonos de desecación de unos 5 cm de profundidad (Fig. 2). Los polígonos son irregulares en cuanto a morfología y tamaño. Muchos de ellos no se hallan delimitados por completo y presentan



Fig. 2.- Superficie de la laguna donde se observan los minerales y estructuras sedimentarias bioinducidas durante el estío.

Fig. 2.- Bioinduced minerals and sedimentary structures in the lake bottom (dry season).

fracturas irregulares de menor orden. Los bordes de los polígonos pueden despegarse a favor de la capa más cohesiva del tapiz, donde predominan las cianobacterias, y curvarse hacia arriba (*mat curls*).

Algunos de los fragmentos de tapiz despegados (*mat chips*) se encuentran desplazados cortas distancias, probablemente por efecto del viento. Tras las épocas de lluvia, se forman acumulaciones de fragmentos enrollados a modo de cilindros (*roll up*) protegidos por la vegetación de las orillas, mientras que una extensa parte de la superficie queda desprovista de la capa superior de tapices por erosión.

Mineralogía

Los minerales autigénicos presentes en el sedimento de La laguna de las Eras son: sulfato sódico (thenardita), carbonatos sódicos (natrón y trona), halita y fosfatos magnésicos, en invierno. En junio se han reconocido carbonatos magnésicos (hidromagnesita) y sódicos (natrón), sulfato magnésico (*starkeyite*), calcita, halita y azufre que predomina en los centímetros superiores del sedimento. Los minerales detríticos son cuarzo, filosilicatos (illita) y feldspatos. Junto a estos minerales se encuentran frústulas de diatomeas con rasgos de disolución y restos de organismos pluricelulares (Fig. 3). Los más comunes son oogonios de ca-

rofitas, valvas de ostrácodos de composición calcítica (Fig. 3A). Las oogonios (Fig. 3B) son muy numerosos y podrían corresponder a *Chara canescens*, especie que ha sido descrita en esta laguna (Cirujano *et al.*, 2007). Éstos no presentan su capa externa calcificada y sólo muestran una interior de color oscuro y composición orgánica.

La thenardita, que es la fase autigénica que predomina en el invierno, aparece como agregados de cristales prismáticos de 10 a 15 μm de longitud embebidos en una matriz orgánica. En general, son cristales de subidiomorfos a idiomorfos que ocasionalmente muestran rasgos de disolución.

En el estío predomina la hidromagnesita. Típicamente se caracteriza por formar agregados, al azar, de cristales idiomorfos prismáticos de hasta 100 μm de longitud. Los cristales se entremezclan con filamentos orgánicos (Fig. 4A) y se asocian a precipitados dispersos de carbonato sódico y a agrupaciones de granos de azufre nativo (Fig. 4B).

Los minerales de carbonato sódico se presentan como cristales subidiomorfos de hasta 30 μm (Fig. 4B). Son cristales de morfología subtabular y bordes redondeados. Se encuentran como individuos aislados en cantidades inferiores al 10%.

La calcita es escasa y, además de estar en las conchas de ostrácodos (Fig. 3A), aparece como bolas micríticas.

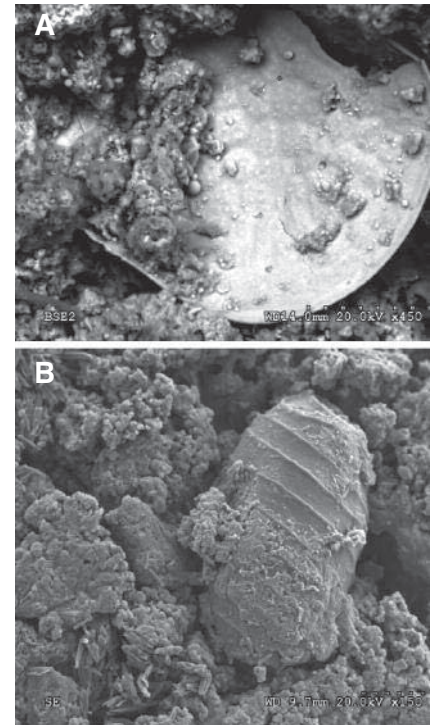


Fig. 3.- Ostrácodo (A) y oogonio de carofita (B) asociado a carbonato magnésico (flechas).

Fig. 3.- Ostracod remains (A) and charophyte oogonia (B) close to magnesium carbonate (arrowed).

Fosfatos magnésicos: forman ramilletes de cristales idiomorfos, de hasta 70 μm de longitud, con formas de aciculares a tabulares. Se encuentran entrecrecidos con filamentos orgánicos (Fig. 4C)

Cristales cúbicos de halita, que muestran tamaños medios de 5 μm , suelen aparecer como cemento entre las fases descritas.

Discusión y consideraciones finales

La laguna alcalina de las Eras tiene bajas concentraciones de Ca y elevadas de Na y Mg por lo que se puede catalogar como sódica. Sin embargo, con elevados contenidos de magnesio, esta laguna no se configura como un lago alcalino típico, que suele carecer de cationes divalentes (Jones *et al.*, 1998; Arp *et al.*, 1999). La composición iónica de la laguna favorece la singular precipitación, en paragénesis, de carbonatos sódicos y magnésicos. A las fases carbonáticas se asocian sulfatos y fosfatos magnésicos.

El sedimento contiene organismos típicos de ambientes de salinidad moderada como carofitas y ostrácodos. A su vez, la su-

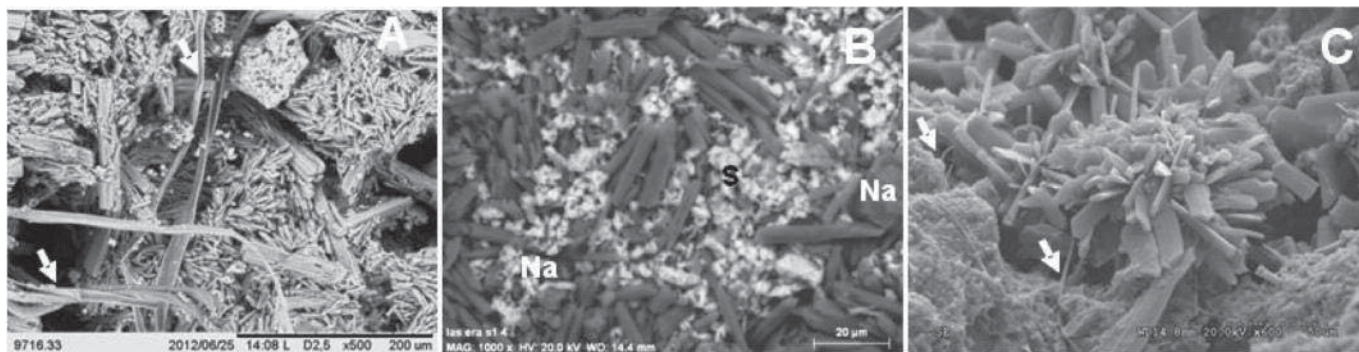


Fig. 4.- Fotografías tomadas con SEM de minerales precipitados en los tapices que se asocian a filamentos (flechas). A) Carbonato magnésicos. B) Carbonatos magnésicos (prismas) y sódicos (Na) junto a granos de azufre (S). C) Cristales de fosfato magnésico formando agregados.

Fig. 4.- SEM images showing minerals precipitated in close association with filaments in the microbial mats (arrowed). A) Magnesium carbonates. B) Prismatic magnesium carbonates and sodium carbonate (Na) mixed with sulphur grains (S). C) Aggregates of magnesium-phosphate crystals.

perficie del sedimento se encuentra colonizada en toda su extensión por tapices cianobacterianos que incluyen, como es común, diatomeas. La presencia de tapices determina la formación de estructuras sedimentarias típicas que también han sido descritas en lagunas salinas de La Mancha (Sanz-Montero *et al.*, 2012a). Esta semejanza permite contrastar los resultados y ampliar la representatividad de las morfologías sedimentarias descritas a distintos ambientes salinos.

Las trazas de bioturbación por escarabajos, que se alimentan posiblemente de los microorganismos que forman los tapices, también son comunes en ciertas lagunas manchegas (Sanz-Montero *et al.*, 2012b).

La textura y la falta de precursores, apoya que el sulfato sódico presente en la laguna, es un precipitado primario. Por su parte, sulfatos magnésicos, como los de esta laguna, son comunes en las lagunas toledanas, donde también suelen aparecer asociados a halita, carbonatos y azufre (Sanz-Montero *et al.*, 2011). Los autores proponen que este cortejo mineral se forma con implicación de las bacterias que juegan un papel en el ciclo del azufre.

Generalmente, las fases descritas se hallan en relación directa con los tapices microbianos en los que han precipitado. Algunos minerales se encuentran recubiertos de filamentos cianobacterianos y en muchos casos, aparecen directamente dispuestos sobre superficies orgánicas. Diversos trabajos apoyan la implicación de determinados microbios en la formación de minerales. Es el caso de la hidromagnesita que, en sedimentos más antiguos, se encuentra trans-

formada a la fase más estable, magnesita, (Sanz-Montero y Rodríguez-Aranda, 2011).

Estos minerales coexisten en espacios reducidos, lo que sugiere microambientes geoquímicos muy específicos, que podrían estar favorecidos por la presencia de distintos grupos de microorganismos.

Los resultados del estudio inicial de esta laguna confirman el elevado potencial del este complejo lacustre de Coca-Olmedo para profundizar en los procesos de formación mineral y biomineral en este tipo de ambientes alcalinos que, posiblemente, llevan establecidos en la Tierra desde el Arcaico (Zavarzin, 1993). Específicamente, minerales como el carbonato magnésico y la thenardita son relativamente abundantes en las cuencas terciarias españolas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con el proyecto CGL 2011-26781 (Ministerio de Economía y Competitividad).

Referencias

- Arp, G., Reimer, A. y Reitner, J. (1999). *European Journal Phycology*, 34, 393-403.
- Bernáldez, F.J. y Rey, J.M. (1992). *Geoderma*, 55, 273-288.
- Cirujano, S., García, P., Meco, A. y Fernández, R. (2007). *Anales Jardín Botánico de Madrid*, 64, 87-102.
- Desir, G., Gutiérrez-Elorza, M. y Gutiérrez Santolalla, F. (2003). *Boletín Geológico y Minero*, 114, 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 Cuesta de Santiuste (Segovia). Tesis Doctoral. UCM, 350 p.

- Guerrero, M.C. y De Wit, R. (1992). *Limnetica*, 8, 197-204.
- Jones B.E. y Grant, W.D. (1999). En: *Microbial Biosystems: New Frontiers* (C.R. Bell, M., Brylinsky y J.P. Johnson-Green, Eds.). Halifax, Canada, 681-687.
- Jones, B.E., Grant, W.D., Duckworth, A.W. y Owenson, G.G. (1998). *Extremophiles*, 2, 191-200.
- Portero, J.M., Gutierrez Elorza, M. y Molina, E. (1982). *Mapa Geológico de España 1: 50.000, hoja nº 455 (Arévalo) y memoria 2ª Serie. CGS-IMINSA*.
- Rey Benayas, J.M. (1991). *Agua Subterráneas y Ecología. Ecosistemas de descarga de Acuíferos en Los Arenales*. ICONA.-CSIC. Colección Técnica ICONA - MAPA. 141 p.
- Rivas Martínez, S. (1987). *Serie de vegetación de España*. ICONA Mº de Agricultura, Pesca y Alimentación. Serie Técnica, Madrid, 268 p.
- Sanz-Montero, M.E. y Rodríguez-Aranda, J.P. (2011). *Sedimentary Geology*, 263, 6-15.
- Sanz-Montero, M.E., García del Cura, M.A., Calvo, J.P. y Rodríguez-Aranda, J.P. (2011). Comunicaciones 28th IAS Meeting of Sedimentology.
- Sanz-Montero, M.E., García del Cura, M.A., Rodríguez-Aranda, J.P. y Calvo, J.P. (2012a). *Geotemas*, 13, 167-170.
- Sanz-Montero, M.E., Rodríguez-Aranda, J.P., García del Cura, M.A. y Calvo, J.P. (2012b). *Geotemas*, 13, 171-174.
- Velasco, J.L., Soriano, O., Fernández, J. y Rubio, A. (2004). *Ecología*, 18, 21-34.
- Zavarzin, G.A. (1993). *Microbiologist*, 62, 473-479.