

SEDIMENTOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA DE LAS LAGUNAS DE “EL CRISTO” Y DE “LA CERVERA” (SALAMANCA)

*[Sedimentology and hidrogeochemistry of the El Cristo and La Cervera ponds
(Salamanca, Spain)]*

Margarita JAMBRINA (*)

Ángel CORROCHANO (*)

Ildefonso ARMENTEROS (*)

(*): Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Pl. de la Merced, 1. 37008 Salamanca, España. (Correo-e: margajambrina@usal.es, corro@usal.es, ilde@usal.es)

(FECHA DE RECEPCIÓN: 2009-07-27) (FECHA DE ADMISIÓN: 2009-09-24)

BIBLID [0211-8327 (2009) 46 (1); 25-45]

RESUMEN: Las lagunas de El Cristo y de La Cervera se disponen sobre sedimentos detríticos neógenos-cuaternarios de la cuenca de Ciudad Rodrigo. Su origen responde a un modelo de formación de tipo “hidroeólico” y tuvo lugar probablemente durante el Cuaternario reciente. Su génesis se vio favorecida por el marco geotectónico y la litología del substrato, la geomorfología plana de su entorno y el clima árido-semiárido de la zona, con régimen de viento de dirección NE-SO).

Sus aguas son del tipo HCO_3^- - Cl^- - Ca^{2+} , con TDS (total de sólidos disueltos) entre 124 y 164 mg/L y pH medio 9,61 para la laguna de El Cristo y pH 7,6 para la charca de La Cervera. Los valores pesados de $\delta^{34}\text{S}$ en el sulfato disuelto indican un predominio de reacciones de reducción de sulfato. Los valores bajos de $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ sugieren el predominio de procesos de respiración y oxidación de MO emparentada con plantas que usan el ciclo C3 en sus procesos vitales. La difracción de RX de roca total revela que el sedimento de estas lagunas está dominado por cuarzo, con menores proporciones de feldespato. La fracción < 2 micras está principalmente representada por caolinita, algo de illita y, ocasionalmente, por esmectita en el entorno de la laguna. Las características hidrogeológicas, el marco geológico, la composición del agua y la mineralogía de los depósitos lagunares indican sistemas lagunares abiertos donde la recarga y descarga se producía por flujos subterráneos.

Palabras clave: Lagunas de El Cristo y de La Cervera, hidrogeoquímica, sedimentología, cuenca de Ciudad Rodrigo, Salamanca.

ABSTRACT: The El Cristo and La Cervera ponds lie on the Neogene clastic deposits of the Ciudad Rodrigo basin. Their origin matches a hydroeolic model and the ponds were probably developed during the recent Quaternary. The neotectonic framework, the substrate lithology, the flat geomorphology and the semiarid regime with winds along the NE-SW trend favoured their genesis. The composition of water is of HCO_3^- - Cl^- - Ca^{2+} type, with 124 to 164 mg/L for TDS (total dissolved solids), and an average pH 9.61 for the El Cristo pond and 7.6 for the La Cervera pond. The high values of $\delta^{34}\text{S}$ in the dissolved sulphate suggest the importance of the bacterial sulphate reduction in the pond floor. The low $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values indicate the predominance of respiration processes and organic matter oxidation related to plants with C3 metabolism. The XRD data of whole rock from the pond sediments indicate that quartz is the main component with lesser proportion of K-feldspar and clays. The sediment fraction $< 2 \mu\text{m}$ is mainly represented by kaolinite, some illite and, in the exposed marginal sediments, smectite. The hydrological features, the geological framework, the water composition, and the mineralogy of the pond deposits indicate an open lacustrine system where the recharge and discharge were mainly underground.

Key words: El Cristo and de La Cervera ponds, hydrogeochemistry, sedimentology, Ciudad Rodrigo basin, Salamanca.

INTRODUCCIÓN

Las lagunas de El Cristo y de La Cervera son dos espacios naturales protegidos de la Comunidad de Castilla y León, situados en el sector sur occidental de la provincia de Salamanca cerca de Aldehuela de Yeltes. La importancia de los sistemas lacustres actuales como reserva de biodiversidad ha suscitado la aparición de numerosos estudios que se centran en aspectos biogeográficos y ecológicos, siendo en este ámbito del conocimiento donde se concentran los datos bibliográficos de ambas lagunas (ALONSO, 1998; ALONSO & COMELLES, 1987; CIRUJANO *et al.*, 1992). Sin embargo, es un hecho que los trabajos de índole sedimentológica e hidrogeoquímica sobre las lagunas de la región castellano-leonesa son escasos y sólo desarrollan parcialmente este enfoque. El presente trabajo se centra en estos aspectos, al tiempo que se analiza el origen de estas lagunas de la "Región de La Dehesa", comúnmente denominadas "charcas ganaderas", aunque la investigación se ha centrado principalmente en la laguna de El Cristo.

El substrato de ambas lagunas está constituido por materiales cenozoicos del sector central de la cuenca de Ciudad Rodrigo (Fig. 1). Esta cuenca es una depresión orientada de NE a SO, que se formó en el Terciario por el hundimiento de grandes bloques del basamento paleozoico durante la Orogenia Alpina. Su relleno, constituido por materiales del Terciario y Cuaternario, está integrado de muro a techo por las siguientes unidades (MARTÍN SERRANO, 1988): 1) Serie detrítica del Paleógeno (Eoceno-Oligoceno),

compuesta por conglomerados, areniscas y lutitas que están discordantes o inconformes sobre diferentes unidades del zócalo paleozoico. 2) *Series Rojas* (Mioceno inferior-medio), discordantes sobre la anterior, compuestas por lutitas, arenas lutíticas y conglomerados silíceos. 3) *Series Ocreas* (Mioceno superior-Plioceno), disconformes sobre la unidad inferior, constituida por una sucesión conglomerática compuesta por gravas cuarcíticas derivadas de la Cuarcita Armonicana, arenas y lutitas ocreas. 4) Depositos aluviales de piedemonte, conocidos como "raña", y los fluviales cuaternarios. Sin embargo, estos últimos materiales no se distinguen fácilmente de los conglomerados de las *Series Ocreas*, debido a la semejanza de rasgos petrológicos, mineralógicos y sedimentológicos, por un lado, y a que forman una sucesión estratigráfica con una evolución secuencial que enmascara las interrupciones sedimentarias, aunque hay autores que señalan la ausencia de éstas (MARTÍN-SERRANO, 1991).

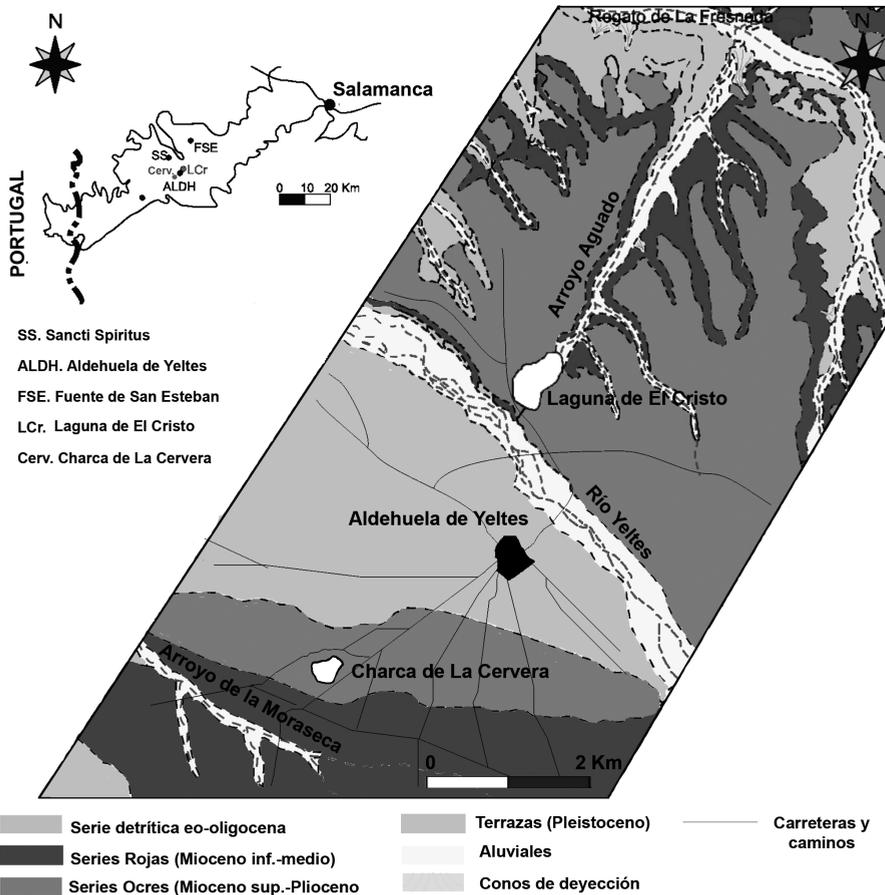


Figura 1. Situación geográfica y geológica de las lagunas de El Cristo y de La Cervera.

Para el estudio hidrogeoquímico se seleccionaron nueve puntos de muestreo a lo largo del perímetro de la laguna de El Cristo y uno sólo en la charca de La Cervera, realizándose tres campañas: julio y septiembre de 2007, y mayo de 2008, correspondientes a niveles mínimos y máximos de agua respectivamente (Fig. 2). La toma de muestras de agua superficial se efectuó a unos 20 m desde la orilla, en botellas de polietileno doblemente selladas, de capacidad variable entre 1-5 litros, que fueron posteriormente refrigeradas a 4 °C para evitar modificaciones en su composición química y prevenir la actividad biológica y microbiológica antes de efectuar los análisis en laboratorio.

La caracterización química del agua se realizó in situ y en laboratorio, dependiendo de las variables a medir. La temperatura, pH, conductividad y SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} fueron medidos in situ. El pH y la temperatura se midieron mediante un pH-metro portátil marca Hanna modelo HI 9023 equipado con un electrodo de pH y una sonda de temperatura, con una precisión de $\pm 0,01$ pH y $\pm 0,4$ °C. La conductividad fue medida mediante un conductímetro marca CRISON, modelo CDTM 523. Los contenidos en sulfatos, nitratos y fosfatos fueron determinados con un fotómetro de filtro PF-11 marca Macherey-Nagel, con rango de medida ± 2 E y de lectura directa en mg/L, con rangos de medida entre 20-200mg/L SO_4^{2-} , 4-120 mg/L NO_3^- y 2-25 mg/L PO_4^{3-} .

La determinación analítica de HCO_3^- y de Cl^- se realizó mediante volumetría con HCl y volumetría con AgNO_3 respectivamente. Para el análisis de los cationes y del Si, las muestras se pasaron a través de un filtro de 0,45 μm y se acidificaron con ácido nítrico para su mantenimiento hasta el momento de su determinación. Los elementos más abundantes se analizaron por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), y los elementos traza, por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Ambos análisis fueron realizados en el Laboratorio de Análisis Químicos de la Universidad de Salamanca.

Los isótopos estables determinados fueron $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ y $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ en el sulfato y $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ del carbono inorgánico disuelto (DIC). Las muestras previamente se pasaron por filtros de 0,45 μm . El método de obtención de sulfatos en agua para determinar $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ y $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ se basa en la precipitación de SO_4^{2-} en forma de sulfato de bario (BaSO_4) (CLARK & FRITZ, 1997). La extracción de carbonato disuelto en el agua para el análisis de $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ se realizó a partir de su precipitación en forma de SrCO_3 . Su preparación y análisis fueron realizados en el Laboratorio de Isótopos Estables de la Universidad de Salamanca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RELLENO LAGUNAR

El relleno sedimentológico de la laguna de El Cristo está formado mayoritariamente por fangos compuestos por partículas de cuarzo y, en menor proporción, de arcilla y feldespato (véase Tabla 1). El cortejo arcilloso lo forman caolinita y, en menor porcentaje, illita que reflejan un origen detrítico. Estos sedimentos finos se asientan sobre un horizonte de cantos de

cuarcitas, que probablemente representan una formación residual de un antiguo nivel expuesto del fondo de la depresión lagunar.

Por su similitud mineralógica con los sedimentos que constituyen el substrato litológico de la laguna, los sedimentos del relleno actual lagunar proceden de la erosión de la formación clástica sobre la que se asienta (Raña-Series Ogres). Los materiales erosionados de las áreas adyacentes a la laguna por la escorrentía superficial (época de lluvia) y por la acción eólica (periodos de sequía) fueron transportados hacia el interior de la cubeta, contribuyendo a la acumulación residual del cantoral cuarcítico en la zona supralitoral expuesta normalmente de la laguna y a la sedimentación lagunar de carácter fino.

Muestra	Mineralogía						
	Cuarzo	Moscovita	Feldespato	Caolinita	Illita	Esmectita	
S1	1	xxx	t	t	x	x	-
	2	xxx	t	x	x	x	-
	3	xxx	t	x	x	x	-
	4	xxx	t	x	x	x	-
S2	5	xxx	t	t	x	x	-
	6	xxx	t	t	x	x	-
S3	7	xxx	t	t	x	x	-
	8	xxx	t	t	x	x	-
LCr3	xxx	t	t	x	x	-	
LCr4	xxx	t	t	x	x	-	
LCr16	xxx	t	t	x	x	x	

xxx, dominante (>50%); xx, abundante (50-25%); x, presente (<25%)
t, traza (<5%); (-) no detectado.

Tabla 1. Composición mineralógica para roca total y fracción < 2µm.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA

Los análisis hidroquímicos de campo y laboratorio se resumen en el Apéndice 1.

Los valores medios de pH en la laguna de El Cristo son 9,61 ($T_{\text{media}} = 22,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$) para el muestreo de julio y 9,63 ($T_{\text{media}} = 24,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$) para el muestreo de mayo, y otros casi neutros para la laguna de La Cervera (pH 6,78). La conductividad varía desde 194 a 257 µS/cm, que se traduce en el total de sólidos disueltos (TDS) a un intervalo entre 124 a 164 mg/L.

La concentración media de nitratos en la laguna de El Cristo presenta valores < 4 mg/L para el muestreo de julio y septiembre, y 7 mg/L para el muestreo de mayo. En la laguna de La Cervera, los valores se mantienen constantes para las distintas campañas realizadas, con valores < 4 mg/L. La concentración de fosfato para ambas lagunas es < 2mg/L.

La concentración media de sulfato en ambas lagunas está en torno a 22 mg/L, sin variaciones significativas entre las tres campañas realizadas. Los

valores medios de HCO_3^- para la laguna de El Cristo son 77,7 mg/L en el muestreo de julio, aumentando en mayo (93,2 mg/L) y en septiembre (152,5 mg/L); en la de La Cervera los valores más bajos pertenecen al muestreo de julio (61 mg/L), aumentando en los muestreos de mayo (70,3 mg/L) y septiembre (158,6 mg/L).

La concentración media de Cl^- en la laguna de El Cristo no muestra variaciones importantes entre el muestreo de julio (58,9 mg/L) y mayo (60,4 mg/L) y aumenta en septiembre (103,2 mg/L). Los valores de Cl^- en la de La Cervera presentan poca variación entre el muestreo de julio (56,7 mg/L) y mayo (49,63 mg/L), y la mayor concentración se observa en el muestreo de septiembre (106,35 mg/L).

La distribución de los cationes (expresada en porcentaje molar) en el diagrama triangular de Piper Hill Langelier es uniforme y agrupada, donde no existen variaciones importantes en la concentración de los cationes dominantes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Aparentemente, los contenidos en Ca^{2+} y Mg^{2+} van disminuyendo en las aguas más concentradas, enriqueciéndose en Na^+ y K^+ . La distribución de los aniones es más dispersa, con concentraciones similares y abundantes en los dos aniones dominantes (Cl^- y HCO_3^-) y muy bajos porcentajes de SO_4^{2-} (< 20%) (Fig. 3).

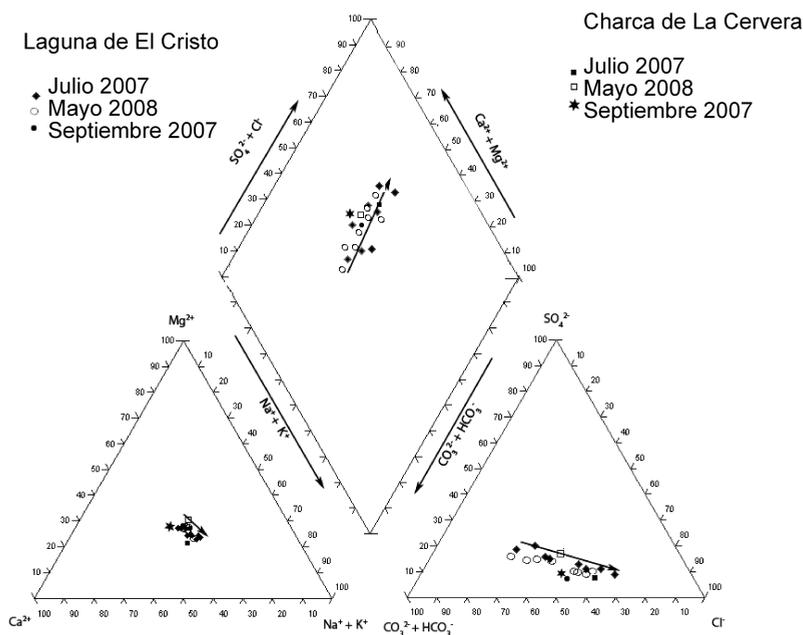


Figura 3. Diagrama de Piper Hill Langelier en el que se muestra la abundancia relativa en porcentaje molar de aniones y cationes principales del agua de la laguna de El Cristo y charca de La Cervera en la estación húmeda y seca (2007-2008). Las flechas sobreimpuestas indican la tendencia evaporítica de la composición.

Los elementos menores y traza analizados se encuentran por debajo de los valores paramétricos máximos (fijados por el RD 140/2003) (Apéndice 1). A modo de ejemplo, se muestran en la Tabla 2 las concentraciones máximas de algunos de los elementos contaminantes como As, Se, Cd, Pb, B, Cr, Cu, Ni y su nivel paramétrico máximo.

	As	Se	Cd	Pb	B	Cr	Cu	Ni
Concentración máxima medida	5 ppb	0,9 ppb	<0,1 ppb	0,9 ppb	26 ppb	4 ppb	12,5 ppb	6,3 ppb
Valor paramétrico máximo (RD 140/2003)	10 ppb	10 ppb	5 ppb	25 ppb	1 ppm	50 ppb	2 ppm	20 ppb

Tabla 2. Concentraciones máximas de algunos de los elementos contaminantes como As, Se, Cd, Pb, B, Cr, Cu, Ni y su nivel paramétrico máximo, según RD 140/2003 ppm, partes por millón; ppb, partes por billón.

Ambas lagunas presentan aguas ligeramente mineralizadas (HCO_3^- , Cl^- , $\text{SO}_4^{2-} \ll 5$ meq/L; TDS [mg/L] < 500), caracterizadas por la asociación iónica Cl^- - HCO_3^- - SO_4^{2-} y la asociación catiónica Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Las variaciones de pH y HCO_3^- están condicionadas por la proliferación de biomasa vegetal acuática con el consiguiente aumento de actividad fotosíntesis/respiración y el predominio de reacciones que consumen protones. El carácter básico de sus aguas hace pensar que el aumento de pH y de la relación $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ se deben a la acción fotosintética de la abundante biomasa vegetal acuática y, en menor medida, a la disminución del cuerpo de agua por evaporación.

En virtud de la composición iónica, se clasificarían como aguas de tipo cloruradas/bicarbonatadas cálcicas.

Las bajas concentraciones en nitratos denotan una nula contaminación del agua por la presencia de ganado en el entorno cercano de las lagunas (actualmente restringido). Las bajas concentraciones de fosfatos indican el carácter oligotrófico de sus aguas.

La naturaleza ácida del sustrato detrítico y las reacciones entre los sedimentos siliciclásticos del acuífero y sus aguas determinan la composición de las aguas que descargan en las lagunas. El Ca^{2+} debe proceder de feldspatos y silicatos, dada la ausencia de un sustrato carbonatado en la laguna; el Na^+ y el K^+ procederían de feldspatos (albita y ortosa respectivamente), micas y arcillas; mientras que el Mg^{2+} derivaría de la alteración de minerales ferromagnesianos. El aporte de Cl^- es más dudoso. Aunque es uno de los aniones dominantes (siempre en porcentaje similar al HCO_3^-), y el aporte principal de este anión se relaciona con evaporitas, la ausencia de éstas en el sustrato de las lagunas y en las áreas de recarga lejana (i. e., rocas paleozoicas de la sierra de Francia) y de tránsito (i. e., las formaciones miocenas y pliocuaternarias del pedimento), parece indicar una procedencia de silicatos (biotitas, turmalinas, hornblendas) donde el Cl^- puede sustituir grupos OH^- .

EVOLUCIÓN GEOQUÍMICA DEL AGUA

A partir de la composición obtenida de las aguas de ambas lagunas se aprecia que la concentración HCO_3^- es mayor que la suma de las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} . Esta situación implicaría que si las aguas de ambas lagunas fueran sometidas a evaporación progresiva por eventuales circunstancias de aridez y endorreísmo, las aguas evolucionarían hacia un aumento de la alcalinidad de carbonatos, simultáneo a un aumento de las concentraciones de Na^+ , K^+ , Cl^- y SO_4^{2-} , siguiendo los cálculos para la evolución de aguas diluidas de fuentes procedentes de rocas ígneas de Sierra Nevada (USA) (GARRELS & MACKENZIE, 1968). Dentro del diagrama de flujo que explica la evolución de la composición de las aguas continentales, las aguas seguirían una vía donde inicialmente precipitaría calcita con bajo contenido en magnesio, pudiendo llegar incluso a la precipitación de fases carbonáticas magnésicas (dolomita, magnesita) (EUGSTER & HARDIE, 1978). Hacia los términos finales, las aguas serían ricas en bicarbonato y del tipo Na-Cl-(CO_3)-(SO₄) (Lago Deep Springs) o Na-CO₃-Cl (Lago Magadi) y pobres en alcalinotérricos, hecho que caracteriza aguas provenientes de substratos silíceos ácidos. La laguna se encuentra en un estadio inicial, donde todavía no ha habido precipitación de calcita, y, si la hay, dado que existen caráceas en zonas centrales de la laguna de El Cristo (ALONSO & COMELLES, 1987), su

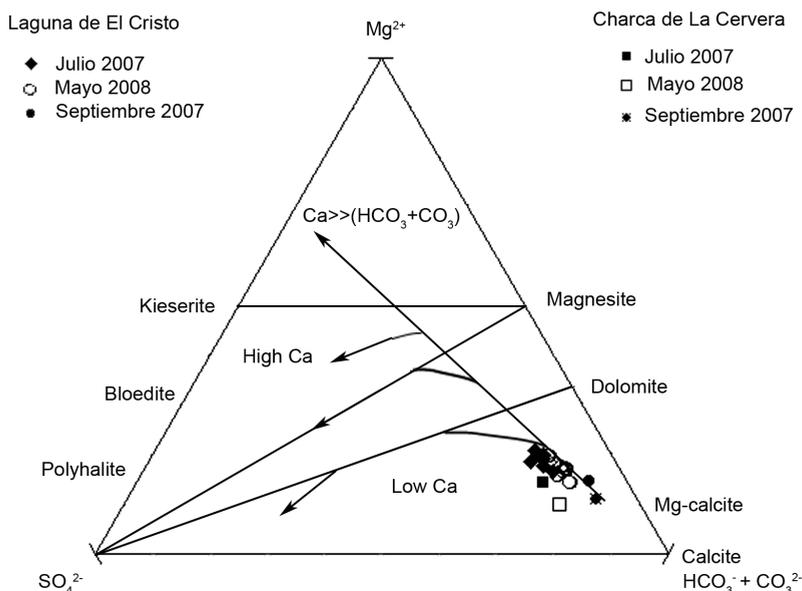


Figura 4. La representación de las composiciones porcentuales sobre el triángulo de Spencer indica que la evolución de la composición tendería hacia fases con bajo contenido en Ca^{2+} y previsiblemente se desplazarían hacia el polo de las sales. (Representación sobre un esquema de JONES & DEOCAMPO, 2003).

proporción es mínima. Pudiera producirse la precipitación en episodios aislados y posteriormente disolverse, de aquí su ausencia en el sedimento del fondo. A partir de una modificación del Triángulo de Spencer, donde el vértice del Ca^{2+} ha sido sustituido por el del Mg^{2+} para observar la evolución del soluto del Mg^{2+} (JONES & DEOCAMPO, 2003), precipitarían fases con bajo contenido en Ca^{2+} y tentativamente se desplazarían hacia el polo de las sales (Fig. 4).

Muestra	Mineral	$\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$	Yield	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$
LCr 1	BaSO_4	17,6	9,6	
LCr 5	BaSO_4	10,3	83,7	20,4
LCr 5	BaSO_4	9,3	83,7	
LCr 7	BaSO_4	21,5	55,2	22,3
LCr 11	BaSO_4	27,4	42,5	
LCr 11	BaSO_4	26,4	42,5	
LCr 12	BaSO_4	21,1	61,6	8,9

Tabla 3. Resultados de $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ y $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$.

ISÓTOPOS ESTABLES DE AZUFRE Y OXÍGENO EN SULFATOS

La baja concentración del SO_4^{2-} (en torno a 22 mg/L) y el elevado contenido de arcilla y materia orgánica en suspensión dificultaron su precipitación en forma de sulfato de bario con vistas a la obtención de los datos isotópicos. Los valores de $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ (‰) se encuentran comprendidos entre los 9,3 y 27,4‰ y $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ (‰) entre 8,9 y 22,3‰ (Tabla 3). Son valores isotópicos muy pesados, que están incluso por encima de los valores marinos actuales ($\delta^{34}\text{S} +21$ ‰ y $\delta^{18}\text{O} +8,6$ ‰; NIELSEN *et al.*, 1991).

El estudio de las relaciones $\delta^{34}\text{S}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en sulfatos disueltos es una herramienta muy útil para determinar las posibles fuentes de los sulfatos (NRIAGU *et al.*, 1991). La explicación de su origen podría deberse al aporte de sulfatos en relación con actividad antropogénica (vertidos industriales, pesticidas, fungicidas, ganado), pero queda descartado al ser una zona alejada de industria, de la actividad agrícola y restringida con respecto a la presencia de ganado. Además, los valores obtenidos ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ 10,3‰ y 27,4‰; $\delta^{18}\text{O}$ 20,4‰ y 22,3‰), son superiores a los que presentan los sulfatos antropogénicos ($\delta^{34}\text{S}$ 0‰/+10‰; $\delta^{18}\text{O}$ +5‰/+15‰) (NRIAGU *et al.* 1991). Otra hipótesis respecto a su origen estaría ligada a la meteorización de minerales en las rocas paleozoicas y terciarias que forman respectivamente las zonas de recarga en torno a la laguna y el substrato de ésta. De acuerdo con la curva de sulfatos oceánicos, donde la composición de $\delta^{34}\text{S}$ del sulfato marino ha sufrido variaciones (THODE, 1991), podría haber valores derivados de la disolución y aporte por parte de evaporitas paleozoicas. Sin embargo, los valores muy pesados de $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ junto a la ausencia de evaporitas paleozoicas en las áreas de recarga descartan esta posibilidad. Una posible explicación es que el S proceda de la alteración y oxidación de sulfuros procedentes del zócalo ($\delta^{34}\text{S}$ en piritas de edad cámbrica o precámbrica se encuentran en el rango -10 ‰/+3‰; Recio, comunicación personal). Siendo los valores de oxígeno en sulfato en la laguna 20,4‰ y 22,3‰, y dado que el

oxígeno atmosférico presenta valores $\delta^{18}\text{O} +23,0\text{‰}$, se interpreta que los sulfuros se oxidaron principalmente bajo influencia del oxígeno molecular atmosférico y fueron posteriormente transportados en forma de ión sulfato a la laguna por la escorrentía subsuperficial y flujos subterráneos. Una vez incorporado a las aguas de la laguna sufriría procesos de reducción bacteriana con formación de H_2S y, eventualmente, sulfuros. En condiciones anaeróbicas con abundante materia orgánica, tal como parece suceder en el fondo actual de la laguna debido a la abundante biomasa vegetal, las bacterias sulfato-reductoras toman el oxígeno del sulfato y oxidan la materia orgánica (THODE, 1991): $\text{SO}_4^{2-} + 2\text{CH}_2\text{O} (\text{MO}) + \text{H}^+ \rightarrow \text{HS}^- + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ (el ajuste estequiométrico depende de la especie de MO). Como resultado de esta reacción se produce un fraccionamiento hacia valores isotópicos más pesados por un aumento diferencial del $\delta^{34}\text{S}$ en el SO_4^{2-} residual (Fig. 5). No se han detectado sulfuros en los sedimentos del fondo lagunar, hecho que puede explicarse, en buena medida, por el escape del sulfhídrico formado en el fondo a la atmósfera (HOEFS, 2004), dada la escasa profundidad de la columna de agua.

Una de las muestras (LCr12) presenta valores de $\delta^{34}\text{S} +21,1\text{‰}$ y $\delta^{18}\text{O} +8,9\text{‰}$ similares a los del sulfato moderno marino ($\delta^{34}\text{S} +21\text{‰}$ y $\delta^{18}\text{O} +8,6\text{‰}$; NIELSEN *et al.*, 1991), lo cual podría hacer pensar en la influencia de spray marino, además de los procesos de sulfato-reducción indicados, para explicar el enriquecimiento en el isótopo pesado. El estudio de las relaciones $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}(\text{meq})$ y $\text{Na}^+/\text{Cl}^-(\text{meq})$ en la muestra LCr12 ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$, 1,6; Na^+/Cl^- , 1,01) y su comparación con los valores determinados para el agua actual de origen marino ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$, 9,7; Na^+/Cl^- , 0,85; KROUSE *et al.*, 1991) parecen descartar un posible origen por aporte de aerosol marino y no permiten, por el momento, una explicación plausible del valor isotópico de dicha muestra.

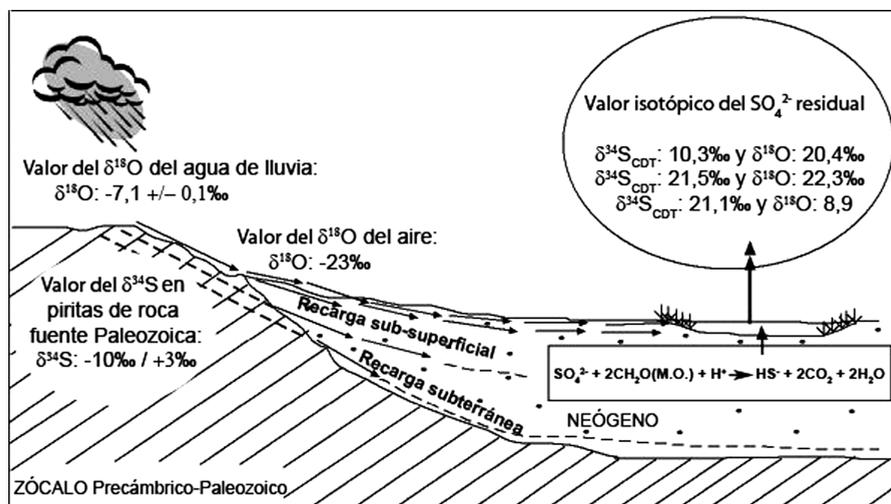


Figura 5. Modelo de enriquecimiento de $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ y $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ en el agua de la laguna. $\delta^{18}\text{O}$ del oxígeno del aire es $+23\text{‰}$ y el promedio del $\delta^{18}\text{O}$ del agua de lluvia en Salamanca es $7,1 \pm 0,1\text{‰}$ (C. Recio, inédito).

Muestra	Mineral	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$
LCr 1	SrCO ₃	-19,77
LCr 5	SrCO ₃	-21,29
LCr 6	SrCO ₃	-19,76
LCr 7	SrCO ₃	-13,92
LCr 11	SrCO ₃	-19,98
LCr 12	SrCO ₃	-23,76
LCr 13	SrCO ₃	-24,24
LCr 14	SrCO ₃	-23,08
Cerv.	SrCO ₃	-23,12

Tabla 4. Valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ de DIC.

ISÓTOPO ESTABLE DE CARBONO EN DIC

Los resultados obtenidos de $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ se incluyen en la Tabla 4. Los valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ se encuentran comprendidos entre $-19,76$ y $-24,24\%$, cuyo rango es similar al de valores de $\delta^{13}\text{C}$ del CO₂ procedente del metabolismo de plantas C3 ($\delta^{13}\text{C}$ desde -25 a -28% ; DEINES, 1980).

La composición isotópica del carbono obtenida a partir de sus diferentes compuestos inorgánicos disueltos en el agua (CO₂(aq), H₂CO₃, HCO₃⁻ y CO₃⁼) ayuda a conocer el origen del carbono y a comprender las reacciones biogeoquímicas que controlan la alcalinidad de las aguas del subsuelo y de superficie (KENDALL & DOCTOR, 2003). Las reacciones que producen DIC en las aguas superficiales son primariamente: 1) meteorización de rocas carbonatadas por lluvia ácida u otros ácidos; 2) meteorización de silicatos por el ácido carbónico producido por la disolución de CO₂ biogénico al infiltrarse el agua de lluvia; y 3) meteorización de carbonatos minerales por ácido carbónico (KENDALL & DOCTOR, 2003). Los valores del $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ en aguas superficiales están en el rango de -5% a -25% . El CO₂ de las aguas en las cuencas de drenaje son una mezcla del CO₂ atmosférico ($\delta^{13}\text{C}$ -7% a -8%) y del que es producido en la respiración microbiana, este último con valores de $\delta^{13}\text{C}$ similares a la materia orgánica (KENDALL & DOCTOR, 2003). Los procesos que afectan el valor del $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ en aguas de superficie son el intercambio de CO₂ con la atmósfera, la disolución/precipitación de carbonatos y la fotosíntesis y respiración "in situ" (KENDALL & DOCTOR, 2003). Los valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ en la laguna, comprendidos desde $-19,77$ a $-24,24\%$, son más ligeros que los valores isotópicos en rocas carbonatadas, bien marinas ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}$ de 1 a -1%); o lacustres ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}$ de $+1$ a -10%) (KENDALL & DOCTOR, 2003; HOEFS, 2004), e indican una escasa o nula influencia de la meteorización de rocas carbonatadas en las áreas de recarga (e. g., el zócalo paleozoico está compuesto por metapelitas y sedimentos siliciclásticos), así como por la escasa interacción de las aguas infiltradas en el acuífero mioceno siliciclástico que alimenta las lagunas. Teniendo en cuenta los valores ligeros de $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰PDB) obtenidos, se deduce, por tanto, un aporte biogénico predominante a través de procesos

metabólicos de plantas C4 ($\delta^{13}\text{C}$ varía de -11 a -14‰), o C3 ($\delta^{13}\text{C}$ varía de -25 a -28‰ , DEINES, 1980), siendo estas últimas comunes en la laguna. Los procesos de oxidación de materia orgánica, bien mediante O_2 disuelto en el agua ($\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) o por reducción de SO_4^{2-} en condiciones anaerobias ($2\text{CH}_2\text{O} + \text{SO}_4 \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{S}^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$), que son comunes en el sedimento superficial del fondo de la laguna debido a la abundante población vegetal enraizada, aportarían CO_2 enriquecido en el isótopo ligero (los valores del $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ son más bajos) (Fig. 6).

ORIGEN DE LAS LAGUNAS

En el caso de la laguna de El Cristo se descarta en este trabajo un origen artificial (cf., CASADO & MONTES, 1995). Su origen está en relación con factores de índole climática, estructural, geomorfológica y litológica, los cuales condicionan también la distribución y dinámica de las aguas subterráneas y superficiales relacionadas con la laguna.

La laguna de El Cristo se encuentra sobre una plataforma elevada a 870 m en la margen derecha del río Yeltes (Fig. 7); mientras que la charca de La Cervera se sitúa en la plataforma inferior, en el interfluvio del río Yeltes con el arroyo de La Moraseca. El río Yeltes discurre hacia el NO por un valle

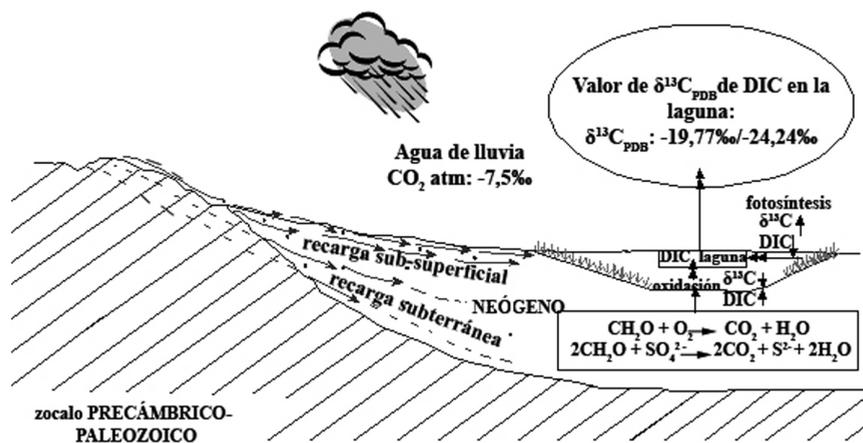


Figura 6. Esquema de los principales procesos que modifican el valor del $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ en la laguna.

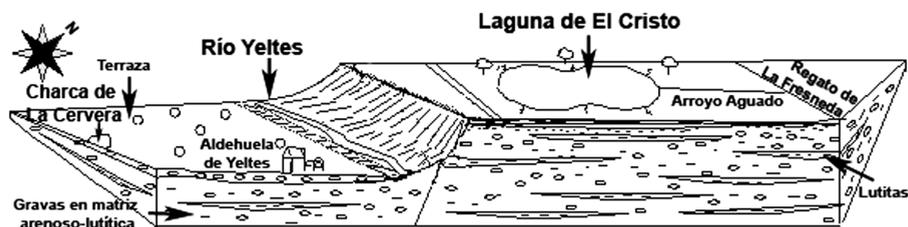


Figura 7. Esquema estratigráfico y estructural del substrato de las lagunas.

asimétrico cuyo margen derecho es un escarpe de falla de dirección SE-NO. Este escarpe conforma el umbral natural en cuya plataforma superior está instalada la laguna; debido a la erosión del río, el escarpe se encuentra actualmente retrocediendo hacia la laguna, por lo que en un cercano lapso de tiempo geológico ésta podría ser capturada por el río Yeltes, de seguir el proceso erosivo con esa polaridad.

Ambas plataformas, tanto la superior como la inferior, muestran una pendiente regional hacia el NO, sentido general hacia el que se dirige el río Yeltes. Sin embargo, la plataforma superior muestra una inclinación local hacia el NE, puesta de manifiesto por el drenaje superficial como es el caso del arroyo Aguado, desaguadero de la laguna de El Cristo, que drena estacionalmente la plataforma superior. El arroyo Aguado coincide con un alineamiento de dirección SO-NE que es el reflejo de una falla del basamento de esa dirección (MARTÍN-SERRANO *et al.*, 1993-94), y desemboca en el regato de la Fresneda formando un codo pronunciado, pues este último discurre paralelo al Yeltes con una dirección SE-NO. Por último, la confluencia del regato de la Fresneda y el río Yeltes es una zona de falla de dirección SSO-NNE. Ambas familias de fracturas NO y NE que delimitan los bloques basculados han sido identificadas ampliamente en zonas aledañas del Macizo Varisco. Las NE (direcciones coincidentes con el arroyo Aguado) son de mayor longitud y siniestras, mientras que las NO (coincidentes con el trazado del regato de la Fresneda, arroyo de la Moraseca y del río Yeltes), tienen en general pequeño desplazamiento. Sin embargo, el arroyo Aguado discurre por la línea de máxima inclinación del bloque superior, por lo que el alineamiento, además de remarcar una falla profunda del basamento, está delineando también un rasgo morfológico que controla la evacuación de la laguna en etapas de inundación; el codo formado por el arroyo Aguado y la Fresneda tendría por tanto un origen morfoestructural definido por la intersección de dos bloques con diferente inclinación.

Estos hechos pudieran estar supeditados a un basculamiento reciente de los bloques por la reactivación de las fallas del basamento que tienen dichas direcciones. Esta reactivación condiciona la geometría ortogonal de la red de drenaje superficial y los pronunciados codos de los ríos. La tectónica reciente ha determinado un complejo sistema de bloques elevados y hundidos dentro del semigraben que acoge la cuenca.

El control litológico lo establece la superficie degradada en parte de las *Series Ocreas*, y en parte de la raña. Esta superficie, formada por gravas cuarcíticas con matriz lutítica-arcillosa de color ocre, entre las que se intercalan arenas y lutitas de color ocre, constituye el substrato sobre el que se asientan las lagunas. La composición mineralógica está dominada por cuarzo y en menor porcentaje feldespato potásico; la fracción $< 2 \mu\text{m}$ la forman principalmente caolinita, e illita en menor porcentaje, y puntualmente esmectita (Muestra LCr16, Tabla 1). La presencia de esta última en el suelo que rodea la laguna podría haberse neoforado a partir de caolinita (Blanco, comunicación personal) debido a los cambios estacionales en la concentración de componentes disueltos en el agua del suelo. La existencia de niveles más permeables (gravas) con horizontes más

finos e impermeables intercalados permite albergar pequeños acuíferos superficiales y la acumulación de agua en las depresiones cuando el nivel freático aflora.

El control geomorfológico está en buena parte condicionado por la estructura y la litología. De cualquier modo, el desarrollo de una gran superficie de bajo gradiente favorece la existencia de encharcamientos. En este caso, esta superficie representa la degradación finiterciaria y cuaternaria del sistema (bajada) de abanicos aluviales miocenos desde los relieves paleozoicos de la sierra de Francia. Es evidente a lo largo de toda esta planicie el desarrollo de encharcamientos debidos al afloramiento de las aguas del acuífero superficial en zonas deprimidas del pedimento. De esta manera, las características topográficas de la superficie condicionan, junto con el substrato litológico, la distribución y dinámica de las aguas subterráneas superficiales.

Dos rasgos evidencian la influencia climática en la génesis de estas depresiones. El primero es su morfología elipsoidal, bien patente en el caso de El Cristo (Fig. 2), que presenta su eje mayor orientado en la dirección de los vientos dominantes (de componente NE o SO) (Fig. 2). Ambos son vientos dominantes en el sector donde se sitúan ambas lagunas, los de componente NE en los meses estivales y los de SO en los meses invernales (SÁNCHEZ Y LLORENTE *et al.*, 1997). Parece ser que la principal componente que actuaría en el proceso erosivo sería del NE, por la situación de la laguna de El Cristo en la plataforma superior, inclinada en dirección NE. La componente SO estaría mitigada en cierta manera por la situación orográfica de la sierra de Francia. El segundo es la existencia de un pavimento de



Figura 8. Pavimento de cantos ventifectos de cuarcita en la margen septentrional de la laguna de El Cristo.

cantos ventifactos, con acumulaciones en forma de media luna, especialmente significativas en el margen nororiental de la laguna de El Cristo (Fig. 8). La presencia de cantos facetados, con aristas que delimitan ángulos diedros y figuras poliédricas irregulares en el cantizal, refleja la abrasión eólica sobre la formación lutítico-conglomerática.

Todas estas características encajan bien con un modelo de formación de depresiones de tipo “hidroeólico”, condicionado por la litología del substrato. Este mecanismo de génesis se ve favorecido por la existencia de litologías con baja cohesión y unas condiciones fisiográficas determinadas por extensas planicies con características climáticas semiáridas-áridas. El clima ha propiciado la escasez de vegetación, que, ante un régimen de viento continuo, produce la excavación diferencial dentro de la llanura (PÉREZ-GONZÁLEZ, 1982). El substrato detrítico se reseca, favorece la erosión de las partículas finas que son arrastradas por el viento (dejando un pavimento de cantos facetados) y da como resultado la excavación de la cubeta; a medida que se acentúa la excavación se retroalimenta probablemente el proceso. Este proceso continuaría dependiendo de la persistencia o no de la acción del viento y de la eventual intersección del nivel freático somero con la superficie. En el caso de intersección, se produciría un encharcamiento; el contacto con facies finas impermeables retendría el agua impidiendo su filtración hacia niveles inferiores, configurando así un nivel freático colgado. Del subsiguiente balance hídrico en la cuenca dependería su evolución, de tal forma que si el nivel freático bajase, o bien que la descarga de las lagunas fuese superior al influjo, el proceso de deflación podría continuar.

En este caso, la depresión fue excavada en la planicie del piedemonte constituido por los materiales siliciclásticos de la *Series Ogres*-Raña. Numerosas depresiones cuaternarias en la cuenca del Duero se formaron de acuerdo a este modelo durante el Pleistoceno-Holoceno asociadas a vientos de componente SO y NE-SO. En la formación de dunas en las llanuras fluviales de los afluentes meridionales del curso medio del río Duero (Zapardiel, Duero y Duratón) han participado vientos de componente NO (DÍEZ HERRERO *et al.*, 2002). Procesos eólicos de componente NE-SO también han sido descritos en este mismo sector (llanuras de los ríos Duratón, Cega, Pirón, Eresma, Adaja, Arealillo, Zapardiel, Trabanco y Guareña; PÉREZ-GONZÁLEZ, 1982).

CONCLUSIONES

Las lagunas de El Cristo y de La Cervera son de origen eólico, formadas por deflación durante el Pleistoceno.

Contienen aguas del tipo cloruradas/bicarbonatadas cálcicas. Su mineralización es el resultado de la reacción entre las aguas subterráneas que alimentan las lagunas y las formaciones siliciclásticas que forman el acuífero. La presencia de sulfato en las aguas lagunares se relaciona con la alteración de sulfuro en las cabeceras del acuífero sobre el zócalo Precámbrico-Paleozoico.

En la propia laguna tuvo lugar un proceso de sulfato-reducción parcial de los sulfatos y el enriquecimiento subsiguiente del $\delta^{34}\text{S}$. El principal aporte del $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ es el CO_2 de origen biogénico a través del fraccionamiento de plantas que usan el ciclo de Calvin o ciclo C3. La evolución de las aguas en el tiempo, y en condiciones de aridez y endorreísmo, daría lugar potencialmente a salmuera rica en bicarbonato y pobre en alcalinotérreos.

La sedimentación actual de la laguna de El Cristo es siliciclástica fina procedente de la erosión de la formación clástica sobre la que se asienta.

La ausencia de fases minerales precipitadas y la escasa variación estacional de la composición hidroquímica entre la época de recarga y sequía, hacen pensar que el sistema lagunar no es hidrológicamente cerrado. La pérdida de masa acuosa no es sólo por evaporación, sino que debe ocurrir en una parte significativa, por salidas subterráneas, lo cual explicaría los dos hechos anteriores. Las entradas y salidas principales son por flujos subterráneos lentos y continuos. El vaso de la laguna no es del todo impermeable, y las lagunas representan una zona intermedia en el flujo de agua subterránea desde zonas de mayor a menor potencial piezométrico dentro del acuífero superficial en el que se encuentran.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado con el proyecto SA075A04 de la Consejería de Educación y Cultura de la Junta de Castilla y León, y CGL2008-05584-C02-01/BTE del Ministerio de Ciencia e Innovación. Los autores agradecemos al Dr. Clemente Recio su ayuda en el análisis e interpretación de isótopos estables, y al Dr. José Antonio Blanco su ayuda en la preparación de muestras para DRX y la interpretación de resultados. Al Dr. Juan Ramón Colmenero por sus comentarios al manuscrito original.

BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO, M. (1998): Las Lagunas de la España peninsular. *Limnética*, **15**: 1-176.
- ALONSO, M. & COMELLES, M. (1987): *Catálogo limnológico de las zonas húmedas esteparias de la cuenca del Duero*. Ed. Universidad de Barcelona, Barcelona, 452 pp.
- BOE (2003) REAL DECRETO 140/2003 de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. BOE 4 (21 febrero 2003): 7228-7245.
- CASADO, S. & MONTES, C. (1995): *Guía de los lagos y humedales de España*. Edit. J. M. Reyero, Madrid, 255 pp.
- CIRUJANO, S.; VELAYOS, M.; CASTILLA, F. & GIL, M. (1992): *Criterios botánicos para la valoración de las lagunas y humedales españoles (Península Ibérica y las Islas Baleares)*. ICONA-CSIC, Madrid, 455 pp.

Localización	Campaña	Muestreo	pH	T (°C)	CE (µS/cm)	TDS	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	Si
Laguna de	Julio-07	LCr1	9,90	10,4	198	127	73,20	39,00	<20	<4	<2	<0,05	19,60	0,2	14,2	8,5	22,3	<0,05	<0,05
El Cristo	Julio-07	LCr5	9,59	21,8	216	138	73,20	35,45	<20	<4	<2	<0,05	19,3	0,1	7,1	8,4	16,1	<0,05	<0,05
	Julio-07	LCr6	9,77	23,0	202	129	73,20	21,27	<20	<4	<2	<0,05	20,2	0,2	10,8	8,1	18,7	<0,05	<0,05
	Julio-07	LCr7	9,59	23,3	223	143	73,20	85,08	22	<4	<2	<0,05	19,7	0,1	8,1	9,2	17,6	<0,05	<0,05
	Julio-07	LCr11	9,63	22,8	230	147	91,50	74,45	26	<4	<2	<0,05	21,0	0,2	8,5	9,3	18,1	<0,05	<0,05
	Julio-07	LCr12	9,88	22,0	238	152	79,30	31,91	27	<4	<2	<0,05	19,8	0,2	14,5	8,8	21,0	<0,05	<0,05
	Julio-07	LCr13	8,76	25,8	251	161	73,20	106,35	21	<4	<2	<0,05	21,4	0,3	15,2	8,5	21,9	<0,05	<0,05
	Julio-07	LCr14	9,76	24,3	226	145	85,40	77,99	22	<4	<2	<0,05	18,8	0,2	11,2	7,9	18,2	<0,05	<0,05
	Sept-07	LCr15	8,54	21,1	246	157	152,50	21,27	<20	<4	<2	<0,05	23,4	0,1	9,5	11,2	24,9	<0,05	<0,05
	Mayo-08	LCr1	9,74	20,5	243	155	91,50	39,00	22	4	<2	<0,06	19,5	<0,04	6,8	9,4	21,0	<0,14	<0,05
	Mayo-08	LCr5	9,47	23,0	194	124	79,30	42,54	20	5	<2	<0,06	18,8	<0,04	6,0	9,0	19,3	<0,14	<0,05
	Mayo-08	LCr6	9,26	24,6	255	163	91,50	24,82	20	8	<2	<0,06	18,5	<0,04	6,5	8,3	19,4	<0,14	<0,05
	Mayo-08	LCr7	8,95	26,7	230	147	97,60	88,63	20	6	<2	<0,06	18,6	<0,04	7,8	7,4	20,5	<0,14	<0,05
	Mayo-08	LCr11	9,19	25,4	257	164	103,70	77,99	21	8	<2	<0,06	21,7	<0,04	7,2	9,7	22,7	<0,14	<0,05
	Mayo-08	LCr12	10,30	24,9	S.D.	S.D.	91,50	32,90	20	9	<2	<0,06	19,3	<0,04	6,4	8,7	18,6	<0,14	<0,05
	Mayo-08	LCr13	9,80	24,1	S.D.	S.D.	97,60	99,26	24	9	<2	<0,06	19,2	<0,04	6,3	8,5	18,5	<0,14	0,3
	Mayo-08	LCr14	10,36	24,6	S.D.	S.D.	97,60	77,99	20	7	<2	<0,06	19,2	<0,04	5,8	9,0	18,7	<0,14	0,2
Charca de	Julio-07	Cerv.	6,90	28,0	S.D.	S.D.	61,00	56,72	20	<4	<2	<0,05	13,0	0,2	9,6	4,9	10,3	<0,05	<0,05
La Cervera	Sep-07	Cerv.	8,90	25,9	S.D.	S.D.	158,60	106,35	22	5	<2	<0,05	19,5	0,1	5,9	8,5	10,8	<0,05	0,1
	Mayo-08	Cerv.	6,78	16,7	S.D.	S.D.	42,70	49,63	<20	<4	<2	<0,06	6,2	<0,04	2,4	3,7	5,8	<0,14	<0,05

Apéndice 1. Análisis químicos de muestras de agua de las lagunas de El Cristo y de La Cervera, (todas las concentraciones están expresadas en mg/L).

Localización	Campaña	Muestreo	Li	B	Ti	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Se	Rb	Sr	Cd	Sb	Ba	Pb
Laguna de	Julio-07	LCr1	1,7	23,1	0,8	1,2	10,7	3,9	0,7	33,9	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	3,7	<0,1
El Cristo	Julio-07	LCr5	1,8	23,3	0,7	1,3	0,9	3,0	<0,1	9,1	2,0	1,2	3,9	<0,1	<0,1	0,7	0,7	<0,1
	Julio-07	LCr6	1,7	22,9	0,7	1,4	1,2	2,6	1,2	14,5	2,2	1,0	3,8	<0,1	<0,1	0,7	45,2	<0,1
	Julio-07	LCr7	1,9	26,1	0,6	1,9	1,3	4,1	0,1	18,8	2,2	1,1	4,6	<0,1	<0,1	0,8	0,8	<0,1
	Julio-07	LCr11	1,9	31,9	0,9	1,3	3,1	8,3	2,2	16,4	2,2	1,2	4,6	<0,1	<0,1	0,7	0,8	<0,1
	Julio-07	LCr12	1,7	21,6	0,6	1,4	1,0	3,8	3,4	30,7	1,7	0,9	3,5	<0,1	<0,1	0,6	0,8	<0,1
	Julio-07	LCr13	1,8	26,6	0,8	1,4	2,3	2,7	2,3	15,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,4	<0,1
	Julio-07	LCr14	1,7	25,8	0,9	1,8	1,4	2,7	1,4	9,7	2,3	1,0	3,6	<0,1	<0,1	0,7	0,8	<0,1
	Sept-07	LCr15	2,1	32,1	1,2	1,9	7,8	8,2	4,9	104,1	2,5	1,6	6,0	<0,1	<0,1	0,7	0,7	0,3
	Mayo-08	LCr1	1,2	<20	0,5	3,8	19,6	6,2	5,7	83,7	1,7	1,0	7,4	120,7	<0,07	<0,06	62,9	0,9
	Mayo-08	LCr5	1,2	<20	0,4	4,0	19,4	6,2	5,7	83,7	1,8	1,0	7,3	121,6	<0,07	<0,06	64,0	0,9
	Mayo-08	LCr6	1,1	<20	0,4	1,6	17,6	5,9	12,5	83,5	4,6	0,9	7,1	114,7	<0,07	<0,06	64,7	0,6
	Mayo-08	LCr7	1,3	<20	0,4	2,4	7,1	4,6	2,8	82,0	2,1	0,9	7,3	108,7	<0,07	<0,06	46,8	0,5
	Mayo-08	LCr11	1,3	<20	0,3	2,8	1,7	5,1	6,3	81,7	1,7	0,9	7,6	123,6	<0,07	<0,06	59,5	0,4
	Mayo-08	LCr12	1,2	<20	0,4	2,9	7,9	6,1	7,2	82,3	1,5	0,7	6,9	114,8	<0,07	<0,06	49,7	0,5
Mayo-08	LCr13	1,0	<20	0,6	3,3	3,9	3,4	10,4	65,6	1,7	1,0	7,0	114,2	<0,07	<0,06	65,2	1,3	
Mayo-08	LCr14	1,1	<20	0,5	2,3	4,4	2,6	7,8	41,5	1,7	1,0	6,7	114,0	<0,07	<0,06	59,4	0,3	
Charca de	Julio-07	Cerv.	0,8	10,1	1,1	1,9	2,7	2,3	2,3	10,6	3,2	0,5	3,1	81,6	<0,1	2,1	0,8	<0,1
La Cervera	Sep-07	Cerv.	0,9	13,5	1,5	1,8	0,4	6,3	6,4	83,8	5,0	0,9	5,3	<0,1	<0,1	0,7	0,8	0,7
	Mayo-08	Cerv.	0,9	<20	0,3	1,7	12,9	6,9	8,5	66,3	1,4	0,2	5,9	41,0	<0,07	<0,06	14,3	0,5

Apéndice 1. Análisis químico de muestras de agua de las lagunas de El Cristo y de La Cervera, elementos menores y elementos traza (las concentraciones están expresadas en ppb).

- CLARK, I. D. & FRITZ, P. (1997): *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Ed. CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, FL., 328 pp.
- DEINES, P. (1980): The isotopic composition of reduced organic carbon. *In: Handbook of Environmental Isotope Geochemistry* (edits. FRITZ, P. & FONTES, J. Ch.). Ed. Elsevier, Amsterdam, 1: pp. 329-406.
- DÍEZ HERRERO, A.; BATEMAN, M. D.; LÓPEZ SÁEZ, J. A. & VEGAS SALAMANCA, J. (2002): Procesos eólicos tardiglaciares en la submeseta septentrional: cronología del manto arenoso de la Tierra de Pinares. *In: Aportaciones a la geomorfología de España en el inicio del Tercer Milenio* (edits. PÉREZ GONZÁLEZ, A.; VEGAS, J. & MACHADO, M. J.), pp. 167-175.
- EUGSTER, H. P. & HARDIE, L. A. (1978): Saline lakes. *In: Lakes: Chemistry, geology, and physics* (edit. LERMAN, A.). Ed. Springer-Verlag, New York, pp. 237-293.
- GARRELS, R. M. & MACKENZIE, F. T. (1967): Origin of the chemical compositions of some springs and lakes. *In: Advances in Chemistry Series* (edit. GOULD, R. F.). Ed. American Chemical Society, Washington, D.C., n.º 67: pp. 222-242.
- HOEFS, J. (2004): *Stable isotope geochemistry*. 5th edition. Ed. Springer, Berlín, 340 pp.
- JONES, B. F. & DEOCAMPO, D. M. (2003): Geochemistry of Saline Lakes. *In: Surface and Ground Water, Weathering, and Soils* (edit. DREVER, J. I.). Vol. 5: *Treatise on Geochemistry* (edits. HOLLAND, H. D. & TUREKIAN, K. K.). Ed. Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 393-424.
- KENDALL, C. & DOCTOR, D. H. (2003): Stable Isotope Applications in Hydrologic Studies. *In: Surface and Ground Water, Weathering, and Soils*. (edit. DREVER, J. I.). Vol. 5: *Treatise on Geochemistry* (edits. HOLLAND, H. D. & TUREKIAN, K. K.). Ed. Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 320-258.
- KROUSE, H. R.; GRINENKO, L. N.; GRINENKO, V. A.; NEWMAN, L.; FORREST, J.; NAKAI, N.; TSUJI, Y.; YATSUMINI, T.; TAKEUCHI, V.; ROBINSON, B. W.; STEWART, M. K.; GUNATILAKA, A.; (CHAMBERS) PLUMB, L. A.; SMITH, J. W.; BUZEK, F.; CERNY, J.; SRAMEK, J.; MENON, A. G.; IYER, G. V. A.; VENKATASUBRAMANIAN, V. S.; EGBOKA, B. E. C.; IROGBENACHI, M. M.; ELIGWE, C. A. (1991): Case Studies and Potential Applications. *In: Stable isotopes, natural and anthropogenic sulphur in the environment* (edits. KROUSE, H. R. & GRINENKO, V. A.). SCOPE 43, pp. 307-425. En Internet: www.icsu-scope.org.
- MARTÍN-SERRANO, A. (1988): *El relieve de la región occidental zamorana. La evolución geomorfológica de un borde del Macizo Hespérico*. Ed. Instituto de Estudios Zamoranos "Florián de Ocampo", Zamora, 311 pp.
- MARTÍN-SERRANO, A. (1991): La definición y el encajamiento de la red fluvial actual sobre el Macizo Hespérico en el marco de su geodinámica alpina. *Rev. Soc. Geol. España*, 4 (3-4): 337-351.
- MARTÍN-SERRANO, A.; MONTESERÍN LÓPEZ, V.; MEDIAVILLA LÓPEZ, R. & RUBIO PASCUAL, F. (1993-1994): *Mapa geológico de España. Escala 1:50.000. La Fuente de San Esteban hoja n.º 501 (Cartografía geológica)*. Ed. ITGE, Madrid.

- NIELSEN, H.; PILOT, J.; GRINENKO, L. N.; GRINENKO, V. A.; YU, LEIN, A.; SMITH, J. W. & PANKINA, R. G. (1991): Lithospheric Sources of Sulphur. *In: Stable isotopes, natural and anthropogenic sulphur in the environment* (edits. KROUSE, H. R. & GRINENKO, V. A.). SCOPE 43, pp. 65-132. En Internet: www.icsu-scope.org.
- NRIAGU, J. O.; REES, C. E.; MEKHTIYEVA, V. L.; YU. LEIN, A.; FRITZ, P.; DRIMMIE, R. J.; PANKINA, R. G.; ROBINSON, B. W. & KROUSE, H. R. (1991): Hydrosphere. *In: Stable isotopes, natural and anthropogenic sulphur in the environment* (edits. KROUSE, H. R. & GRINENKO, V. A.). SCOPE 43: pp. 177-266. En Internet: www.icsu-scope.org.
- PÉREZ-GONZÁLEZ, A. (1982): El Cuaternario de la región central de la Cuenca del Duero y sus principales rasgos geomorfológicos. *I Reunión sobre la Geología de la Cuenca del Duero. Salamanca 1979*. Ed. IGME, Temas Geológico mineros, Parte II: pp. 717-740.
- SÁNCHEZ Y LORENTE, J. M.; TOMÁS SÁNCHEZ, C. & DE PABLO DÁVILA, F. (1997): *Consideraciones climáticas sobre el clima de Matacán (Salamanca)*. Caja Duero, Salamanca, 310 pp.
- THODE, H. G. (1991): Sulphur Isotopes in Nature and the Environment: An Overview. *In: Stable isotopes, natural and anthropogenic sulphur in the environment* (edits. KROUSE, H. R. & GRINENKO, V. A.). SCOPE 43, pp. 1-26. En Internet: www.icsu-scope.org.

