

EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO DEL CAMBIO GLOBAL EN TRES LAGOS DE ALTA MONTAÑA DE PARQUES NACIONALES (ENOL, MARBORÉ Y LA CALDERA): INDICADORES FÍSICO-QUÍMICOS (CLAM)

MARÍA PILAR MATA CAMPO¹, JAVIER SÁNCHEZ ESPAÑA², JUANA VEGAS SALAMANCA³,
JUAN ANTONIO RODRÍGUEZ GARCÍA⁴, MARIO MORELLÓN MARTELES⁵,
ANGEL ENRIQUE SALAZAR RINCÓN⁶, ANA NAVAS IZQUIERDO⁷,
MANUEL LÓPEZ-VICENTE⁸, BLAS L. VALERO GARCÉS⁹

RESUMEN

El proyecto ha abordado el estudio de los lagos Marboré y Enol con el fin de determinar el funcionamiento actual, realizar una evaluación del impacto del cambio global y de los cambios de los últimos 3000 años. El Lago Enol está sometido a una presión antrópica alta desde el siglo XIX: minería, regulación hidrológica, erosión, turismo y ganadería. Se observa anoxia hipolimnética desde julio a noviembre, afectando hasta un 15% del volumen total. Aunque la productividad primaria es baja, está limitada por P ($<6 \mu\text{g/L P-PO}_4^{3-}$) y la clorofila es baja, (0.44-1.80 $\mu\text{g/L}$), las tasas de consumo de oxígeno son elevadas. Este hecho puede explicarse por 1) aporte de material orgánico terrestre del suelo, confirmado por los resultados de los análisis de la materia orgánica en sedimentos ($\delta^{13}\text{C}$, C/N y biomarcadores) y 2) procesos biogeoquímicos y microbiológicos derivados de la ganadería y actividad minera, capaces de desencadenar reacciones que descomponen la materia orgánica de forma eficiente.

¹ Dpto. de Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero. La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid (España). Teléfono: 917 287 256. Email: p.mata@igme.es

² Dpto. de Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero. La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid (España). Teléfono: 917 287 218 Email: j.sanchez@igme.es

³ Dpto. de Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero. Rios Rosas, 23, 27003 Madrid (España). Teléfono: 913 495 809. Email: j.vegas@igme.es

⁴ Dpto. de Infraestructura Geocientífica y Servicios. Instituto Geológico y Minero. La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid (España). Teléfono: 917 287 205. Email: ja.rodriguez@igme.es

⁵ Dpto. CC. de la Tierra y Física Materia Condensada. Univ. Cantabria. Santander (España). Teléfono: 942 201 512. Email: mario.morellon@unican.es

⁶ Dpto. de Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero. La Calera 1, 28760 Tres Cantos, Madrid (España). 917 287 257. Email: a.salazar@igme.es

⁷ Dpto. Suelos y agua Estación Experimental de Aula Dei (CSIC). Av. Montañana 1. 005. 50059 Zaragoza, España 976 716 094. Email: anavas@eed.csic.es

⁸ Dpto. Suelos y agua. Estación Experimental de Aula Dei (CSIC). Av. Montañana 1. 005, 50059 Zaragoza, España. Teléfono: 976 716 124 Email: mvicente@eed.csic.es

⁹ Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC Avda. Montañana 1005. 50059 Zaragoza, España. Teléfono: 976 369 393. Email: blas@ipe.csic.es

El lago de Marboré es dimíctico frío y (ultra-) oligotrófico con termoclina a 6-7 m en julio-agosto. El nivel de oxigenación es alto y constante en la columna de agua, con bajo consumo de O_2 , y muy baja productividad primaria. Se han detectado cantidades apreciables de Fe-Zn-Cu-Mn en torno a la termoclina, resultado de un aporte sub-superficial debido a procesos de alteración de sulfuros del entorno, aunque no se descarta contaminación atmosférica tal como se observa en el registro sedimentario debida a contaminación minera e industrial por Pb en épocas pasadas.

Se proponen medidas de control de la erosión en Enol y de seguimiento y/o monitorización en continuo en ambos lagos con objeto de regular el aporte de materia orgánica y el efecto del aumento de temperaturas y posible variación en el régimen de precipitaciones debido al cambio climático.

Palabras clave: Cambio global, lagos de alta montaña, indicadores fisicoquímicos, paleolimnología.

ASSESSMENT AND MONITORING OF GLOBAL CHANGE IN THREE HIGH MOUNTAIN LAKES OF NATIONAL PARKS (ENOL, MARBORÉ AND LA CALDERA) (CLAM PROJECT).

ABSTRACT

The project involves the study of Enol and Marboré lakes in order to study the current state, the assessment of the impact of the global change, and the changes of the last 3000 years. Lake Enol is subjected to a high-anthropic pressure since the nineteenth century: mining, water regulation, erosion, tourism and livestock. A hypolimnetic anoxia is observed from July to November, affecting up to 15% of the total volume. Although it is P-limited ($<6 \text{ mg / L P-PO}_4^{3-}$) and chlorophyll-a is low ($0.44-1.80 \mu\text{g / L}$), the rates of oxygen consumption are high. This fact can be explained by 1) the supply of terrestrial organic material from soils, corroborated by the results of the analysis of organic matter in sediments ($\delta^{13}\text{C}$, C/N and biomarkers) and 2) derived biogeochemical and microbiological processes involved in livestock and mining activities, able of triggering reactions that decompose organic matter in an efficient way.

Marboré lake is a (ultra-) oligotrophic and a cold dimictic lake with a thermocline located 6-7 m depth in July-August. The oxygen content is high and steady in the water column that presents low- O_2 consumption, and low-primary productivity. Significant amounts of Fe-Zn-Cu-Mn have been detected close to the thermocline as a result of sub-surface contributions due to the alteration processes of sulphides of the surrounding outcrops, although long-distance atmospheric pollution is not discarded as it has been observed in the sedimentary record due to mining and industrial pollution of lead in the past. Erosion processes must be controlled in Enol basin, and monitoring and / or continuous monitoring in both lakes is necessary in order to regulate the input of organic matter and the effect of rising temperatures and possible variation in rainfall patterns due to climate change.

Keywords: Global change, High-mountain lakes, physico-chemical proxies, paleolimnology.

INTRODUCCIÓN

Las consecuencias ya evidentes del Cambio Global sobre los ecosistemas acuáticos (IPPC, 2007; HANNAH, 2010) hace que su estudio en lagos y humedales sea esencial. Por lo tanto, es necesario disponer de series temporales largas que permitan discernir la variabilidad natural de estos ecosistemas, del cambio debido a otros factores de estrés, ya sean climáticos o antrópicos.

Durante los últimos años se ha dedicado una especial atención al estudio de los lagos de alta montaña, considerados como ecosistemas altamente sensibles a perturbaciones climáticas y ambientales (p. ej. : CATALÁN *et al.*, 2006; BATTARBEE & BINNEY, 2008), ya que sus características intrínsecas (altitud, radiación solar, UV, falta de nutrientes, sustrato, dinámica, etc.) los hacen muy sensibles a las presiones externas. Aunque suelen estar situados en áreas remotas, la influencia antropogénica, directa o atmosférica (metales pesados, acidificación, contaminantes orgánicos) es constante e importante en todos ellos. Por otra parte, los parques nacionales estudiados en este proyecto reciben cientos de miles de visitas anuales, y como consecuencia, el impacto antrópico sobre estos ecosistemas puede ser alto.

El método de trabajo multi-indicador en estudios paleolimnológicos puede: (1) discriminar los parámetros que controlan o influyen en la sedimentación, y (2) proporcionar información para descodificar la variabilidad en algunas de las variables climáticas (temperatura, precipitación, evapotranspiración, etc.). Sin embargo, para el entendimiento completo de todos estos datos es imprescindible el conocimiento de la limnología actual de los lagos (estratificación, periodos con anoxia, alcalinidad, disponibilidad de nutrientes, etc.). En proyectos anteriores, (VALERO *et al.*, 2010 & 2013; MORENO *et al.*, 2010 y 2011; OLIVA-URCIA *et al.*, 2013 y LÓPEZ-MERINO *et al.*, 2011), estudiaron el registro sedimentario

y la evolución de los sistemas lacustres de Enol y Marboré desde el último máximo glacial y los cambios paisajísticos y económicos llevados a cabo en la región durante los dos últimos siglos en Enol. El número de estudios sobre lagos pirenaicos es menor, aunque la contaminación ha llegado a afectar a áreas remotas europeas de forma casi homogénea (CAMARERO *et al.*, 1998, 2009). Estos estudios dan información acerca del estado natural «de referencia» de los sistemas previo a la influencia antrópica.

OBJETIVOS

El presente proyecto coordinado plantea un estudio multidisciplinar de tres lagos de alta montaña que consiste en la evaluación y seguimiento de indicadores de Cambio Global, físico-químicos (CLAM-1) y biológicos (CLAM-2). Los objetivos de los dos subproyectos orientados a la gestión de los parques se centran en conocer el funcionamiento de estos dos sistemas lacustres en relación a propiedades hidrológicas, limnológicas y geoquímicas, que permitan diseñar mecanismos de gestión para la mejor adaptación del sistema a escenarios futuros de Cambio Global y ofrecer a los gestores de los parques una información completa sobre la diversidad de los grupos de indicadores biológicos seleccionados que permitiría el diseño de un programa adecuado para el seguimiento de la respuesta de la biota al Cambio Global, más allá de los actuales programas de calidad de agua. Asimismo, se pretende crear una base de datos y metadatos integrada en los programas de seguimiento del Cambio Global de la red de P. N. donde queden reflejadas las mediciones regulares de variables bióticas y abióticas efectuadas y la integración de la monitorización en redes de seguimiento internacionales a largo plazo (LTER) para facilitar el intercambio de información entre diferentes lugares.

El objetivo del subproyecto CLAM-1 son: la caracterización del funcionamiento actual y la evo-

lución de los lagos Marboré y Enol durante los últimos cientos de años, basada en el estudio y monitorización de las variables fisicoquímicas de estas masas de agua y sus cuencas de drenaje (afloramientos rocosos y suelos) para estimar el impacto del cambio global (aumento de temperatura, nutrientes e impacto antrópico diverso) sobre la ecología y la dinámica de los lagos. Para alcanzar este objetivo se ha llevado a cabo una caracterización de las cuencas sedimentarias, tipos de aportes hidrológicos y sedimentarios, caracterización morfométrica y batimétrica, espesor y estructura interna del relleno sedimentario, modelización de la escorrentía, y caracterización y análisis geoquímico de los suelos, incluyendo estudios comparativos de metales traza en suelos, agua y sedimentos lacustres.

Con respecto al establecimiento del funcionamiento limnológico, este proyecto incluye aspectos como: determinación del régimen térmico, periodos de estratificación y mezcla, evolución redox y evaluación del estado ecológico, riesgo del aumento de nutrientes en el futuro, intensidad y extensión de la anoxia, composición y variación espacio temporal de los aportes terrígenos, contenido en metales disueltos, ambientes sedimentarios actuales y estudio biogeoquímico de la interfase sedimento/agua. Por otro lado, se han calculado tasas de sedimentación y contenido en metales traza en sedimentos y se ha efectuado una simulación de aumento de nutrientes mediante la realización de experimentos en laboratorio de reactividad de diferentes substratos orgánicos en el lago de Enol.

MATERIALES Y MÉTODOS

Trabajo de campo

En los dos lagos se realizó una batimetría usando datos de posicionamiento GPS GARMIN y una ecosonda HAMMINGBIRD de doble haz. Los datos X, Y, Z fueron tratados en Arc Info 7.0

(ESRI) para la realización del análisis morfométrico. Se realizaron 13 campañas en el Lago de Enol cada dos meses en los periodos libres de hielo en verano/otoño para muestreo de agua, sedimentos, y suelos y 4 al Lago de Marboré en verano para muestreo de agua y sedimentos. Se instalaron 5 termistores de temperatura a 0, 5, 5, 10, 15 y 19 m de profundidad en el lago de Enol y Marboré, 2 termistores adicionales de Temperatura (T) y oxígeno disuelto (OD) a 12, 5 y 19 m en el lago de Enol (Fig. 1), y trampas de sedimentos, dos a 5 y 19 m en Enol y una en el lago de Marboré, que fue arrastrada al litoral por malas condiciones meteorológicas.

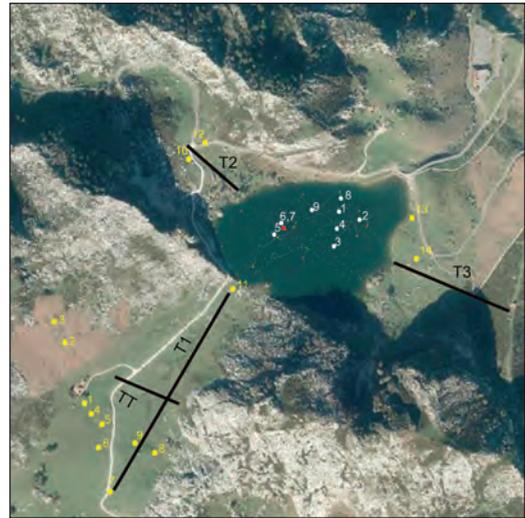


Fig. 1. Ortofoto con la localización de las trayectorias de los perfiles sísmicos (líneas verdes), situación del fondo (punto rojo), sondeos analizados (puntos blancos, la numeración corresponde a las siglas de la tabla 2), posición de los transectos de los suelos estudiados (tabla 1) y de los puntos de infiltración en amarillo (tabla 3).

Se realizaron 18 perfiles de suelos a lo largo de cuatro toposecuencias características de las principales unidades fisiográficas y morfoedáficas, tomando 58 muestras que fueron analizadas en los laboratorios de la Estación Experimental de Aula Dei (CSIC, Zaragoza) (Tabla I). Se han

realizado medidas de infiltración en la zona no saturada en 14 puntos de la cuenca del Lago de Enol (minidisco, presión de succión = 2 cm), con 4 medidas por punto, excepto en una en la que se hicieron 2, con un total de 54 medidas.

Tabla I. Coordenadas de los transectos y número de muestras de suelos analizadas en este proyecto.

		Coordenadas		N. M	Punto Cm Muestreo
		Inicio	Fin		
T-1	S-N	4792637	4793052	6	15-30
		338006	338196		
T-2	W-E	4793461	4793319	4	20-50
		338140	338358		
T-3	E-W	4793024	4793179	5	17-25
		339028	338718		
TT	E-W	4792762	4792843	3	20-30
		338151	337951		

Se realizó una campaña de prospección geofísica con el fin de estudiar la geometría y el espesor del relleno sedimentario de la cuenca del lago Enol utilizando un perfilador portátil tipo Chirp multifrecuencia 3100-p (Edge Tech) del IPE-CSIC, remolcado por una pequeña embarcación neumática. Se midieron un total de 12 líneas sísmicas alcanzando un total de 3,85 km. Los datos fueron procesados con el software Kingdom Suite. Se tomaron 25 sondeos cortos (de hasta 60 cm de longitud) en Enol y 6 en Marboré con un sondeador tipo Uwitec en diferentes zonas y profundidades.

Se realizaron perfiles físico químicos de agua con sondas multiparamétricas Hydrolab MS5 y DS5 de Hach®, y Pro Plus de YSI. El total de perfiles realizados son 13 para Enol, en la parte más profunda del lago, y 2 perfiles adicionales a 12 m para comprobar la homogeneidad lateral, y 3 en Marboré también en la zona más

profunda. Los parámetros medidos han sido: temperatura –T–, conductividad eléctrica –CE–, salinidad, pH, potencial redox –ORP–, concentración de oxígeno disuelto –OD–, presión total de gases disueltos –TDG–, intensidad de la radiación fotosintéticamente activa –PAR–, y concentración de clorofila-a. Paralelamente se realizaron muestreos de agua cada 5 metros de profundidad con una botella Van Dorn horizontal. Las muestras fueron filtradas inmediatamente a <0.45 µm y aciduladas con HNO₃.

Análisis de suelos y sedimentos

En los suelos se determinaron: 1) pedregosidad, granulometría y clasificación textural. 2) capacidad de campo, punto de marchitez y agua disponible. 3) pH y conductividad eléctrica. 4) contenido en carbonatos, materia orgánica (MO), carbono orgánico total (COT) y nitrógeno total (NT). 5) análisis geoquímico tras extracción total en digestor de microondas mediante ICP de elementos (28) alcalinos, alcalinotérreos, metales pesados, metaloides y trazas.

Los sondeos obtenidos en las campañas se cortaron longitudinalmente en dos secciones, se describieron y se muestrearon para posteriores análisis y en la actualidad se encuentran refrigerados a 4°C. Los análisis realizados (Tabla 2) son: a) composición química cada cm/500 micras, mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX) con un Avaatech XRF core-scanner de la Universidad de Barcelona; b) propiedades físicas e imagen digital mediante un Geotek MSCL © del IGME, y análisis en muestras discretas a resoluciones de 0.5 cm y 1 cm. El carbono total (CT) y carbono orgánico total (COT) y por diferencia el carbono inorgánico (CI) de los sondeos se analizaron con un analizador elemental LECO 144DR del IPE (CSIC). El análisis de N se ha realizado con un analizador elemental tipo VARIO MAX de la EEAD (CSIC). Los análisis isotópicos de δ¹³C PDB en

‰ y $\delta^{15}\text{N}$ AIR en ‰ en materia orgánica en los sedimentos, se han realizado en los servicios centrales de la UAM. El análisis químico y mineralógico de los sondeos, filtros y material de las trampas se ha efectuado por diferentes técnicas, (XRF DRX- ICP-AES, tras digestión ácida con HF, HClO₄, HNO₃, y HCl), en los laboratorios centrales del IGME y por microscopía electrónica de barrido en la Universidad del País Vasco. Se realizó una datación absoluta por isótopos de Pu que fue muestreado a 0,5 cm de

resolución. Los isótopos de Pu fueron analizados en un ICP-MS Thermo X Series equipado con un nebulizador ultrasónico CETAC 5000 en los Servicios Centrales de la Universidad de Cádiz (CASAS et al., 2015). Para completar la identificación de los componentes de los sedimentos se han realizado frotis de sedimento según SCHNURRENBERGER et al., (2003). El análisis de biomarcadores se sedimentos se ha realizado siguiendo la metodología expuesta en ORTIZ et al., (2016).

Tabla 2. Análisis efectuados en los sondeos tomados en el lago Enol (ENO del 1 al 9) y Marboré (MAR): P. F. Propiedades físicas (susceptibilidad magnética, densidad y conductividad), Dig: escaneo digital. FRXCS: Fluorescencia de Rayos X en continuo. Pu: Datación por Plutonio; COT/C/N: carbono orgánico total y C/N relación carbono orgánico/nitrógeno; DRX/FRX: Difracción de Rayos X, Fluorescencia de Rayos X.; Biom: estudio de biomarcadores y M. O. Estudio de frotis por microscopía óptica.

	Continuo						Muestra discreta				
	L	Prof	P. F.	Dig	FRXCS	Pu	COT-C/N	$\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$	DRX/FRX	Biom	M. O.
(1) ENO-13-1	23	4.5 m	x	x	x						X
(2) ENO-13-7	16	4.3 m					16	16	16	16	X
(3) ENO-13-S-9	42	10 m	x	x	x		42	-	33	33	X
(4) ENO-13-S-10	28	12 m	x	x	x		28	28	28		X
(5) ENO-13-S-15	58	20 m					59	34	22	22	X
(6) ENO-13-3-1	20	4 m					9	9			X
(7) ENO-13-3-2	25	20 m				30	51				X
(8) ENO13-14-2B-IG	85	10 m	X	X	X						X
(9) ENO13-11	30	21 m	X	X	X						X
MAR 14-3	25	24 m	X	X	X						X
MAR 14-4	31	17 m	X	X	X						X
MAR 14-5	18	16 m	X	X	X						X
MAR 14-6	14	9 m	X	X	X						X
MAR14-7	19	2 m	X	X	X						X
MAR14 8	18	10 m	X	X	X						X

Análisis de aguas

Se han analizado 44 muestras de agua de Enol (entradas al mismo y columna de agua a las pro-

fundidades arriba indicadas) y 25 en Marboré (columna de agua a diferentes profundidades) para la determinación de: i) aniones mayoritarios (SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , NH_3 , PO_4^{3-}),

carbono orgánico e inorgánico disuelto, tomados en muestras sin acidular y filtrados a 0.45 µm y ii) cationes mayoritarios y metales traza (Na, K, Mg y Ca por AAS, metales y trazas por ICP-MS, S y Si) por ICP-AES, en muestras aciduladas con HNO₃ concentrado (hasta ≈pH<2.0) y filtradas a 0.45 µm. En 10 muestras del Lago de Enol, se ha realizado un análisis microbiológico de aguas que incluye la identificación de *coliformes totales*, *enterococos* y *coliformes fecales* que fueron enviadas a un laboratorio comercial certificado. Por otro lado se han realizado análisis isotópicos de agua ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ y $\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$) en 5 muestras del Lago Enol y 5 en Marboré en la UAM.

Experimentación en microcosmos, test microbiológicos y modelización geoquímica

Se han realizado experimentos en microcosmos en recipientes de 30 L mezclando substratos orgánicos naturales presentes en el entorno como «*Potamogeton polygonifolius*» (500 ml), *Chara sp.* (1 L), herbácea de la orilla (500 mL), y 1 L de heces de vacuno, con sedimentos y agua del Lago Enol. Se perforaron y muestrearon a intervalos de 2 cm para la medida con una sonda YSI Professional Plus de temperatura, potencial redox (ORP), pH y conductividad específica una vez a la semana durante tres meses. Los análisis microbiológicos en agua a diferentes profundidades y en sedimento superficial se realizaron con test tipo HACH: BART™ Test for IRB (Iron Related Bacteria), SRB (Sulfate Reducing Bacteria) y BART™ (Test for ALGAE, MICRO ALGAE), para comprobar la existencia de bacterias relacionadas con el ciclo del hierro y del azufre (sulfato reductoras). Por último, se ha realizado una modelización geoquímica en los lagos de Enol/Marboré con el cálculo de los índices de saturación (IS) con respecto a algunas especies minerales mediante el programa PHREEQC (v. 3.) del USGS.

RESULTADOS

Lago de Enol

El mapa geomorfológico realizado (RODRÍGUEZ *et al.*, 2016), muestra los principales rasgos morfológicos y erosivos, así como la batimetría (Fig. 2). La cuenca tiene geometría circular, diámetro de unos 300 m, superficie de 133,000 m², volumen de 106 m³ y profundidades máximas de 22-23 m. La parte central tiene fondo relativamente plano y bordes escarpados en su sector SE. La construcción de la carretera de acceso a la mina durante los años 1891 a 1894 modificó la hidrología al construir un muro que represa el lago, inundando una zona de poca pendiente que dio como resultado una plataforma que en la actualidad no supera los 4 m de profundidad (Fig. 2).

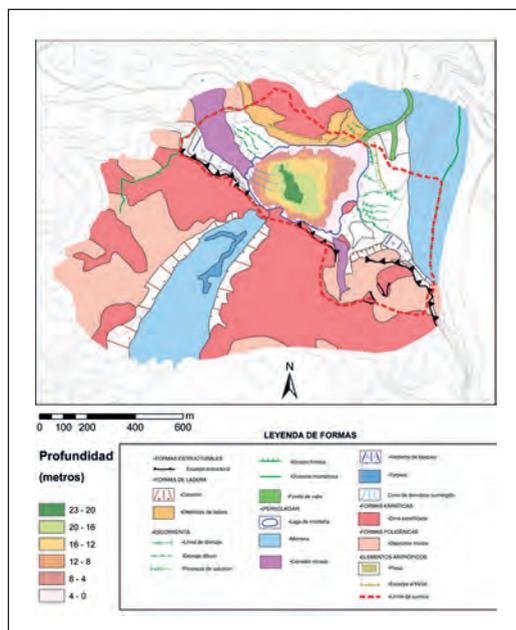


Fig. 2. Mapa geomorfológico de la Cuenca y batimetría del lago Enol.

La prospección geofísica de la cuenca de Enol y la correlación de estos datos con los sondeos

ENO04-ID-1K y ENO04-2A-1K (MORENO et al., 2010, 2011) ha permitido reconstruir la evolución sedimentaria del lago Enol desde el Tardiglaciario. Se han identificado dos grandes unidades sísmicas: una unidad inferior A (entre 2.5 y 4 m de espesor), y una unidad superior B (entre 2 y 5 m de espesor), que se dispone en «onlap» sobre la unidad inferior (Fig. 3), indicando una transgresión o desplazamiento de la línea de costa hacia el exterior del lago como resultado de un aumento en la lámina de agua. Dentro de las dos unidades se han identificado reflexiones caóticas semitransparentes organizadas en conjuntos con morfología sigmoidal o irregular que podrían representar depósitos de gravedad (deslizamientos y flujos de masas). Existe una reflexión continua que se puede identificar a lo largo de toda la cuenca y que se correlaciona con el contacto entre las unidades sedimentarias 3 (3-6 m inferiores de secuencia; edad MIS 3, >25 cal kyrs BP) y 1-2 (3 m superiores, edad LGM-Holoceno), marcado por el contraste entre dos litologías diferenciadas (facies siliciclásticas laminadas y bandeadas con bajos contenidos en MO y limos con altos contenidos en MO y carbonatos) que están caracterizadas por densidades relativamente altas y bajas, respectivamente. Este cambio sedimentológico representa el paso de condiciones glaciolacustres (con presencia de una masa de hielo en las cercanías) a condiciones de lago profundo similares a las actuales, con mayor productividad orgánica, tal y como sucede en otros lagos alpinos durante este periodo.

El lago está ubicado en un ambiente kárstico, con escorrentía superficial escasa y episódica. La cuenca vertiente al lago es muy restringida, con apenas 1 km² de extensión (Figs. 2-4). La vega de Enol se encuentra prácticamente desconectada del drenaje superficial del lago formando un valle decapitado de apenas unos cientos de metros de longitud, quedando una pequeña cuenca endorreica con una turbera estacional que no drena superficialmente al lago. Las líneas

naturales de drenaje más evidentes están situadas en su borde SE, que vierte de manera esporádica las aguas del macizo de Mosquital. El resto de la escorrentía superficial lo forman líneas de drenaje difuso sobre los materiales de ladera y till del entorno. La Figura 4 muestra el mapa de usos del suelo de la zona y la Tabla 3 los valores de infiltración de la escorrentía.

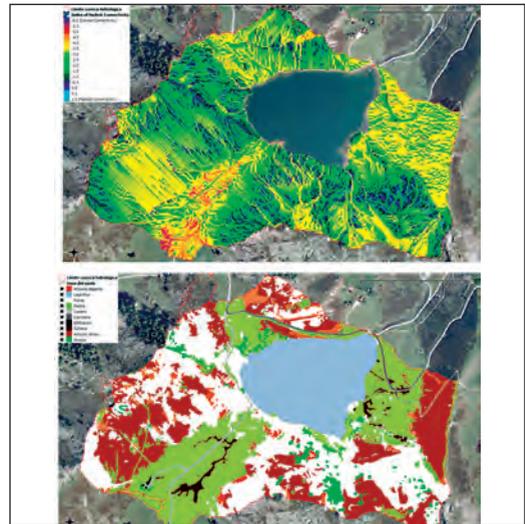


Fig. 3. Arriba perfil sísmico del lago Enol cuya localización viene marcada en el cuadro de la parte inferior derecha. Abajo: interpretación del perfil sísmico: Unidad superior A caracterizada por una alta densidad de reflexiones paralelas de elevada amplitud y una unidad B caracterizada por reflexiones de amplitud más variable que se disponen en «onlap» sobre la unidad inferior. Las dos unidades están separadas por una reflexión continua de gran amplitud.

La construcción de la carretera y el camino para senderistas que conducen al lago de La Ercina han tenido incidencia en el régimen y geometría de la cuenca hidrológica, propiciando la concentración de la escorrentía de la ladera oriental en una sola línea de drenaje con los consiguientes procesos de incisión erosión interna del suelo o sufusión (*piping*) que derivan en pérdida de suelo y su posterior sedimentación en el lago (Fig. 5). El encauzamiento de las aguas pluviales por la cuneta de la carretera ha provocado un aumen-

to en unas 10 ha de la cuenca vertiente hacia Enol en la ladera de Entrelagos, lo que equivale prácticamente a doblar su superficie acarreado además la concentración del flujo hídrico superficial difuso en dos únicas líneas de desagüe que dan al lago, incrementando la conectividad hidrológica efectiva y causando así un notable aumento de la incisión (cerca de 1 m) en una ladera de materiales de escasa cohesión (till glaciar). Se producen claros fenómenos de erosión hídrica, esencialmente en los bordes del lago donde se concentra la mayor afluencia de excursionistas y de cabaña ganadera, que con el pisoteo contribuyen a los fenómenos de pérdida acelerada de suelo y a la generación de microformas erosivas (ver Fig. 5) (RODRÍGUEZ *et al.*, 2016).

Tabla 3. Datos de las medidas de infiltración no saturada en la Cuenca del Lago de Enol (minidisco, presión de succión = 2 cm). Se hicieron 4 medidas en cada punto, excepto en 1 que se hicieron 2. Valor medio de 200.3 mm / día (sd=111.3 mm / día). La situación de los puntos se puede observar en la Figura 2.

1	ladera	141,3 mm / día
2	Ladera	293,3 mm / día
3	Ladera	424,0 mm / día
4	Ladera	112,0 mm / día
5	Pasto ladera baja pendiente	96,0 mm / día
6	Fondo de valle - divisoria	160,0 mm / día
7	Camino tierra compactada	10,9 mm / día
8	Corral (suelo compactado)	88,0 mm / día
9	Fondo de valle - turbera	301,3 mm / día
10	Pasto y helechos en ladera	274,7 mm / día
11	Litoral	240,0 mm / día
12	Brezal en ladera	142,9 mm / día
13	Cicatriz	293,3 mm / día
14	Cicatriz	226,7 mm / día

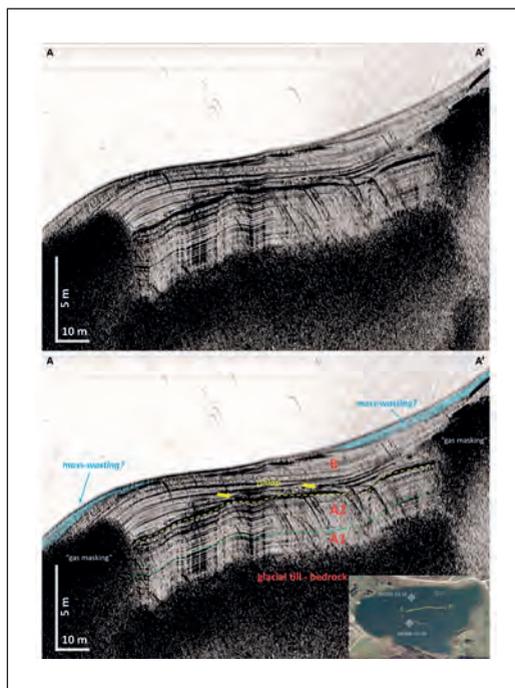


Fig. 4. Arriba: Mapa del índice de conectividad hidrológica obtenido siguiendo la metodología propuesta por BORSELLI *et al.* (2008), modificada para zonas de alta pendiente, y a una resolución de 5 x 5 metros de tamaño de píxel. Abajo: Mapa simplificado de los principales usos del suelo.

Los suelos de la cuenca del lago son leptosoles pedregosos y regosoles altamente compactados (<60 cm) desarrollados sobre till glaciar y con texturas franco limosas. Son ligeramente ácidos (pH $5,9 \pm 0,7$, rango de 5,0 a 7,9), con baja salinidad (CE = 150 ± 14 mS cm^{-1}) y con bajo contenido de carbonato ($0,18 \pm 0,23\%$, rango de no detectado a 1,27%), ricos en sulfatos (130-1419 mg kg^{-1} , S azufre total). Los contenidos en Fe y Al son 58141 ± 18873 mg kg^{-1} y 32605 ± 4301 mg kg^{-1} , respectivamente. El hecho más relevante es que todos los perfiles mostraron un enriquecimiento claro en materia orgánica (hasta un 22% del SOC, carbono total) y fósforo (hasta 1025 mg kg^{-1}) en el horizonte superior. En los transectos T2 y T3 mostraron un aumento tanto de la materia orgánica y nitrógeno (hasta el 0,7% $\text{N}_{\text{Kjeldal}}$) de las zonas distales hacia la orilla del

lago, que probablemente refleja concentración de ganado alrededor del lago. La relación C: N para estos suelos oscila entre el 19 y el 23, cerca de las plantas terrestres C3, en coherencia con los datos obtenidos en el análisis de los biomarcadores en los sondeos de sedimento en gran parte de la cuenca (ORTIZ et al., 2016).

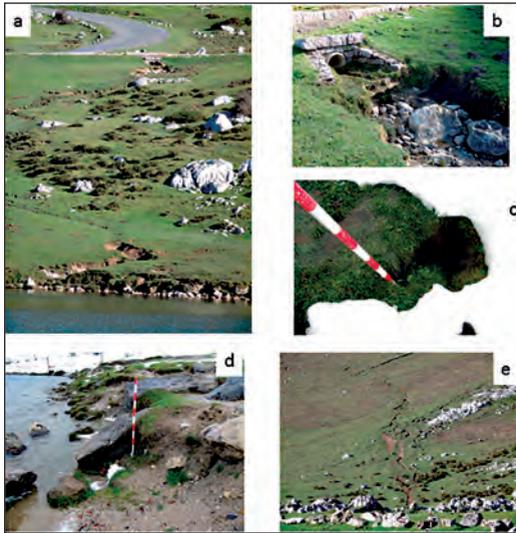


Fig. 5. Fotos de rasgos erosivos de la cuenca de Enol. a) Vista general de la incisión en el suelo provocada por el drenaje de la carretera. b) Efectos erosivos del colector principal del drenaje de la carretera a La Ercina. c) Orificio de entrada del flujo a galerías de erosión interna del suelo (sufusión o piping). d) erosión de las orilla NE del lago. e) Rills o erosión recientes en la ladera desmatorralizada en la Vega de Enol.

A continuación se mostrarán los resultados físico-químicos más representativos obtenidos para el Lago de Enol (Tablas 4, 5 y 6). El registro continuo de temperatura obtenido a por los termistores (2013 - 2015) muestra un periodo de mezcla de aproximadamente 4 meses (diciembre - febrero), con temperaturas entre 3°C-12°C, y un periodo de estratificación de unos 8 meses (marzo - noviembre). Las temperaturas máximas del agua superficial son de 22°C en verano, salvo el año 2015, donde se registraron temperaturas de hasta 24°C en superficie, debido a las altas

temperaturas que se alcanzaron. Estos perfiles (Tabla 4) muestran una termoclina a 6-7 m de profundidad. La radiación fotosintéticamente activa (PAR) (1% PAR a 14-15 m) y el disco de Secchi (6-7 m) indican que la intensidad lumínica es suficiente para que la fotosíntesis sea viable en buena parte de la lámina de agua. Aunque se han observado picos de fitoplancton bien definidos (2-2.5 µg/L) hacia la termoclina (7-8 m, jul 2014) o incluso en profundidad (14 m, jul 2013), los valores de clorofila son bajos (< 0.5-1 µg/L), incluso inferiores a los descritos por otros autores (GARCÍA-CRIADO & MARTÍNEZ 2010, PONS & NIEMBRO, 1986). Los valores de P (< 6 µg/L) son muy bajos, y del mismo orden que los encontrados en estudios previos (6,78 y 11,79 µg/l). Los datos de OD y ORP indican que en mayo comienza la reducción progresiva de la concentración de oxígeno y el desarrollo de la anoxia hasta los meses de octubre - noviembre (Tabla 4). En noviembre del 2014 existían todavía 6 metros de anoxia en el fondo del lago, valores elevados para esa época del año, hecho que ha vuelto a observarse en Noviembre de 2015. El hipolimnion completamente anóxico (i. e. <0.1 mg/L O₂) llega a tener hasta 9 m de espesor a finales de verano (13-22 m). Los datos obtenidos de los termistores de oxígeno disuelto indican que el volteo se produce en pocas horas a finales de octubre/noviembre.

El resultado de los experimentos de microcosmos pone de manifiesto que el sustrato más reactivo de los utilizados son las heces de vacuno, induciendo cambios importantes en la masa de agua y aumentando las concentraciones finales de alcalinidad y amonio de forma mucho mayor que en el resto de sustratos. Por otro lado, los test BART indican la presencia de diferentes comunidades bacterianas tanto en columna de agua como en sedimentos, indicando la presencia de bacterias relacionadas con el Fe, sulfatoreductoras y entéricas, así como microorganismos patógenos como *Pseudomonas* y *enterococos*.

Tabla 4. Arriba: composición química de las muestras de agua, a las profundidades expresadas en la primera columna. Abajo: Parámetros físico-químicos obtenidos con la sonda multiparamétrica para mayo, julio y noviembre del año 2013 y para noviembre del 2014 (última columna).

	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₂	NO ₃	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	SiO ₂	TIC	TOC	Al	As	Ba	Fe	Mn	Zn	Co	Cr	Cu	Hg	
(m)	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	μg/L	mg/L	mg/L	mg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L						
0	28	3	8	8	84	0,661	0,037	0,00	<0,08	0,1	18,7	1,82	8,01	0,61	2,06	< 15	2,36	20,3	<0,05	0,16	0,32	< 0,5	
5	28	3	8	5	87	0,643	0,041	0,00	<0,08	0,1	19,1	1,87	5,44	0,58	2,41	< 15	1,27	6,03	<0,05	0,17	< 0,2	< 0,5	
10	32	3	8	7	101	1,067	0,043	0,00	<0,08	0,1	27,9	1,95	3,2	0,47	1,89	< 15	2,11	11,2	<0,05	0,14	< 0,2	< 0,5	
15	35	4	7	4	117	0,663	0,032	0,00	<0,08	2,1	25,8	1,77	2,01	0,7	6,69	< 15	532	11,9	<0,05	0,13	< 0,2	< 0,5	
18	35	4	8	4	121	0,496	0,037	0,00	<0,08	2,9	26,16	1,94	7,43	1,24	9,49	107	998	14,9	0,1	0,14	0,52	< 0,5	

	Temp °C			SpCond μS/cm			pH			ORP (mV)			LDO (mg/L)							
	may	nov	13	may	nov	13	may	nov	13	may	nov	13	may	nov	13					
0,5	9,08	22,25	10,24	12,34	162	165	176	166	8,32	8,35	8,01	7,85	288	133	156	244	10,48	8,37	9,24	7,13
1,5	9,07	22,26	10,24	12,34	163	165	176	167	8,37	8,37	8,01	7,88	282	131	155	244	10,42	8,36	9,25	7,14
2	9,07	22,25	10,25	12,33	163	166	177	166	8,37	8,37	7,99	7,94	281	130	155	243	10,42	8,35	9,21	7,15
5,5	9,07	15,32	10,25	12,35	163	173	177	166	8,38	8,64	8,02	7,97	274	126	153	243	10,37	11,94	9,17	7,1
8	9,02	11,18	10,24	12,37	164	168	176	167	8,36	8,74	8,01	8,01	270	128	153	241	10,08	11,94	9,13	7,02
10	8,13	10,09	10,24	12,35	165	172	176	167	8,37	8,62	8,03	8,02	269	131	152	240	10,99	11,13	9,09	7,02
15	6,86	7,37	10,21	9,77	177	191	177	200	7,86	7,48	7,98	7,47	286	149	150	147	7,12	4,48	8,75	0,8
18,5	6,8	7,14	10,19	7,83	181	199	178	218	7,7	7,27	7,9	7,31	292	149	150	-164	6	1,24	8,26	0,1

Tabla 5. Arriba: composición química de las muestras de agua, a las profundidades expresadas en la primera columna para el lago Marboré. Abajo: Parámetros físico-químicos obtenidos con la sonda multiparamétrica para septiembre/octubre del año 2013, 2014 y 2015.

Prof. (m)	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	SiO ₂	TIC	TOC	Al	As	Ba	Fe	Mn	Zn	Co	Cr	Cu	Hg
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	μg/L	mg/L	mg/L	mg/L	μg/L	μg/L	μg/L	μg/L						
0	9	8	4	15	37	1	0,00	0,00	0,00	3,5	0,1	9,36	0,89	12	0,30	2,59	12	2,59	3	<0,05	1	0,15	0
7	10	8	4	17	39	1	0,00	0,00	0,00	0	0,1	7,02	0,84	41	4,17	5,20	41	5,20	885	4,06	1	16,60	4
15	16	5	4	13	46	1	0,00	0,00	0,00	0	0,5	13,51	0,84	27	0,71	3,80	27	3,80	45	0,11	0	4,72	1
20	12	8	4	12	50	1	0,00	0,00	0,00	0	0,5	12,96	0,80	9	2,84	1,80	9	1,80	54	0,19	0	0,86	3

	Temp °C			SpCond μS/cm			pH			ORP (mV)			LDO (mg/L)		
	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015
0,42	7,87	10,84	6,73	61	65	71	7,29	7,15	6,86	147	442	301	9	9,18	-
1,44	7,85	10,33	6,73	62	66	71	7,29	7,44	7,1	146	442	296	8,99	9,44	-
2,48	7,86	10,03	6,73	61	65	71	7,26	7,37	7,22	147	448	288	8,99	9,45	-
5,23	7,68	8,57	6,71	61	66	71	7,31	7,68	7,29	144	443	280	8,98	10,02	-
7,34	7,05	7,31	6,7	63	66	71	7,41	7,72	7,32	141	446	276	9,14	10,51	-
10,23	5,04	6,03	6,67	74	67	72	7,61	7,77	7,35	138	449	271	9,33	10,67	-
15,13	3,6	5,21	6,6	88	67	72	7,51	7,65	7,34	138	457	268	8,73	10,58	-
19,15	3,41	4,93	6,28	92	68	73	7,47	7,51	7,42	137	462	263	8,33	10,36	-
25,21	3,23	4,76	5,39	97	69	80	7,11	7,45	7,49	149	462	261	7,29	10,1	-

Tabla 6. Datos isotópicos de agua a diferentes profundidades para Marboré (arriba) y Enol (abajo).

	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$		$\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$	
	2013	2014	2013	2014
0	-11,54	-10,91	-78,36	-72,9
7	-11,42	-10,95	-78,27	-72,7
15	-11,66	-11,26	-79,28	-74,3
20	-11,59	-11,25	-79,30	-74,5
25		-11,25		-74,4

	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$		$\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$	
	2013	2014	2013	2014
0	-6,96	-6,27	-46,17	-39,2
5	-7,04	-6,26	-45,92	-39,2
10	-7,02	-7,29	-46,14	-45,0
15	-8,06	-7,49	-51,94	-46,0
20	-8,27	-7,54	-52,62	-46,1

Los análisis realizados en este proyecto reflejan como el aumento de nivel de agua, inducido como resultado de la construcción del dique, produce un cambio neto en el tipo de sedimentos en el lago, pasando de ambientes someros a profundos, y siendo más evidente en zonas litorales, donde se pasa de exposición subaérea a ambientes de escasa profundidad de lámina de agua, pero dentro de un ambiente lacustre.

El análisis comparativo entre los datos de COT, C/N y $\delta^{13}\text{C}$ de varios sondeos indican variaciones significativas en el contenido en MO a lo largo del registro, y en especial desde finales de la pequeña edad del hielo, y a partir de la segunda mitad del pasado siglo xx. Por un lado hay un considerable descenso del COT en la Pequeña Edad del Hielo, debido a las condiciones frías y áridas reinantes, y por otro, se observa un claro aumento del COT a partir de los años 70 (siglo xx), que coincide con una variación en las relaciones C/N y $\delta^{13}\text{C}$ de la MO (Fig. 6). Estos datos son coherentes con el tipo y contenido

en lípidos de estos sondeos (ORTIZ *et al.*, 2016) donde se observa un predominio de los aportes de plantas terrestres desde el siglo xvii (C31 y C29) y un aumento de la productividad fitoplanctónica en la unidad superior (ca. 1980-2013 AD), ligada a una etapa actual, más cálida y seca. Estos mismos datos indican que el grado de degradación de la materia orgánica es baja en etapas frías (Pequeña Edad del Hielo) y mayor en la actualidad (cálida). Por último, la presencia de esteroides (β -sitosterol, campesterol stigmasterol, esteroides fecales de herbívoros, 24-ethyl coprostanol) es frecuente desde el siglo xvii. Con respecto al resto de indicadores analizados, se ha detectado un aumento de la concentración en algunos metales pesados en el sedimento en épocas recientes (Cu, As, Zn y Pb), no explicables por el cambio de material detrítico aportado a la cuenca, sino por contaminación minera y/o atmosférica probablemente de origen local o regional.

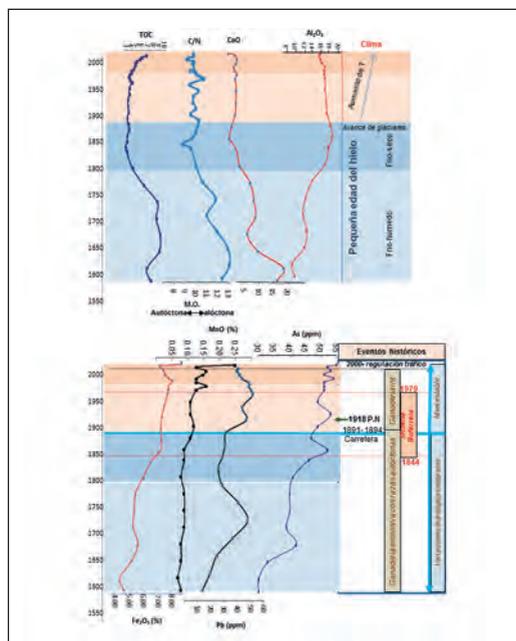


Fig. 6. : Indicadores geoquímicos del sondeo ENO S-15, a 21 de profundidad. Escala vertical en edad según correlación con el modelo de edad obtenido por LÓPEZ-MERINO *et al.*, 2010. COT: Carbono orgánico Total; C/N relación molar de carbono orgánico / nitrógeno total; Datos químicos por FRX en % y ppm.

Lago Marboré

El lago de Marboré, situado en un lugar remoto bajo un clima de alta montaña (Dfc), tiene morfología alargada, 600 x 300 m y una superficie de 14,64 ha con una profundidad máxima medida de 29 m. Es un lago de sobreexcavación glaciar, enclavado en areniscas calcáreas y, al igual que Enol, con marcado control estructural y un cierto funcionamiento kárstico. La evolución glaciar de la zona ha sido descrita por GARCIA RUIZ *et al.*, (2014). No hay suelos bien desarrollados en su cuenca vertiente, que está configurada por afloramientos rocosos y pedreras, donde no es posible el aprovechamiento ganadero. Las escasas modificaciones y afecciones realizadas en la cuenca se remontan a 1926-1938, con la construcción de una presa de unos 12-15 metros de altura con grandes filtraciones en su base, por lo que nunca llegó a ser operativa. Debido a su elevada altitud y difícil acceso durante gran parte del año, el impacto antrópico directo es bajo, limitándose a visitantes esporádicos que acceden a la zona del Glaciar de Monte Perdido y al Refugio de Tucarroya. De la batimetría de detalle, y del estudio preliminar de los sondeos se pueden diferenciar tres zonas (Fig. 7):

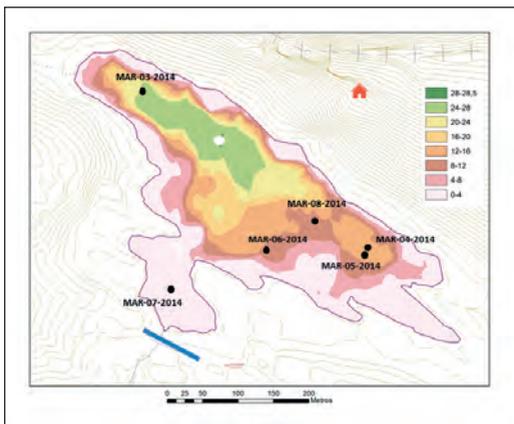


Fig. 7. Batimetría de Marboré con la posición de los sondeos cortos tomados en este trabajo (puntos rojos) y el punto de fondeo (punto blanco).

- A. La cubeta principal de hasta 28,5 m de profundidad, con paredes de alta pendiente de dirección NO-SE, y cuyos aportes vienen muy influenciados, en épocas de alta escorrentía, por el arrastre de los materiales de la brecha de Tucarroya y del barranco del sector NO.
- B. Una pequeña cubeta de hasta 20 m de profundidad, al SE de la anterior, separada del resto por un pequeño umbral, donde los datos preliminares de los sondeos indican una sedimentación típica de un lago de alta montaña con preservación de laminaciones finas clásticas, posiblemente de carácter estacional.
- C. Una zona muy poco profunda (menos de 4 m), resultado de la presencia de otro segundo umbral rocoso que finaliza en el represamiento inoperativo, donde la sedimentación es clástica de grano fino y de tipo masivo.

Parte de los termistores de temperatura fueron instalados en el 2012, por lo que se cuenta con un registro de temperaturas desde ese otoño. La temperatura máxima de la superficie del lago de Marboré ha sido de 10-11°C en agosto, para los años 2013/2014, siendo 3°C superior en la capa superficial, durante el verano de 2015, debido a la ola de calor del pasado año (Tabla 6). La estratificación térmica estival es muy breve, de agosto a septiembre, con inversión térmica y superficie helada desde diciembre a julio. Los perfiles de temperatura indican una termoclina a 6-7 m de profundidad, con temperaturas inferiores en 4-7 grados con respecto a la superficie en función del año muestreado. En el año 2015, y aun siendo finales de septiembre, el lago estaba ya prácticamente mezclado, con temperaturas de 6.73°C en superficie y 5.39°C en el fondo. La Tabla 6 muestra los valores de T, pH, Spc, ODy ORP para el año 2015. El nivel de oxigenación (LDO % - mg/L), muestran bajos consumos de O₂. Los contenidos en nitratos < 1 mg/l, TOC < 0,2 - 0,8 mg/l - y P < 6 µg/l, SiO₂ 0,3 mg/l son bajos. Aunque varios metales analizados están por

debajo del límite de detección del método utilizado (Tabla 6), se han observado cantidades apreciables de Fe, Zn, Co, Cu y Mn en torno a la termoclina, patentes el año 2013 cuando aún existía estratificación térmica, llegando a alcanzar valores de hasta 885 $\mu\text{g/L}$ de Zn, 70 $\mu\text{g/L}$ de Mn y 4519 $\mu\text{g/L}$ de Fe el año 2013. Los valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ y $\delta\text{D}_{\text{VSMOV}}$ se muestran en la Tabla 5.

Se tomaron 6 sondeos cortos (de hasta 40 cm), que fueron escaneados y analizados químicamente por XRF. La correlación e integración de los datos de este proyecto con los obtenidos por VALERO-GARCES *et al.*, (2013) y OLIVA-URCIA *et al.*, (2013), nos permitirá establecer el modelo sedimentológico del lago de

Marboré para los últimos cientos de años. La sedimentación del lago de Marboré es esencialmente clástica, con nulos o escasos carbonatos, ni detríticos ni autigénicos, siendo característica la existencia en el registro de finas laminaciones clásticas originadas por decantación de material de grano fino a partir de la capa de hielo en invierno, y el aporte por escorrentía de material más grosero en periodos de deshielo o verano. Al igual que en los sondeos anteriores, una característica de todos ellos, es la presencia de valores altos de Pb en los intervalos, correspondientes a la contaminación atmosférica por quema de gasolinas con Pb y otro segundo episodio correspondiente a minería local y regional aunque no se descartan fuentes más lejanas (Fig. 8).

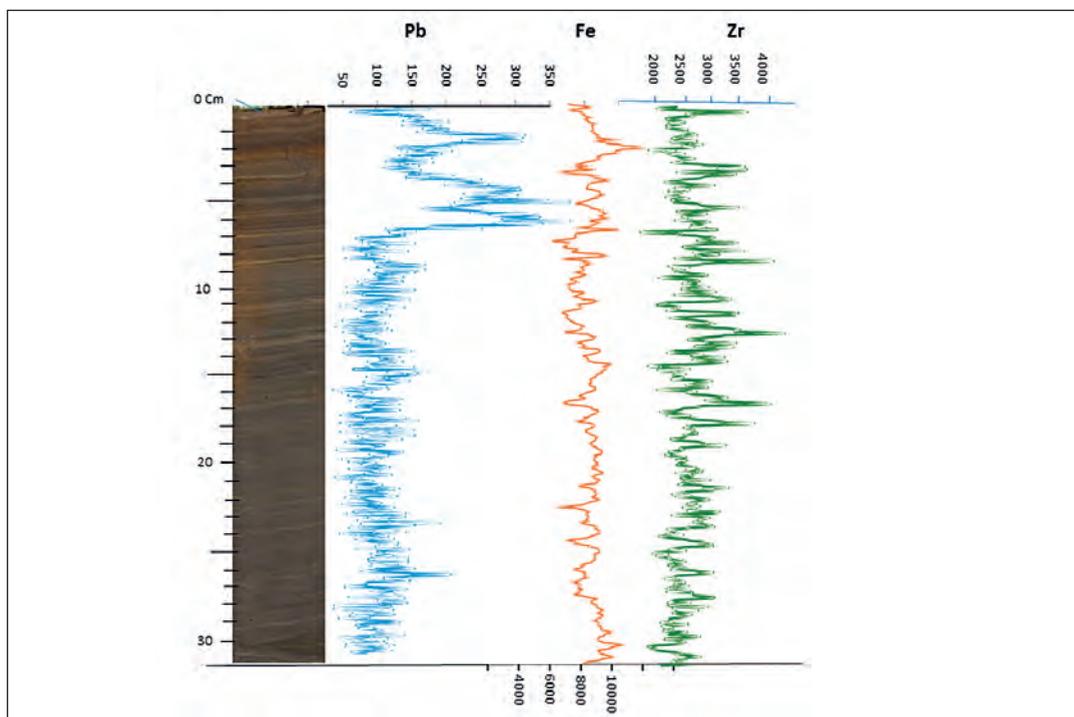


Fig. 8. Imagen del Sondeo (MAR-04), situado a 17 m de profundidad en la cubeta secundaria de Marboré donde se observan finas laminaciones desde la superficie hasta la base. Perfil del contenido en Pb, Fe y Zr obtenidos con el XRF core-scanner. Datos expresadas como área de los picos cada 500 micras. Las anomalías superficiales de Pb a menos de 10 cm no se correlacionan con otros elementos como el Si o el Al (no mostrados) ni con el contenido en Fe o Zr. Las oscilaciones de Zr pueden deberse a alternancias a nivel micrométrico de capas de diferente granulometría.

DISCUSIÓN

La recopilación de datos históricos (VEGAS *et al.*, 2014), los datos obtenidos en los testigos de sedimento, el estudio de la geomorfología y red de drenaje y de la dinámica actual de los lagos nos lleva a poder establecer el funcionamiento de los lagos, la presión antrópica, los impactos y tendencias de futuro previsible y así como las posibles medidas de gestión a tomar para la correcta conservación de estos ecosistemas.

Para el lago de Marboré, los datos disponibles hasta el momento siguen siendo limitados, debido a la inaccesibilidad del mismo, y el alto coste y el breve espacio temporal que existe para la realización de los trabajos necesarios. Sin embargo, los datos obtenidos en este proyecto han permitido comenzar una serie continua de datos de temperatura a 5 profundidades diferentes y obtener perfiles físico-químicos que nos posibilitan establecer, de forma preliminar, el funcionamiento, régimen térmico y los posibles impactos que puede sufrir este lago. Marboré presenta una estratificación térmica muy corta en los meses de verano, y posteriormente una ligera estratificación inversa en invierno, con temperaturas de cero grados en la parte superior e inferiores de 1-2 °C en toda la columna de agua en la práctica totalidad del invierno. Por tanto, el lago es dimíctico frío y (ultra-) oligotrófico, debido a la escaso aporte de nutrientes, escasa productividad primaria y bajo consumo de O₂. Los únicos datos existentes hasta la actualidad de Marboré eran los obtenidos por la Confederación Hidrográfica del Ebro (2013), en relación al establecimiento del estado ecológico de esta masa de agua que fue considerada como «moderada» debido a los datos de invertebrados bentónicos, con desarrollo limitado debido al bajo nivel del lago debido, probablemente, a sequía. Sin embargo, el resto de parámetros medidos entran dentro del buen estado y son coherentes con los obtenidos en este trabajo: bajas concentraciones

de nutrientes (1 mg/L NO₃ y 0,018 mg/L NO₂) y en P total (9.1 mg/m³); pH de 8.2 y alcalinidades de 0.5 (meq/L), conductividades de 74 µs/cm, y transparencia de disco de Secchi de 6.2 m y valores de clorofila-a de 0.65 µg/L. Considerado por la CHE como un lago de alta montaña alcalino, al igual que en este trabajo, no se observaron durante el periodo de 2007-2013 ni alteraciones en la zona ribereña ni en el régimen hidrológico o en la cubeta. Es en los metales traza presentes en columna de agua donde se muestran valores ligeramente superiores incluso a los encontrados en las aguas de Enol. Es durante el año 2013, y en torno a la termoclina, cuando el lago estaba estratificado cuando los valores de metales traza fueron significativamente altos. Como primera hipótesis se propone que parte de ellos (Fe, Zn, Cu y As) puedan proceder de la oxidación y posterior lixiviado de sulfuros/carbonatos presentes en las rocas sedimentarias de la cuenca hidrológica (OLIVA-URCIA *et al.*, 2009). En todo caso, no se puede descartar contaminación atmosférica difusa a gran escala, ya que esta ha sido detectada en el registro sedimentario de Marboré como un aumento de Pb a pocos centímetros de la superficie que corresponde con el uso de las gasolinas, y a la actividad minera en épocas medievales (Fig. 8).

La anoxia hipolimnética del Lago Enol

En este lago se ha detectado una anoxia hipolimnética de espesor y duración superior a la deseada en un ambiente de montaña y superior a la presente en lagos equivalentes en altitud y localización geográfica (GARCÍA-CRIADO & MARTÍNEZ, 2010). En base a los datos del estudio de fitoplancton, perfiles de Chl-a y valores de fósforo (GARCÍA-CRIADO & MARTÍNEZ, 2010, PONS & NIEMBRO 1986), se puede afirmar que la productividad primaria y el contenido en P son muy bajos, por lo que hay que buscar otras razones para explicar el elevado

consumo de oxígeno que se está produciendo en este sistema. La extensión de la anoxia, en tiempo y volumen afectado, indican que existen posibilidades de tener largos periodos en verano en el futuro donde la anoxia se extienda hasta bien entrado el otoño e invierno e incluso llegar a una indeseada situación de meromixis. En la actualidad se extiende hasta mediados de noviembre, afectando a un tercio de la superficie del sedimento y a un 15% del volumen del lago, valores superiores que los detectados por los anteriores autores. En este proyecto se propone que la causa se debe a una acumulación de factores que han actuado desigualmente en los dos últimos siglos en el entorno del lago:

- a) El continuo aporte de materia orgánica terrestre procedente de los horizontes superiores del suelo. Aunque la mayor actividad ganadera se produjo antes del siglo XIX-XX, la presencia de grandes contenidos de MO en el suelo y los procesos de erosión actuales, permiten seguir manteniendo un flujo constante de MO al lago. Los modelos de edad obtenidos por LÓPEZ-MERINO *et al.*, (2011) y CASAS *et al.*, (2015), indican que a partir de 1950 hay un aumento en la tasa de sedimentación, derivado, probablemente, al aumento de la erosión en algunas laderas, que se correlaciona bien con el aumento del contenido en COT en los sedimentos y con variaciones en las relaciones TOC/TN y $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de la materia orgánica. Igualmente, los análisis químicos del agua que circula por las incisiones de las laderas del lago, indican que la lixiviación de los componentes del suelo representan una importante fuente de MO, nitrógeno y sulfato al lago.
- b) Erosión acentuada de las laderas debido a la canalización de la escorrentía: Las infraestructuras derivadas de la actividad de la minería, el turismo y el cambio en el régimen hidrológico están contribuyendo al desarrollo de la anoxia hipolimnética.

Las variaciones del nivel del lago fueron naturales hasta la construcción del dique, y forzadas a partir de esta fecha, con una estabilización del nivel desde entonces a la actualidad. La inundación de la plataforma de hasta 4 m (Fig. 2), posiblemente supuso un incremento adicional de MO al lago en el comienzo del siglo XX. La erosión se acentúa considerablemente por la alta afluencia de turistas, presencia de ganado, y tareas de desforestación y desbroce en laderas del entorno.

- c) La naturaleza de los compuestos orgánicos (algunos de origen animal) que llegan al lago y la ecología microbiana (bacteriana) presente en el mismo. Aunque este punto quedaba fuera de los objetivos de este proyecto, y es necesario un estudio más detallado en este tema, los datos microbiológicos de aguas y en sedimentos superficiales, así como los resultados de los experimentos de microcosmos indican que existen grupos de bacterias (heterótrofas y anaerobias) capaces de degradar la materia orgánica de forma mucho más eficiente que en otros contextos y que los compuestos derivados de la actividad ganadera aceleran de forma clara los procesos de consumo de materia orgánica en el lago.
- d) La naturaleza del sustrato, rica en óxidos de Fe y Mn: la mina de Buferrera extraía minerales de manganeso: pirolusita, manganita y psilomelana y, en menor proporción, de hierro (hematites e hidróxidos de hierro) (VEGAS *et al.*, 2015). Hay un periodo de casi 130 años de desarrollo minero, con un impacto directo en los lagos de Enol y La Ercina, que se refleja en el registro sedimentario durante las etapas de minería activa, contribuyendo a aumentar el fondo geoquímico de estos dos elementos en la zona, y controlando de forma indirecta los procesos redox y los procesos biogeoquímicos que se están dando en el lago.

CONCLUSIONES

Los datos expuestos en este trabajo ponen de manifiesto el alcance de la actividad humana sobre los ecosistemas de montaña. Marboré permanece en un estado casi prístino, con escasa afectación antrópica directa, pero queda claramente expuesto a la contaminación atmosférica difusa y a fenómenos locales de enriquecimiento en metales traza. Enol sufre, desde hace décadas, la presión antrópica directa en diferente grado y forma, que ha afectado la evolución natural del ecosistema con una clara tendencia a la eutrofización y a una alta tasa de consumo de oxígeno en el fondo del lago. La situación generalizada de calentamiento global puede tener un efecto negativo debido a que el aumento de temperatura favorecería el calentamiento del epilimnion y por tanto periodos de estratificación más largos, aumentando el incremento de la anoxia en duración y extensión.

Este proyecto ratifica la hipótesis de partida de la necesidad urgente de monitorización y control de variables limnológicas, temperatura y en el caso de Enol del oxígeno disuelto, así como un análisis limnológico básico periódico

y la aplicación urgente de medidas correctoras para evitar la sobreerosión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores dedican este trabajo a la Dra María Rieradevall, coordinadora del proyecto CLAM, del que este subproyecto forma parte, fallecida en Octubre del año 2015. Este proyecto ha sido financiado con una ayuda del Organismo Autónomo de Parques Nacionales (OAPN) al proyecto «Evaluación y seguimiento del cambio global en tres lagos de alta montaña: Enol, Marboré y La Caldera. Indicadores físico-químicos», (referencia 533S/201). Agradecemos al personal y guardería de los Parques Nacionales de Picos de Europa y Ordesa y Monte Perdido la ayuda prestada durante el transcurso del Proyecto. Así mismo agradecemos a Acciona la ayuda prestada para el almacenamiento de material en Marboré, al personal del laboratorio del IGME, UB, UPV, UAM, UPM y UCM por la ayuda en la realización de los análisis, al Dr. I. Yusta de la UPV por el estudio por microscopía electrónica de barrido, a Fernando Barreiro por la ayuda en la campaña de sísmica y a los alumnos Aida Chaos y Pablo Ballester de la UCM e Inés Gutiérrez de la UAM.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATTARBEE, R. W. y BINNEY, H. A. (2008): Natural Climate variability and global warming: A Holocene perspective. Wiley-Blackwell Publishing Ltd. 276 p.
- BORSELLI, L.; CASSI, P. y TORRI, D. (2008): Prolegomena to Sediment and flows connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *Catena*. 75: 268-277.
- CAMARERO, L.; MASQUÉ, P.; DEVOS, W.; ANI-RAGOLTA, I.; CATALAN, J.; MOOR, H. C.; PLA, S. y SÁNCHEZ-CABEZA, J. A. (1998): Historical variations in lead fluxes in the Pyrenees (Northeast Spain) from a dated lake sediment core. *Water Air Soil Pollution*. 105: 439-449.
- CAMARERO, L.; BOTEV, I.; MURI, G.; PSENNER, R.; ROSE, N. y STUCLIK, E. (2009): Trace elements in alpine and arctic lake sediments as a record of diffuse atmospheric contamination across Europe. *Freshwater Biology*, 54(12): 2518-2532.
- CASAS, M.; MATA, P.; BARBERO, L.; MORENO, A.; MORELLÓN, M.; VEGAS, J.; SÁNCHEZ-ESPAÑA, J.; NAVAS, A.; BALLESTEROS, P. y VALERO GARCÉS, B. (2015): Datación de sedimentos lacustres recientes del lago Enol mediante ^{239,240}Pu. In XIV Reunión Nacional de Cuaternario, Granada, Spain, June 30-July 2, 2015.

- CATALAN, J.; CAMARERO, L.; FELIP, M.; PLA, S.; VENTURA, M.; BUCHACA, T.; BARTUMEUS, F.; DE MENDOZA, G.; MIRÓ, A.; CASAMAYOR, E. O.; MEDINA-SÁNCHEZ, J. M.; BACARDIT, M.; ALTUNA, M.; BARTRONS, M. y DÍAZ DE QUIJANO, D. (2006): High mountain lakes: extreme habitats and witnesses of environmental changes. *Limnetica* 25(1-2): 551-584.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO. (2013): Diseño y explotación de la red de seguimiento de lagos en la cuenca del Ebro, 232 pp. Disponible en PDF en la web: <http://www.chebro.es>
- GARCÍA-CRIADO, F. y MARTÍNEZ, C. (2010): Estudio limnológico de los lagos Enol y La Ercina. Informe inédito, Universidad de León, 86 pp.
- GARCÍA-RUIZ, J. M.; PALACIOS, D.; ANDRÉS, N.; DE VALERO-GARCÉS, B. L.; LÓPEZ-MORENO, J. I. y SANJUÁN, Y. (2014): Holocene and «Little Ice Age» glacial activity in the Marboré Cirque, Monte Perdido Massif, Central Spanish Pyrenees. *The Holocene*
- HANNAH, L. (2010): *Climate Change Biology*. Academic Press Inc. 410 pp
- Ippc. (2007): *Climate Change 2007. - The Physical Science basis Working group I. Contribution to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- LÓPEZ-MERINO, L.; MORENO, A.; LEIRA, M.; SIGRÓ, J.; GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P.; VALERO-GARCÉS, B. L. y LÓPEZ-SÁEZ, J. A. (2011): Two hundred years of environmental change in Picos de Europa National Park inferred from sediments of Lago Enol, Northern Iberia, *Journal of Paleolimnology* 46 (3): 453-467.
- MORENO, A.; VALERO-GARCÉS, B. L.; JIMÉNEZ SÁNCHEZ, M.; DOMÍNGUEZ, M. J.; MATA, P.; NAVAS, A.; GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P.; STOLL, H.; FARIAS, P.; MORELLÓN, M.; CORELLA, P. y RICO, M. (2010): The last deglaciation in the Picos de Europa National Park (Cantabrian Mountains, Northern Spain). *Journal of Quaternary Science*. 25: 1076-1091.
- MORENO, A.; LÓPEZ-MERINO, L.; LEIRA, M.; MARCO-BARBA, J.; GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P.; VALERO-GARCÉS, B.; LÓPEZ-SÁEZ, J. A.; SANTOS, L.; MATA, P. y ITO, E. (2011): Revealing the last 13,500 years of environmental history from the multiproxy record of a mountain lake (Lago Enol, northern Iberian Peninsula). *Journal of Paleolimnology*, 46: 327-349.
- OLIVA-URCIA, B.; LARRASOANA, J. C.; PUEYO, E. L.; GIL, A.; MATA, P.; PARÉS, J. M.; SCHLEICHER, A. M. y PUEYO, O. (2009): Disentangling magnetic subfabrics and their link to deformation processes in cleaved sedimentary rocks from the Internal Sierras (west central Pyrenees, Spain). *Journal of Structural Geology* 31: 163-176.
- OLIVA-URCIA, B.; MORENO, A.; VALERO GARCÉS, B.; MATA M. P. y GRUPO HORDA (2013): Magnetismo y cambios ambientales en registros terrestres: el Lago de Marboré, Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (Huesca). *Cuadernos de Investigación Geográfica*. 39-1, 117-140.
- ORTIZ, J. E.; SÁNCHEZ-PALENCIA, Y.; TORRES, T.; DOMINGO, L.; MATA, P.; VEGAS, J.; SÁNCHEZ-ESPAÑA, J.; MORELLÓN, M. y BLANCO, L. (2016): Lipid biomarkers in Lake Enol (Asturias, Northern Spain): Coupled natural and human induced environmental history. *Organic Geochemistry* 92: 70-83.
- PONS, J. A. y NIEMBRO, A. (1986): Estudio limnológico preliminar de los lagos Enol y Ercina. Parque Nacional de la Montaña de Covadonga (Asturias-León). Informe-Resumen. Oviedo.
- RODRÍGUEZ-GARCÍA, J.; VEGAS, J.; LÓPEZ-VICENTE, M.; MATA, P.; MORELLÓN, M.; NAVAS, A.; SALAZAR, A. y SÁNCHEZ-ESPAÑA, J. (2016): Lake Enol (Asturias, NW Spain): Origin, evolution and geomorphological dynamics. In Salazar, A. (Ed.): *Proceedings of the XIV National Symposium of Geomorphology*, June 22-25 2016, Málaga, Spain.
- SCHNURRENBERGER, D.; RUSSELL, J. y KELTS, K. (2003): Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components. *Journal of Paleolimnology* 29: 141-154.
- VALERO GARCÉS, B.; OLIVA URCIA, B.; MORENO, A.; RICO, M.; MATA, P.; SALAZAR, A.; RIERADEVAL, M.; GARCÍA-RUIZ, J. M.; CHUECA, J.; GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P.; PÉREZ, A.; SALABARNADA, A.; PARDO, A.; ARRUEBO MUÑO, T.; SANCHO, C.; BARREIRO, F.; BARTOLOMÉ, M.; GARCÍA-PRieto, E.; GIL-ROMERA, G.; LÓPEZ-MERINO, L.; SEVILLA-CALLEJO, M. y TARRATS, P. (2013): Dinámica glacial, clima y vegetación en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido durante el Holoceno. *Memorias de Proyectos de investigación en parques nacionales: 2009-2012*. Ed. Lucía Ramírez. OAPN.
- VALERO-GARCÉS, B.; MORENO, A.; GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P.; MORELLÓN, M.; RICO, M.; CORELLA, P.; JIMÉNEZ-SÁNCHEZ, M.; DOMÍNGUEZ-CUESTA, M. J.; FARIAS, P.; STOLL, H.; LÓPEZ-MERINO, L.; LÓPEZ-SÁEZ, J. A.; LEIRA, M.; SANTOS, L.; MATA, P.; RIERADEV

- VALL, M.; RUBIO, E.; NAVAS, A.; DELGADO, A.; MARCO-BARBA, J. y SIGRÓ, J. (2010): Evolución climática y ambiental del parque nacional de Picos de Europa desde el último máximo glaciar. Ramírez, L. & Asensio, B. (eds.) *Proyectos de investigación en parques nacionales: 2006-2009*: 55-71. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- VEGAS, J.; MATA, P.; SANCHEZ-ESPAÑA, J.; MORELLON, M.; SALAZAR, A.; RODRIGUEZ, J. A.; VALERO-GARCÉS, B. y CARCAVILLA, L. (2015): Evolución del estado de conservación de lugares de interés geológico sometidos a modificaciones antrópicas. A. Hilario, M. Mendiá, M. Monge-Ganuzas, E. Fernández, J. Vegas y A. Belmonte (eds.). *Patrimonio geológico y geoparques, avances de un camino para todos. Cuadernos del Museo Geominero, 18*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 2015. Pp. 221-226.