



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Respuesta sedimentaria en un lago de alta
montaña ante el impacto climático y antrópico:

El Lago Urdiceto (Huesca)

Sedimentary response in a mountain lake because
the climate and anthropic impact:

The lake Urdiceto (Hueca)

Autor/es

Alejandra Vicente de Vera García

Director/es

Dr. Miguel Ángel Saz Sánchez

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

2017

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**RESPUESTA SEDIMENTARIA EN UN
LAGO DE ALTA MONTAÑA ANTE EL
IMPACTO CLIMÁTICO Y ANTRÓPICO:
EL LAGO URDICETO (HUESCA)**

Autor: Alejandra Vicente de Vera García

Director: Dr. Miguel Ángel Saz Sánchez

Máster Universitario en

**Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del
territorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

Noviembre de 2017



1542

**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Agradecimientos

Este trabajo de Fin de Máster ha sido subvencionado con la ayuda del Vicerrectorado de Política Científica para actividades de investigación de estudiantes de la Universidad de Zaragoza matriculados en el marco formativo de los créditos correspondientes a trabajos fin de Máster.

Además, se ha realizado en el grupo de investigación Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales (IUCA) en el marco del Proyecto CLIMED (CGL2015-69985R), financiado por MINECO y del que es investigador principal José M. Cuadrat Prats. El material utilizado se obtuvo dentro del Proyecto IBOCLIM (2012 GA LC 073): Impacto del cambio climático en los Ibones pirenaicos del Alto Cinca durante los últimos 2000 años. Proyecto del Instituto Pirenaico de Ecología (IPE- CSIC), cuyo investigador principal es Blas Lorenzo Valero Garcés y financiado por la convocatoria DGA-Caixa en 2012

Quisiera dar las gracias en primer lugar a mi tutor, Miguel, por toda su paciencia y ayuda en la realización de este trabajo. A Blas, por darme la oportunidad de acceder a este proyecto y por todo su tiempo. También a Ernesto Tejedor Vargas por su ayuda con los datos climáticos, a María Paz Errea Abad por su apoyo con las imágenes y datos SIG, y a José Ángel Losada por toda la información prestada.

Y por último, a mi familia y amigos, por todo su amor y apoyo incondicional.

Resumen

En este trabajo se ha estudiado el registro sedimentario de un lago de alta montaña como archivo paleoambiental. Mediante un conjunto de análisis multidisciplinares se ha realizado la reconstrucción del impacto que tienen sobre el lago factores como el clima y las actividades antrópicas, observando cómo afectan al sistema lacustre y a su evolución en los últimos mil años. La zona de estudio es el Lago de Urdiceto, un ibón situado en la cabecera del Cinca (Pirineo Central, Comarca del Sobrarbe).

Mediante distintos métodos y análisis (descripción de facies y unidades sedimentarias, escáner de fluorescencia de rayos X, Carbono Orgánico Total, Carbono Inorgánico Total y Contenido de Azufre) y con un modelo de edad basado en dataciones radiométricas absolutas (^{210}Pb), se ha reconstruido la dinámica sedimentaria del lago durante el último milenio. Los sedimentos son alternancias de limos finos y gruesos que reflejan los cambios en la escorrentía y transporte de sedimentos desde la cuenca y que responde a la variabilidad climática natural. Sin embargo, a partir de 1930 cuando el lago se represó para su explotación y aprovechamiento hidroeléctrico la dinámica sedimentaria está fuertemente condicionada por el régimen de explotación de la presa. Los niveles de lago más elevados desde el cierre de la presa en 1940 han favorecido sedimentación de limos más finos. La presencia de Pb en los sedimentos marca un periodo intenso de contaminación por metales pesados a finales del siglo XIX y durante la primera mitad del siglo XX asociados a mayor intensidad de la minería y la metalurgia a escala local y regional y un descenso a finales del siglo debido probablemente a la prohibición de las gasolinas con Pb.

Este estudio demuestra la sensibilidad de la dinámica sedimentaria de los ibones pirenaicos a cambios climáticos a escala decadal o centenaria durante el último milenio y el predominio del control antrópico tras la construcción de la presa.

Abstract

In this work you has been studied the sedimentary record of a high mountain lake as a paleoenvironmental archive. Through a set of multidisciplinary analyzes, the impact of factors such as climate and anthropogenic activities on the lake have been reconstructed, observing how they affect the lake system and its evolution over the last thousand years. The study area is the Urdiceto Lake, a lake located at the head of the Cinca (Central Pyrenees, Sobrarbe Region).

By means of different methods and analysis (description of facies and sedimentary units, X-ray fluorescence scanner, Total Organic Carbon, Total Inorganic Carbon and Sulfur Content) and with an age model based on absolute radiometric dating (^{210}Pb) has been reconstructed the sedimentary dynamics of the lake during the last millennium. The sediments are alternations of fine and coarse silts that reflect the changes in the runoff and sediment transport from the basin and that respond to the natural climatic variability. However, from 1930 when the lake was dammed for its exploitation and hydroelectric exploitation of sedimentary dynamics is strongly conditioned by the regime of exploitation of the dam. The highest lake levels since the closure of the dam in 1940 have favored sedimentation of finer silts. The presence of Pb in the sediments marks an intense period of pollution by heavy metals at the end of the 19th century and during the first half of the 20th century associated with a greater intensity of mining and metallurgy at local and regional scale and a decrease at the end of the century probably due to the prohibition of gasolines with Pb.

This study demonstrates the sensitivity of the sedimentary dynamics of Pyrenean lakes to climatic changes on a decadal or centennial scale during the last millennium and the predominance of anthropic control after the construction of the dam.

Índice

1.	Introducción y antecedentes	pág. 1
2.	Objetivos	pág. 3
3.	Área de estudio	pág. 4
	3.1. Localización	pág. 4
	3.2. Geología regional y de la cuenca de drenaje	pág. 4
	3.3. Clima regional	pág. 7
	3.4. Batimetría y características del lago	pág. 7
	3.5. Actividades antrópicas	pág. 9
4.	Datos y métodos	pág. 10
	4.1. Trabajo de campo	pág. 10
	4.2. Trabajo de laboratorio	pág. 12
	4.2.1. Apertura de sondeos y descripción de facies	pág. 12
	4.2.2. Análisis del color.....	pág. 13
	4.2.3. Datación.....	pág. 13
	4.3. Información climática	pág. 15
	4.4. Estudio de usos del suelo	pág. 18
5.	Resultados y discusión	pág. 20
	5.1. Modelo cronológico	pág. 20
	5.2. Caracterización del registro sedimentario.....	pág. 21
	5.2.1. Facies sedimentarias	pág. 21
	5.2.2. Estratigrafía	pág. 21
	5.2.3. Contenido en Carbono Orgánico, Carbono Inorgánico y azufre	pág. 23
	5.2.4. Geoquímica.....	pág. 25
	5.3. Relación con el clima.....	pág. 28
	5.4. Cambios en los usos del suelo	pág. 31
	5.5. Contaminación por metales pesados	pág. 33
6.	Conclusiones	pág. 34
7.	Bibliografía	pág. 36

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Los lagos son sistemas dinámicos muy sensibles a la hidrología local, la geología y la biología de la cuenca de drenaje y el clima regional (Renaut y Gierlowski, 2010). Por este motivo, sus sedimentos pueden ser potencialmente archivos paleoambientales (Cohen, 2003; Smol, 2008) para la reconstrucción de la evolución del clima a distintas escalas temporales (de décadas a centenares de miles de años) (por ejemplo, Aranbarri et al., 2014) o el estudio de impactos ambientales provocados por actividades humanas recientes (Valero-Garcés et al., 2009).

En concreto y debido a su localización, los lagos de alta montaña están en climas fríos y sus principales aportes de agua provienen de la atmósfera, ya sea directamente en forma precipitación o indirectamente a través del deshielo de la nieve acumulada en su cuenca vertiente. Esto les confiere características limnológicas particulares ya que, en general, son lagos de aguas frías, saturadas de oxígeno, poco mineralizadas, de moderada alcalinidad y con un bajo contenido de nutrientes (oligotróficos). En relación con esas características, estos lagos son ecosistemas sensibles a cualquier perturbación, ya sea natural o antrópica. Además, el estudio de estas perturbaciones es más directo en este tipo de lagos, ya que no están afectados por respuestas complejas del suelo y la vegetación (Cuna et al., 2015).

Conocer realmente el funcionamiento de un lago requiere de un profundo estudio de los factores que han determinado su evolución a través de enfoques más amplios que los estrictamente ecológicos (Montes et al., 1995) y a escalas temporales mayores que las de la simple observación de unas pocas décadas (Battarbee, 1999; Valero Garcés et al., 2009). Por este motivo, es necesario reconstruir la historia ambiental reciente de los lagos para poder conocer el estado natural de los mismos, y a que factores se muestra más sensible antes de sufrir el impacto de las actividades humanas. En este sentido, el impacto antrópico ambiental se define como la alteración o cambio que provoca una determinada acción, actividad o proyecto del ser humano, sobre el medio ambiente (Sanz, 1991). El impacto ambiental tiene, por lo tanto, una clara connotación antrópica ya que son las actividades, proyectos y planes desarrollados por el hombre los que inducen dichas alteraciones, que pueden ser positivas o negativas según impliquen una mejora o un empeoramiento de la calidad ambiental.

Son varios los estudios realizados en la Península Ibérica para conocer el impacto ambiental de las actividades humanas sobre diferentes lagos situados en ambientes climáticos diferentes:

Como por ejemplo en El Tobar (Cuenca), donde se aprecian cambios muy marcados en el registro sedimentológico del lago y es debido en diferentes momentos, a la deforestación para pastoreo, agricultura y períodos con población más alta de la región (Barreiro-Lostres et al., 2015). En Currás et al., 2012, el estudio sobre los sedimentos de la laguna de Somolinos (Guadalajara), concluye que además de la afección que provoca la variabilidad climática, los cambios en el uso de la tierra y la actividad humana, han modificado la dinámica natural del lago desde la edad del hierro, mediante la agricultura, el pastoreo, la minería y la silvicultura. Otro ejemplo es el Lago de Caicedo de Yuso – Arreo (Álava, Corella et al., 2012) donde las actividades humanas también han jugado un papel importante en la transformación del medio ambiente y del paisaje mediante la explotación de recursos naturales (madera, tierra para cultivos y pastos), todo ello combinado con períodos de intensa presión humana. Muchos más ejemplos en lagos de toda la península, como en el ibón de La Basa de la Mora (Pérez-Sanz et al.,

2013) o los lagos kársticos de Zoñar, Estanya y Taravilla (Valero-Garcés et al., 2009) muestran el impacto humano reciente en estos ecosistemas.

La importancia de los lagos como reservorios hídricos los ha hecho objeto de aprovechamientos para el consumo humano y agrícola y, consecuentemente, las afecciones en las cuencas de drenaje han sido significativas desde tiempos históricos. En el Pirineo, en particular, muchos ríos fueron represados en cabecera y numerosos ibones fueron transformados en presas durante el siglo pasado.

En concreto, en este trabajo se van a estudiar estos cambios en el lago de Urdiceto, un ibón natural que se sitúa en los Pirineos centrales. Mediante el registro sedimentario de este lago de alta montaña, se va a tratar de conocer a través de diferentes análisis y métodos, si existe una relación entre el registro sedimentario y los cambios climáticos y ambientales que hayan podido afectar a su cuenca de drenaje. Se van a diferenciar fundamentalmente dos tipos de cambios: En primer lugar aquellos que tienen que ver con las variaciones del clima (por ejemplo, alternancias entre periodos fríos y cálidos) y en segundo lugar, aquellos que derivan de la actividad antrópica (en concreto uno de los impactos antrópicos más comunes en zonas montañosas del norte de la Península Ibérica, la regulación hidrológica para la producción de energía hidroeléctrica). Este trabajo se centra en el estudio sedimentológico y geoquímico de un sondeo recuperado en la zona central del lago, que proporciona un registro sedimentario continuo que se extiende desde la actualidad hasta final del siglo XII. Esto es muy importante para el enfoque de la investigación, puesto que en este registro aparece representado el periodo de tiempo donde la sedimentación corresponde con la dinámica natural del lago, seguido de un segundo periodo en el que el impacto antrópico es evidente.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es reconstruir, a través de análisis sedimentológicos y geoquímicos, la dinámica sedimentaria del lago de Urdiceto y las relaciones existentes entre ese registro sedimentario y los cambios ambientales acaecidos en su cuenca vertiente a lo largo del último milenio, bien relacionados con variaciones en el clima o con la acción antrópica.

Este objetivo general se concreta en los siguientes objetivos específicos:

1. Realizar un estudio sedimentológico y geoquímico detallado de un sondeo recuperado en el lago de Urdiceto, mediante la definición de facies sedimentarias y el desarrollo de una estratigrafía geoquímica de alta resolución.
2. Reconstruir la evolución del lago a lo largo de los últimos siglos mediante el análisis sedimentológico y geoquímico del testigo de sondeo.
3. Resumir los cambios climáticos que han afectado al ibón durante el último milenio y los antrópicos que se han producido en el lago o en su cuenca de drenaje
4. Evaluar como los cambios climáticos y antrópicos han afectado a los cambios deposicionales e investigar la evolución climática de los últimos siglos con el registro sedimentario del lago.

3. AREA DE ESTUDIO

3.1. Localización

El lago de Urdiceto ($42^{\circ}39'N$, $0^{\circ}16'E$) es uno de los ibones naturales del Alto Cinca. Se encuentra en el Pirineo central (Fig. 1), en la cabecera del citado río, a una altura de 2.369 metros sobre el nivel del mar, en la comarca del Sobrarbre (Huesca), en el término municipal de Bielsa.

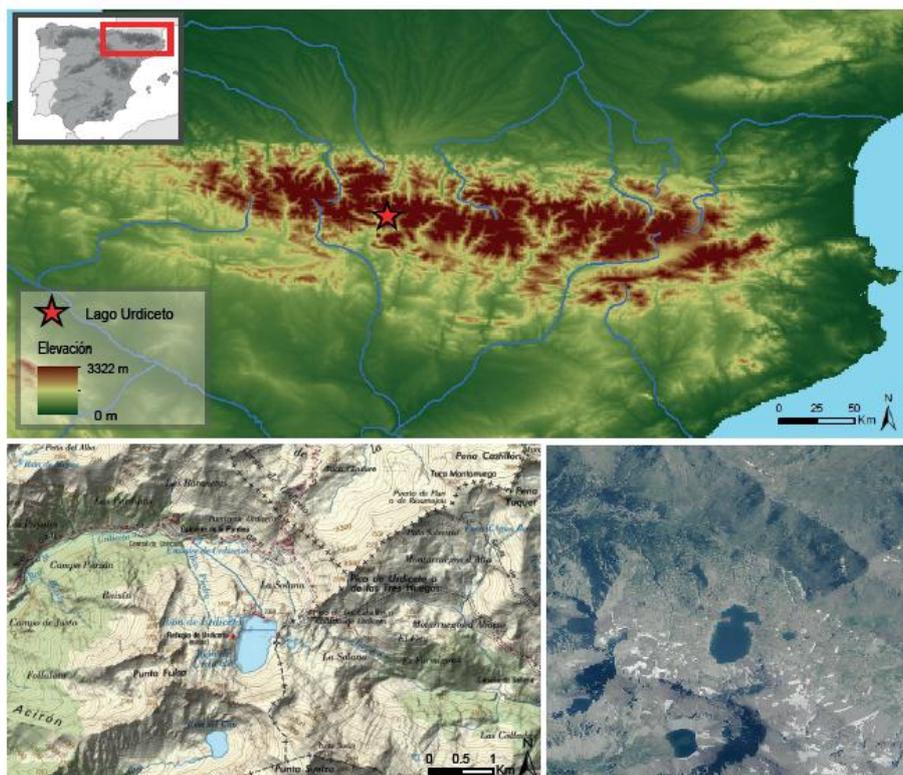


Figura 1. Mapas de localización del Lago de Urdiceto y fotografía aérea del mismo (Fuente: IGN, Iberpix)

3.2 Geología regional y de la cuenca de drenaje

Los Pirineos corresponden a la porción de la Cordillera Pirenaica que se extiende entre el Golfo de Lion, en el Mediterráneo, y el Golfo de Vizcaya, en el océano Atlántico. Mattauer (1968) describió una zonación geológica que definía esta cadena en tres partes diferenciadas, de norte a sur: zona norpirenaica, zona axial y zona surpireica.

La zona axial es el extenso afloramiento de basamento Varisco situado inmediatamente al sur de la zona de la falla Norpirenaica, en la que se encuentran algunas de las cumbres más elevadas de la cordillera. Constituye una elevación de basamento con vergencia sur como muestran los cabalgamientos alpinos que involucran al basamento de la zona axial y parte de su cobertera mesozoica (Lakora, Gavarnie...) (Fig 2). En esta zona axial es donde se encuentra el Lago de Urdiceto.

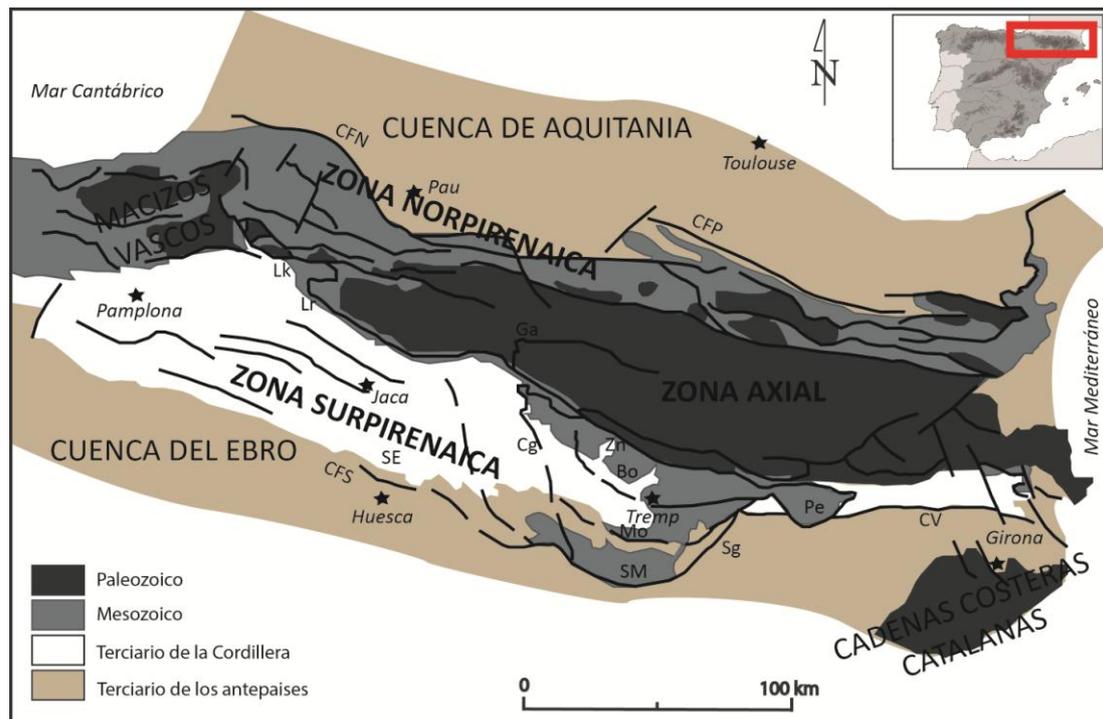


Figura 2. Esquema estructural de los pirineos (Modificado de Vera, 2004). Denominación de las principales estructuras: CFS: Cabalgamiento Frontal Surpirenaico, CFN: Cabalgamiento frontal Norpirenaico, CPP: Cabalgamiento de los Petites Pyrénées, Lk: Cabalgamiento de Lakora, Lr: Cabalgamiento de Larra, SE: Sierras Exteriores, Ga: Cabalgamiento de Gavarnie, ZN: Zona de Nogueres, Bo: cabalgamiento de Bóixols, Mo: Cabalgamiento de Montsec, SM: Sierras Marginales, Sg: Zona de rampas oblicuas del Segre, Cg: Zona de rampas oblicuas de Cinca (límite occidental de la Unidad Surpirenaica Central), Pe: manto de Pedraforca, CV: Cabalgamiento de Vallfogona.

En un contexto geológico más pequeño y cercano al lago, la sucesión estratigráfica está compuesta por materiales de diferentes edades: ordovícicos, silúricos, devónicos, pérmicos y triásicos, sobre los que se apoyan directamente materiales cuaternarios. Aparecen además algunas intrusiones graníticas.

Los materiales que aparecen en la zona de estudio pertenecientes al Ordovícico son cuarcitas, esquistos, cuarzoesquistos, calizas y pizarras. Del Silúrico únicamente aparece una formación de pizarras ampelíticas. Los materiales del Devónico aparecen en las proximidades del lago gracias a ventanas tectónicas o fallas, y están representando tanto al Devónico inferior (mediante una alternancia de calizas y pizarras propias del Gediense y calizas del Emsiense) como al superior (del que se encuentran una formación de pizarras). El único material Pérmico y Triásico es una formación de arenitas y limolitas rojas. Finalmente, el cuaternario, casi testimonial, se apoya en zonas puntuales sobre el sustrato geológico descrito en forma de derrubios de ladera. (Ríos et al., 1982) (Fig.3)

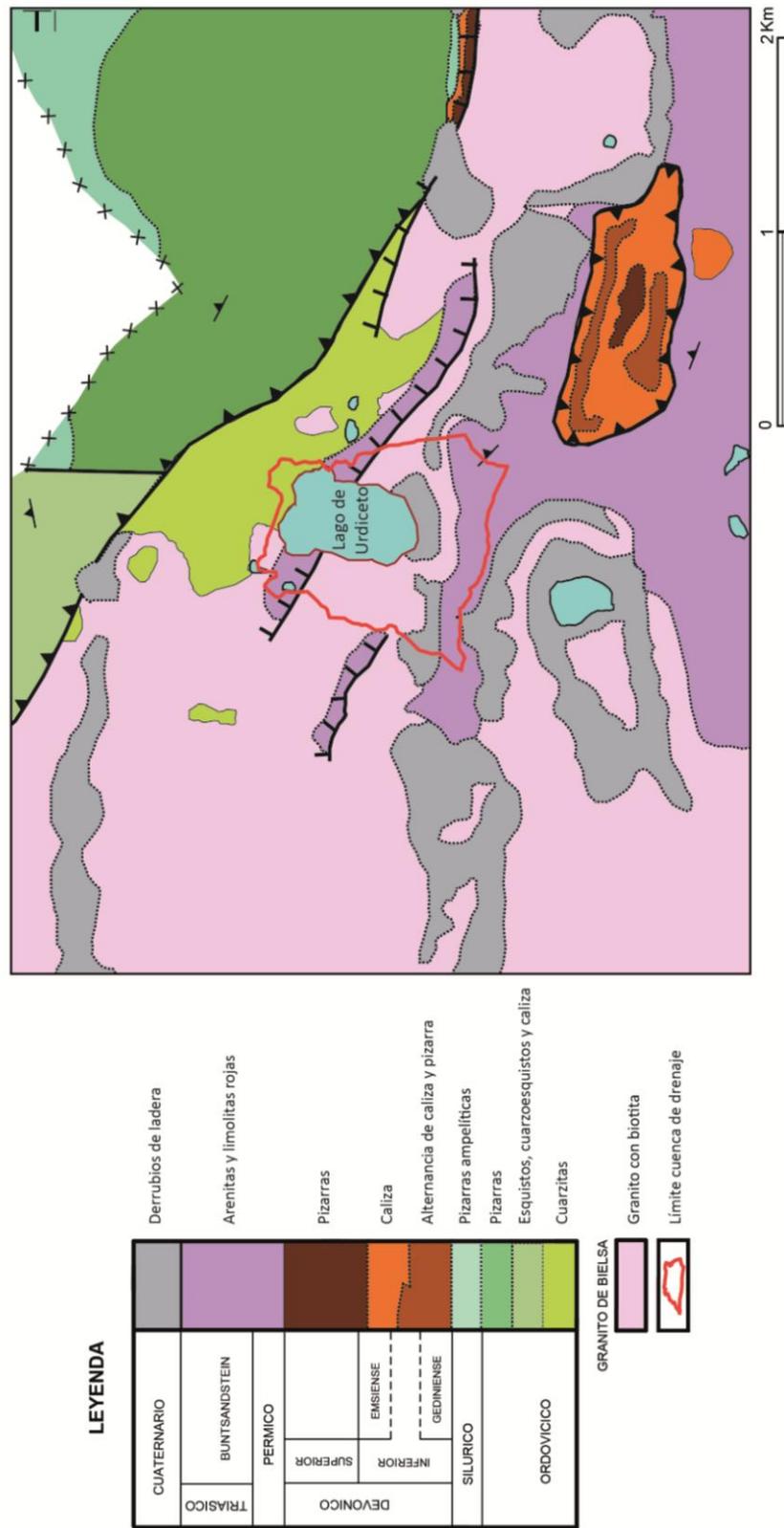


Figura 3. Mapa geológico de detalle de la zona de estudio (Modificado del Magna 147 y 179).

3.3 Clima regional

El clima del Pirineo se caracteriza por unos veranos suaves en relación a las comarcas que dentro de la Cuenca del Ebro se sitúan al sur de la cordillera, y unos inviernos más largos y fríos, que además incrementan estas características conforme la altitud del terreno aumenta. El factor condicionante fundamental de estas diferencias es la configuración del relieve y la diversidad de exposiciones, que dan lugar a un extenso abanico de matices climáticos locales.

Dentro de este mosaico de ambientes climáticos que podemos encontrar en los Pirineos, los que aparecen por encima de los 1.500 – 1.800 m (el límite altitudinal variará en función de la orientación), podríamos encuadrarlos dentro de los climas de montaña, caracterizados por presentar elevadas precipitaciones y bajas temperaturas, si bien con matices más mediterráneos, oceánicos y continentales en función de la localización en relación a estos mares.

El carácter de este clima de montaña viene definido principalmente por las temperaturas, las cuales tienen promedios anuales que pueden rondar los 0 °C en las cumbres más altas. Con veranos frescos e inviernos muy fríos, en función de la elevada altitud, y de forma mucho más marcada en las laderas con exposición norte.

Por otro lado, las precipitaciones son abundantes; en su cómputo anual superan generalmente los 1.500 mm. Se trata, en definitiva, de los espacios más fríos y húmedos de del nordeste de España, en los que el relieve se convierte en el factor esencial a la hora de explicar sus condiciones climatológicas. (Cuadrat et al., 2007).

3.4. Batimetría y características del lago

El lago de Urdiceto tiene una forma ovalada y está formado por dos cubetas de sobreexcavación glaciaria situadas en un hipotético eje norte-sur.

Este lago se encuentra represado para su aprovechamiento hidroeléctrico, y está cerrado por dos presas, la presa de Urdiceto (42° 40' 6'' N y 0° 16' 57'' E), que cierra la vertiente norte, y el dique de collado, también conocido como presa de “La Barceloneta”, que constituye el aliviadero de superficie y se sitúa a 42° 40' 1'' N y 0° 17' 0'' E, cerrando la vertiente este del embalse. (Fig. 4 y 5). La capacidad útil del embalse es de 6,4 Hm³ y la superficie inundada de 31,7 ha.

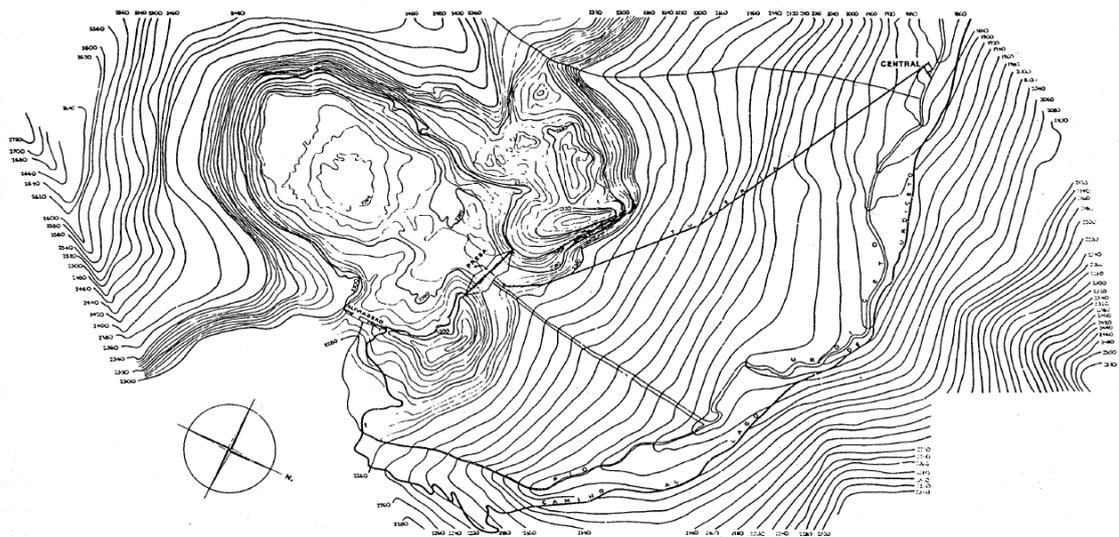


Figura 4. Mapa topográfico del lago y sus alrededores, donde se puede apreciar la situación de la presa, el aliviadero y la tubería hasta la central.

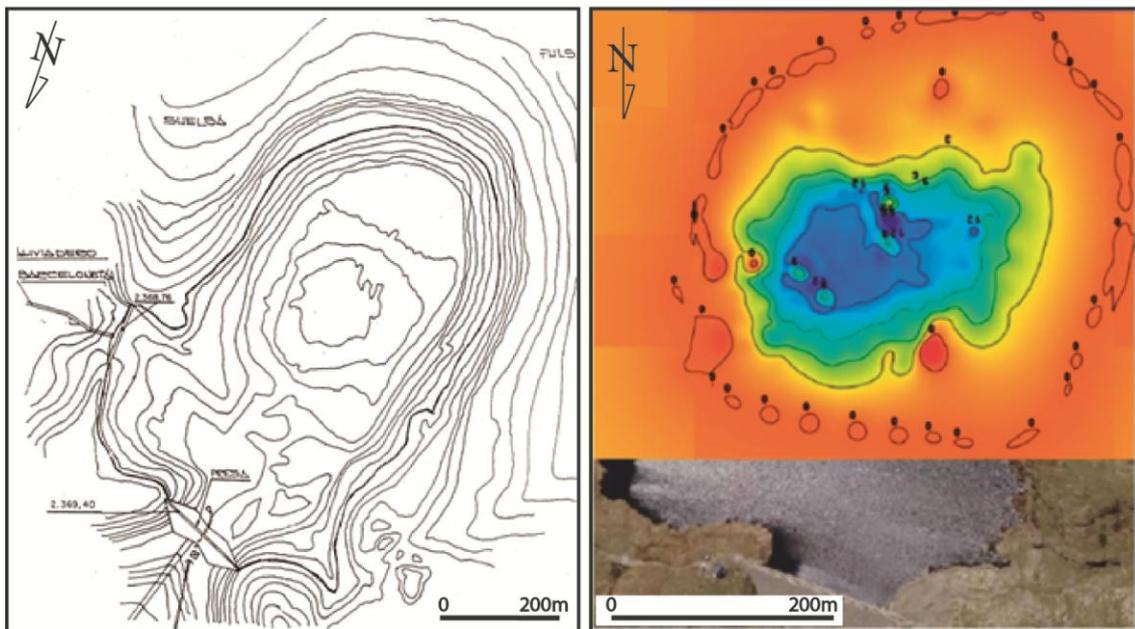


Figura 5. Planta topográfica del Lago de Urdiceto (izquierda) según los datos de la memoria para la construcción de la presa en 1935 y batimetría preliminar de la cubeta sur realizada mediante una ecosonda Garmin en 2012 por el equipo del Instituto Pirenaico de Ecología (derecha). Sólo se tienen datos de campo de la cubeta sur debido a que en el momento de la prospección la cubeta norte estaba seca.

Como se puede apreciar en las figuras 4 y 5, la cubeta sur es de mayor tamaño y profundidad que la cubeta norte. La cubeta sur alcanza una profundidad de 16 metros. De la norte no existe batimetría puesto que en el momento de su realización (Agosto, 2012) estaba seca.

3.5 Actividades antrópicas

El principal impacto antrópico viene derivado de que el lago fue represado para su aprovechamiento hidroeléctrico. La concesión administrativa para la construcción de la presa data de 1935, donde se concedió a la Sociedad Hidroeléctrica Ibérica, S.A el aprovechamiento de las aguas de Urdiceto y Trigoniero. En ese año comenzaron las obras y en 1938 ya prestaba servicio aún sin estar totalmente finalizadas, ya que fueron paralizadas hasta 1948, debido a su proximidad a la frontera francesa y a la prohibición de construir núcleos obreros en la zona. Para la construcción se utilizaron materiales de la zona circundante al lago, como los granitos porfídicos de la margen izquierda del mismo que se usaron como cantera de escollera y hormigones. Desde entonces y hasta la actualidad se han desarrollado varias tareas y obras de mejora y mantenimiento del embalse, como campañas de impermeabilización y recrecimientos de la presa (CHE, 1994)

Aunque hay indicios de posible actividad minera anterior, en las minas de Parzán se explotó mineral de Pb desde el siglo XVI hasta mediados del siglo XX. El mineral se transportaba a Francia y las labores metalúrgicas no se realizaban en la zona. Las actividades de extracción minera de hierro y plata llevadas a cabo en el Alto Cinca en las primeras décadas del siglo XX, aunque en mucha menor medida que la construcción de la presa, han podido suponer también una alteración antrópica a las condiciones ambientales del entorno del lago. Si bien el mineral no se extraía directamente en la zona, las propias actividades de explotación áreas cercanas y la construcción de infraestructuras auxiliares a la actividad minera, pudieron generar potencialmente impactos en el entorno.

4. DATOS Y MÉTODOS

4.1 Trabajo de campo

A finales de agosto de 2012 se llevó a cabo por parte del Departamento de Procesos Geoambientales del Instituto Pirenaico de Ecología CSIC una primera campaña de campo para la extracción de varios sondeos en diferentes puntos del lago de Urdiceto.

Los sondeos cortos fueron tomados con un sondeador de gravedad tipo Uwitec © con tubos de 60mm de diámetro. En la tabla 1 y fig.6 está representada la localización en el lago de cada sondeo. En total se han recuperado 11 testigos de sedimento que se listan en la tabla 1.

Tabla 1. Relación de sondeos cortos.

<i>PUNTO</i>	<i>COORDENADAS (WGS84)</i>	<i>SIGLA</i>	<i>LONGITUD (m)</i>
1	0.281087° 42.664956°	BIE-URD12-1A-1G	0,22
	0.281094° 42.664971°	BIE-URD12-1B-1G	0,645
	0.281088° 42.664922°	BIE-URD12-1C- 1G	0,48
	0.280704° 42.664976°	BIE-URD12-1D- 1G	0,45
2	0.280540° 42.664924°	BIE-URD12-2A-1G	0,55
	0.280253° 42.665162°	BIE-URD12-2B-1G	0,52
3	0.279644° 42.663941°	BIE-URD12-3A-1G	0,26
4	0.280176° 42.664044°	BIE-URD12-4A-1G	0,30
5	0.280196° 42.664583°	BIE-URD12-5A-1G	0,54
6	0.280691° 42.664928°	BIE-URD12-6A-1G	0,55
7	0.280667° 42.664841°	BIE-URD12-7A-1G	0,48

Uno de los sondeos se muestreó in situ en el campo en el momento de su extracción, a intervalos regulares de 1 cm para su posterior datación por técnicas radiométricas (^{210}Pb y ^{137}Cs).

Con objeto de recopilar información de la estructura del sedimento y optimizar el proceso de muestreo del sedimento se realizaron además una serie de perfiles sísmicos. Las líneas sísmicas (fig. 6) se llevaron a cabo con un perfilador de fondo 424 SB Edgetech; sin embargo, la escasa penetración en los sedimentos del lago no permitió apenas la identificación de reflectores (fig. 7) que informan de cambios litológicos en el relleno sedimentario.

Para finalizar, se realizó también una batimetría (fig. 8) dado que no se disponía de una cartografía batimétrica previa. Se procedió a la toma de datos batimétricos con un GPS 421s Garmin con sonda, para posteriormente proceder a su interpolación con el software SIG HYPACK 2011 (www.hypack.com). En la fig.6 se muestra la traza de las líneas batimétricas.

Tan sólo se dispone de datos en la cubeta S del ibón, ya que la cubeta N estaba seca en el momento del muestreo por reparaciones en la presa del salto hidroeléctrico.

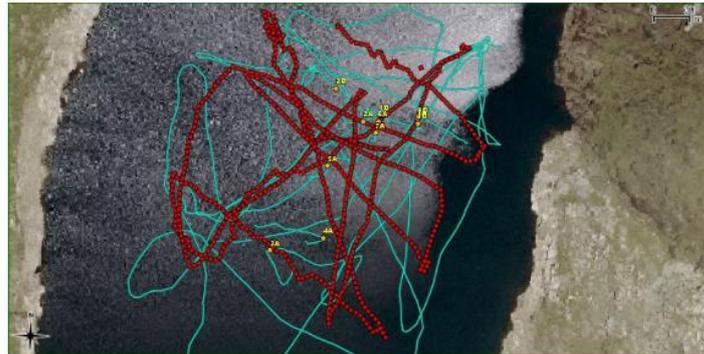


Figura 6. Ortofoto del Ibón de Urdiceto con los puntos de muestreo (en amarillo), la traza de las líneas sísmicas (en rojo) y la traza de la batimetría (en azul)..

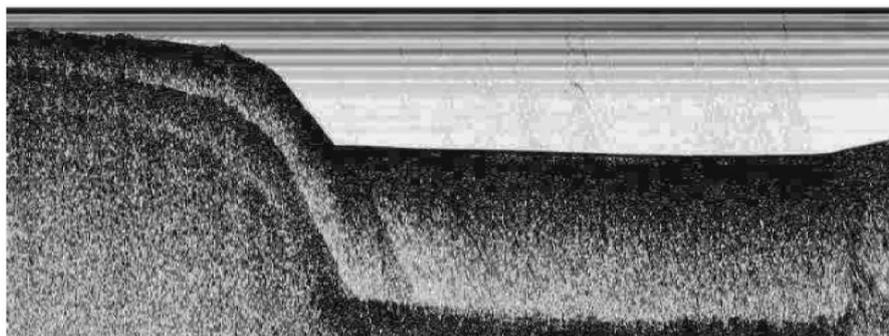


Figura 7. Perfil sísmico realizado entre las coordenadas 0.279622, 42.665341 y 0.280859, 42.663318.

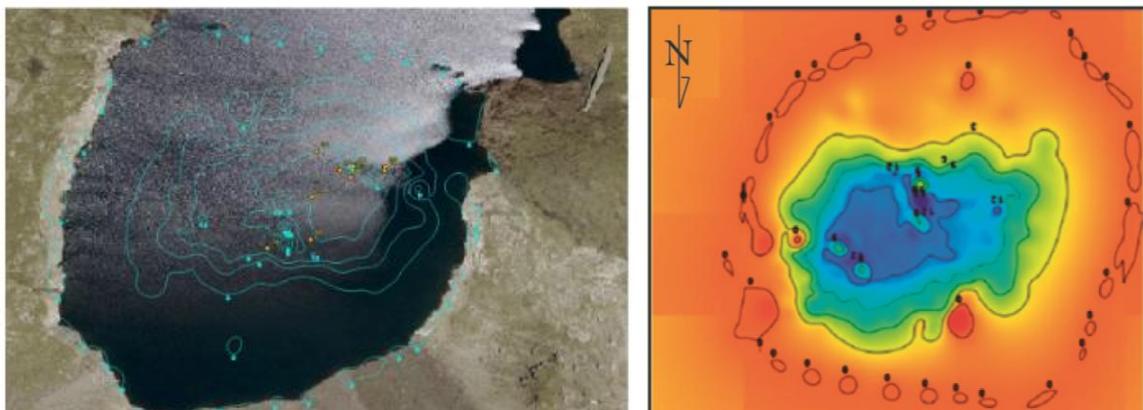


Figura 8. Batimetría resultante.

4.2 Trabajo de laboratorio

4.2.1 Apertura de los sondeos y descripción de facies

Los 11 sondeos obtenidos en el ibón de Urdiceto en 2012 fueron abiertos y fotografiados en el laboratorio del Departamento de Geociencias Marinas de la Universidad de Barcelona.

Cada una de las secciones fue cortada longitudinalmente con una sierra separándola en dos mitades iguales, una de las cuales se guardó como archivo mientras la otra mitad (mitad de trabajo) se destinó a los diferentes estudios y análisis. La mitad de archivo de cada sección fue adecuadamente envuelta en film transparente y posteriormente introducida en una funda termosellada para su óptima conservación en las cámaras frías que el IPE-CSIC posee en su sede de Zaragoza.

El estudio geoquímico de los sedimentos a alta resolución se llevó a cabo con el escáner de fluorescencia de Rayos X (FRX) del Departamento de Geociencias Marinas de la Universidad de Barcelona, a una resolución de 5 mm y bajo dos condiciones de trabajo diferentes, en primer lugar a una intensidad de 10kV, con el objeto de analizar los elementos Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Rh y Ag; y la segunda, con una intensidad de 30kV, para hacer el conteo de Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Au, Pb, Th y U. Además mediante una cámara digital integrada del equipo Avaatech XRF Core Scanner se realizaron fotografías de cada mitad de trabajo.

Se realizó un muestreo en un sondeo seleccionado para realizar un análisis de Carbono Total (TC), Carbono Orgánico Total (TOC), Carbono Inorgánico Total (TIC) y contenido de azufre (TS). Los análisis se realizaron en un analizador composicional LECO en el IPE.

Posteriormente las facies sedimentarias del registro sedimentario se definieron a partir de las observaciones de “visu”, en función del color, laminación, tamaño de grano o cantidad de materia orgánica visible; y mediante la observación de frotis de sedimento con un microscopio petrográfico.

La metodología empleada para la preparación de estos frotis es la descrita por Schnurrenberger et al. (2003):

1. Extracción de una cantidad pequeña del sedimento.
2. Emulsión del sedimento en agua destilada sobre un portaobjetos.
3. Calentamiento de la preparación en placa calefactora para la evaporación del agua.
4. Aplicación de un adhesivo fotopolímero y colocación de un cubreobjetos sobre la muestra.
5. El preparado se coloca bajo una lámpara de rayos ultravioleta (UV) para que el adhesivo fotosensible se active. Una vez consolidados los frotis están terminados y preparados para ser observados al microscopio.

4.2.2 Análisis de color

Los parámetros de color del sondeo se extrajeron a partir de fotografías digitales de alta resolución, puesto que los cambios cromáticos muy marcados en el sedimento corresponden con diferentes composiciones y características sedimentológicas y químicas muy definidas.

También se obtuvieron los parámetros del Espacio de Color CIE L*A*B en vez del RGB clásico, debido a que los cambios de color de facies de hacían más evidentes si se representaban las coordenadas cromáticas rojo/verde (a^*) en lugar del parámetro rojo (R) únicamente, o la luminosidad (L^*). En este caso se ha realizado el análisis de color adaptando la metodología propuesta por Wei et al., 2014.

4.2.3 Datación

Uno de los sondeos cortos del lago de Urdiceto, en concreto el BIE-URD12-1C-1G (1C), fue muestreado en campo a 1 cm de resolución y posteriormente datado mediante análisis del ^{210}Pb en *St. Croix Watershed Research Station* perteneciente al *Science Museum of Minnesota*.

La técnica del ^{210}Pb es la más utilizada para establecer un marco geocronológico en los sedimentos recientes lacustres (aproximadamente 100 años), y se basan en el uso del radioisótopo natural ^{210}Pb y el radioisótopo artificial ^{137}Cs (Goldberg y Koide, 1962; Krishnaswamy y Lal, 1978; Appleby y Oldfield, 1983; Oldfield y Appleby, 1985; Appleby, 2001; Carroll y Lerche, 2003).

La datación con ^{210}Pb se fundamenta en la serie de desintegración del ^{238}U que se desintegra hasta generar el gas ^{222}Rn (Fig. 9). Parte del ^{222}Rn generado en la litósfera se difunde a la atmósfera y posteriormente se desintegra a través de varios productos hasta dar origen al ^{210}Pb , y éste regresa a la litosfera por lo general durante eventos de precipitación. El método de datación de sedimentos con ^{210}Pb se basa en la determinación de la actividad del ^{210}Pb atmosférico (^{210}Pb en exceso) presente en los sedimentos marinos y lacustres, que debe ser distinguido del ^{210}Pb formado por la desintegración del ^{222}Rn que no logró escapar hacia la atmósfera (^{210}Pb soportado) y que se encuentra en equilibrio con su predecesor el ^{226}Ra . La actividad del $^{210}\text{Pb}_{\text{soportado}}$ en el sedimento está controlada principalmente por la mineralogía del sustrato y se considera constante a lo largo de la columna de sedimento. La posterior incorporación del ^{210}Pb atmosférico al sedimento provoca un ‘exceso’ de este isótopo en relación a los valores constantes del $^{210}\text{Pb}_{\text{soportado}}$. A este exceso se le denomina $^{210}\text{Pb}_{\text{exceso}}$ y se distingue del $^{210}\text{Pb}_{\text{soportado}}$ al restar la concentración del ^{226}Ra (en equilibrio con el $^{210}\text{Pb}_{\text{soportado}}$) del ^{210}Pb total:

$$^{210}\text{Pb} = ^{210}\text{Pb}_{\text{total}} - ^{226}\text{Ra} \text{ (Bernal et al., 2010)}$$

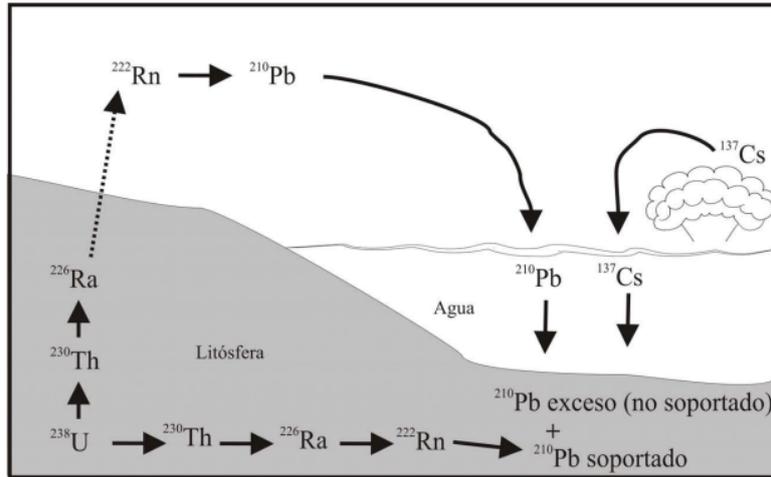


Figura 9. Esquema simplificado del decaimiento radiactivo del ^{238}U , que muestra la acumulación en sedimentos subacuáticos de $^{210}\text{Pb}_{\text{exceso}}$ y $^{210}\text{Pb}_{\text{soportado}}$, así como las explosiones y accidentes nucleares fuentes de ^{137}Cs (Bernal et al., 2010).

A diferencia del $^{210}\text{Pb}_{\text{soportado}}$, la actividad del $^{210}\text{Pb}_{\text{exceso}}$ presenta valores exponencialmente decrecientes con respecto a la profundidad, de acuerdo con su constante de decaimiento radiactivo (Oldfield y Appleby, 1985). Para la correcta aplicación del método de datación debe considerarse que la actividad de $^{210}\text{Pb}_{\text{exceso}}$ es en función de la tasa de flujo del mismo y de la tasa de sedimentación. Por lo menos uno de estos factores debe ser conocido o asumido para transformar los datos de $^{210}\text{Pb}_{\text{exceso}}$ en edades. Con estos datos, existen diferentes métodos para calcular la edad del sedimento, pero en este trabajo el modelo utilizado es el denominado CRS (tasa de suministro constante).

El modelo CRS (Goldberg y Koide, 1962; Appleby y Oldfield, 1978) supone que la edad del sedimento puede ser calculada aplicando la siguiente ecuación:

$$t = \frac{1}{\lambda} \times \frac{A(0)}{A}$$

Donde: $A(0)$ = inventario de la actividad $^{210}\text{Pb}_{\text{exceso}}$ en superficie. A = inventario de $^{210}\text{Pb}_{\text{exceso}}$ en todos los sedimentos debajo de la muestra a datar. λ = constante de decaimiento de $^{210}\text{Pb}_{\text{exceso}} = 0.03114 \text{ a}^{-1}$. t = edad del sedimento.

4.3 Información climática

Son escasos los registros climáticos que informen sobre la temperatura y la precipitación en el entorno del lago de Urdiceto.

Desde el punto de vista del clima reciente y al no existir estaciones meteorológicas en la zona ni series de calidad y duración suficiente en observatorios cercanos, se ha de acudir a repositorios de datos desarrollados por diferentes grupos de investigación, que a partir de la información climática disponible a escala regional hayan generado series termoplumiométricas mensuales o diarias centradas en un observatorio concreto o en un grid de mayor o menor resolución.

Entre ellas, las más conocidas son las del *Climate Research Unit* de la Universidad de East Anglia (disponible en <http://www.cru.uea.ac.uk/data>) con datos para el periodo 1900-2015, la base de datos del *European Climate Assessment and Dataset* (ECAD) (www.ecad.eu), donde se reconstruyen a escala diaria 199 observatorios españoles para el periodo 1896-2016, el Spain 02 (Herrera et al, 2012), con datos para el 1950-2003 y MOPREDAS (González-Hidalgo et al, 2011) que reconstruye los datos de precipitación de 2670 observatorios para el periodo 1946-2005.

Sin entrar en aspectos metodológicos sobre su construcción, la utilidad de estas bases de datos es insuficiente puesto que o bien se trata de datos en formato grid de una resolución de más de 50 km, como es el caso del CRU, o dan solo datos de observatorios instrumentales alejados de la zona de estudio y en unas condiciones climáticas distintas (SPAIN02) o bien informan solo sobre la precipitación, como el caso de MOPREDAS.

Es por ello que se han utilizado la información termoplumiométrica de la base de datos SPREAD (Serrano Notivoli et al, 2017) disponible de manera libre y gratuita en <http://digital.csic.es/handle/10261/141218> en la que se utilizaron un total de 12.858 observatorios de precipitación procedentes de la red de la Agencia Estatal de Meteorología y de las redes de observación de los servicios meteorológicos regionales, el Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) del Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente y los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH) de las Confederaciones, entre otros, para a través de un riguroso control de calidad generar una base de datos diaria en un grid de alta resolución (5 km) para el periodo 1901-2012

Seleccionado el punto de grid más cercano al lago de Urdiceto, los datos diarios fueron agregados en forma de datos mensuales y estacionales con objeto de analizar su posible relación con el registro sedimentológico más reciente.

Para obtener información del clima de las pasadas centurias se han utilizado dos reconstrucciones ya publicadas de la temperatura y la precipitación de distintas zonas de Pirineos realizadas mediante técnicas dendrocronológicas por investigadores de la Universidad de Cambridge, Instituto Pirenaico de Ecología y Universidad de Zaragoza.

En el caso de la temperatura se ha utilizado la serie reconstruida por Buntgen et al (2008) donde se reconstruye este variable para el periodo estival desde el año 1260. Para la precipitación se han utilizado las series dendroclimáticas reconstruidas por Saz (2003) en Capdella, utilizadas como referencia para otros trabajos sobre glaciario

pirenaico (Chueca et al, 2005) y evolución de la PEH en el Pirineo (Morellón et al, 2011).

Esta información hacia el pasado hemos de señalar que está obtenida a través de un proxy que si bien ofrece una resolución anual e incluso estacional del dato reconstruida está, como toda fuente proxy, sometida a un grado de incertidumbre difícil de evaluar relacionado con dos aspectos: i) la varianza explicada por el proxy en relación a la variable reconstruida y ii) la relación entre el dato reconstruido mediante técnicas dendroclimáticas, que por lo general ofrece una visión regional de la evolución del clima, y la realidad del clima del área de estudio y los factores locales que pueden condicionarlo.

Para evaluar estos aspectos en las figuras 10, 11 y 12 se presentan las series reconstruidas mediante técnicas dendroclimáticas y la reconstruida a partir de observatorios instrumentales. La relación entre ambas series no es perfecta en ninguno de los casos. Los valores de correlación son de 0,49 para la temperatura, 0,55 para la precipitación de verano y 0,14 para la de invierno una vez suavizadas las series mediante media móvil de 11 años.

Si bien la relación no es perfecta sí entendemos que es suficiente como para evaluar la evolución del clima en la baja y media frecuencia con el depósito sedimentario. Para la comparación con la columna sedimentaria los datos instrumentales y los reconstruidos fueron estandarizados. Asimismo, se han utilizado como referencia los episodios climáticos conocidos del último milenio.

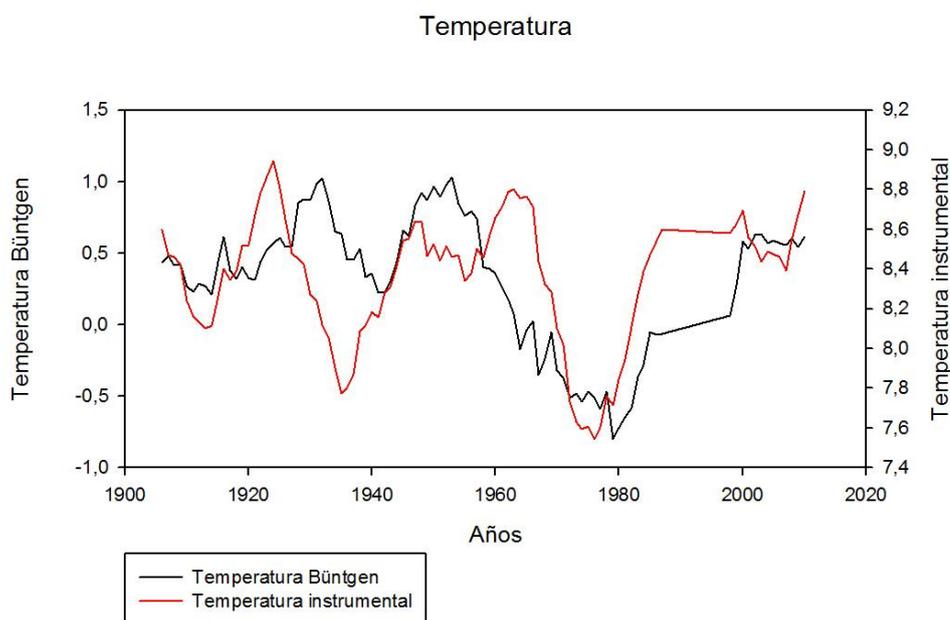


Figura 10. Correlación entre la temperatura instrumental y la extraída de la serie de Buntgen.

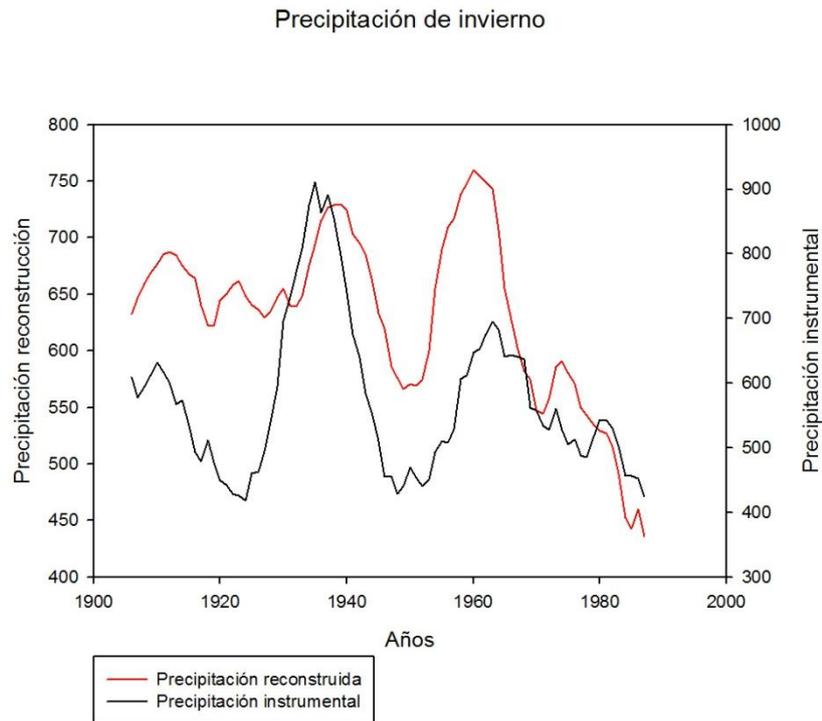


Figura 11. Correlación entre la precipitación de invierno de la serie instrumental y la obtenida a través de la reconstrucción generada mediante dendrocronología.

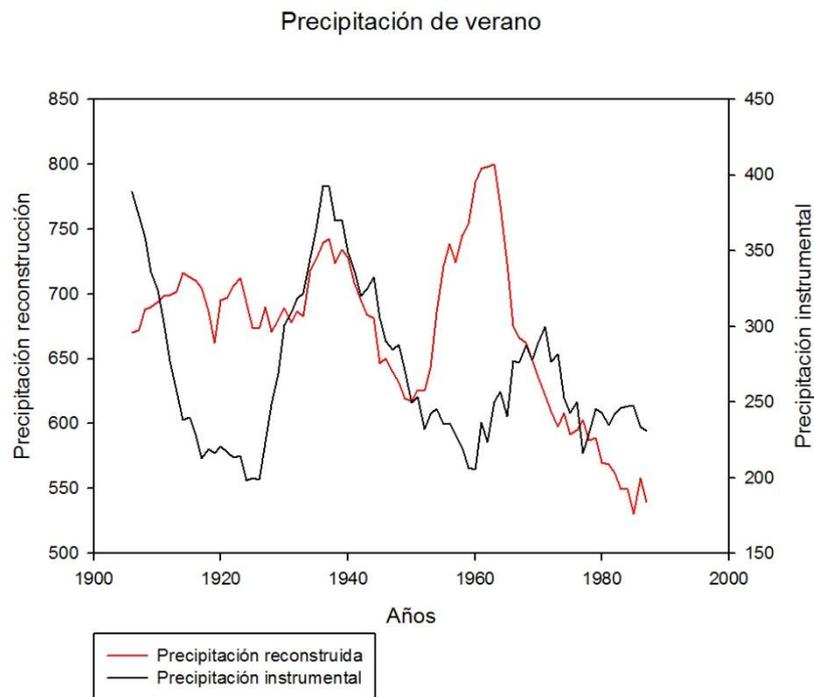


Figura 12. Correlación entre la precipitación de verano de la serie instrumental y la obtenida a través de la reconstrucción generada mediante dendrocronología.

4.4 Estudio de usos del suelo

La zona de estudio se encuentra situada en un entorno de alta montaña en el que no existe actividad agroforestal ni ganadera, por lo que, a priori, los cambios recientes en los usos del suelo estarán relacionados con otros tipos de actividad antrópica. En cualquier caso se ha creído conveniente introducir este análisis a partir de la información disponible para evaluar si estos posibles cambios han podido influir en los procesos de sedimentación.

La búsqueda de imágenes solo nos ha permitido obtener datos de las últimas cuatro décadas ya que la imagen más antigua localizada es la perteneciente al vuelo interministerial de 1973-1986. Tenemos también la del vuelo nacional de 1980-1986, la del vuelo quinquenal de 1999-2003, la del PNOA de 2006 y la más reciente, también del PNOA, de 2015. Todas ellas obtenidas a través del centro de descargas del CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica): <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

En la fig. 13 se muestran esas imágenes, y en ellas se alcanza a ver que, a excepción de los propios cambios estacionales y naturales de la zona (más o menos vegetación, mayor o menor verdor de la misma, la presencia o no de nieve o la diferente cota de llenado del lago) no existen cambios significativos en la ocupación del suelo.

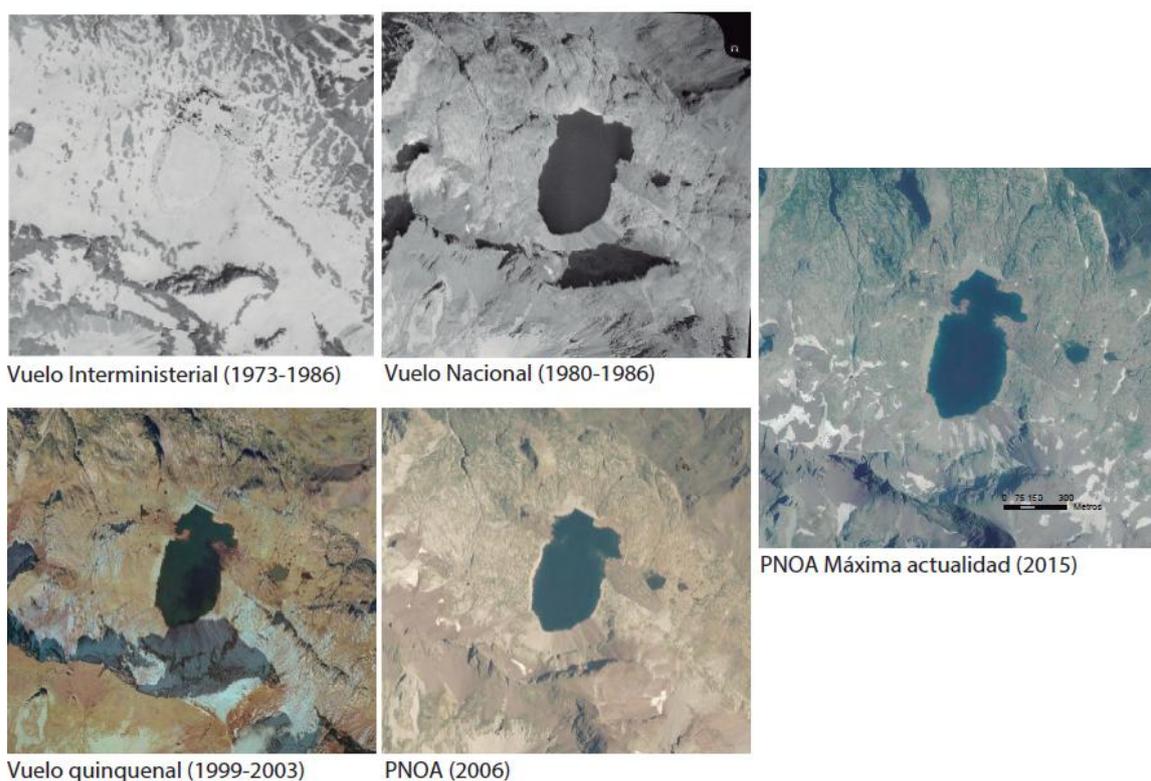


Figura 13. Diferentes imágenes aéreas del lago de Urdiceto pertenecientes a diferentes momentos en el tiempo. (CNIG).

Se procedió a realizar mapas de usos u ocupación del suelo. Para ello la búsqueda de información preliminar se fundamentó en el SIOSE y en el CORINE. El SIOSE (Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España), es un sistema integrado dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT) cuyo objetivo es generar una base de datos de Ocupación del Suelo para toda España a escala de referencia 1:25.000 de los años 2005 y 2011. Y en segundo lugar, el CORINE Land Cover (CLC) es un proyecto dirigido por la Agencia Europea de Medio Ambiente en el cual se desarrolla una base de datos sobre la cobertura y uso del territorio en la Unión Europea en los años 2006 y 2012.

Del análisis de estas dos fuentes se desprende que:

1. En el CORINE no aparecían cambios en una zona muy amplia alrededor del lago de Urdiceto.
2. En el SIOSE (tanto en el de 2005 como 2011) en el área de estudio únicamente se diferenciaban dos categorías:

- “ALG”: Esta categoría únicamente aparece una vez en el área de estudio y está representada por un polígono que cubre la masa de agua del lago de Urdiceto. Esta nomenclatura se presenta incluida en la categoría del SIOSE de coberturas de agua continentales y se define como lagos y lagunas.

-“A (40MTR_30SDNze_20ARR_10PSTam)”: Los alrededores del lago (tanto la cuenca de drenaje del mismo, como superficie externa a la misma) se cartografía en un mismo polígono, catalogado en la nomenclatura del SIOSE como una cobertura compuesta de “Asociación”. Esta asociación está definida con una composición de: 40% matorral, 30% suelo desnudo y zona erosionada, 20% afloramientos rocosos y 10% pastizal de alta montaña.

Son estas mismas categorías del SIOSE las que se han utilizado para realizar una cartografía de cobertura del suelo sobre las imágenes del PNOA y del vuelo Quinquenal. Para realizar los mapas se intentó en primer lugar realizar una clasificación supervisada con el programa ERDAS, pero los resultados no eran nada satisfactorios, especialmente para la imagen del vuelo quinquenal, debido a que no es una imagen con múltiples bandas, ya que la única imagen que era posible utilizar era la resultante del escaneado de la original.

Por ello se optó por realizar un primer mapa en ArcMap mediante una reclasificación del histograma. Utilizando este programa se fueron variando y añadiendo clases a la leyenda de forma que el resultado fuese una cartografía de cobertura del suelo que coincidiese con los cambios que se apreciaban visualmente. Posteriormente se utilizó un programa de edición para corregir y perfeccionar la imagen, el programa utilizado fue Adobe Illustrator.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Modelo cronológico

Aplicando el modelo de sedimentación constante para la datación con ^{210}Pb , la edad de la base (36 cm de profundidad) es de 1850 AD (Fig. 14). Utilizando los datos y valores de esta datación como referencia, se correlacionó este sondeo con el BIE-URD12-1B-1G, debido a su similitud y proximidad, y fue en éste segundo sondeo en el cual se extrapoló la datación hasta la base del registro. Para realizar esta extrapolación se tuvo que suponer que la tasa de acumulación de sedimento se mantenía constante a los últimos valores medidos en el sondeo 1C.

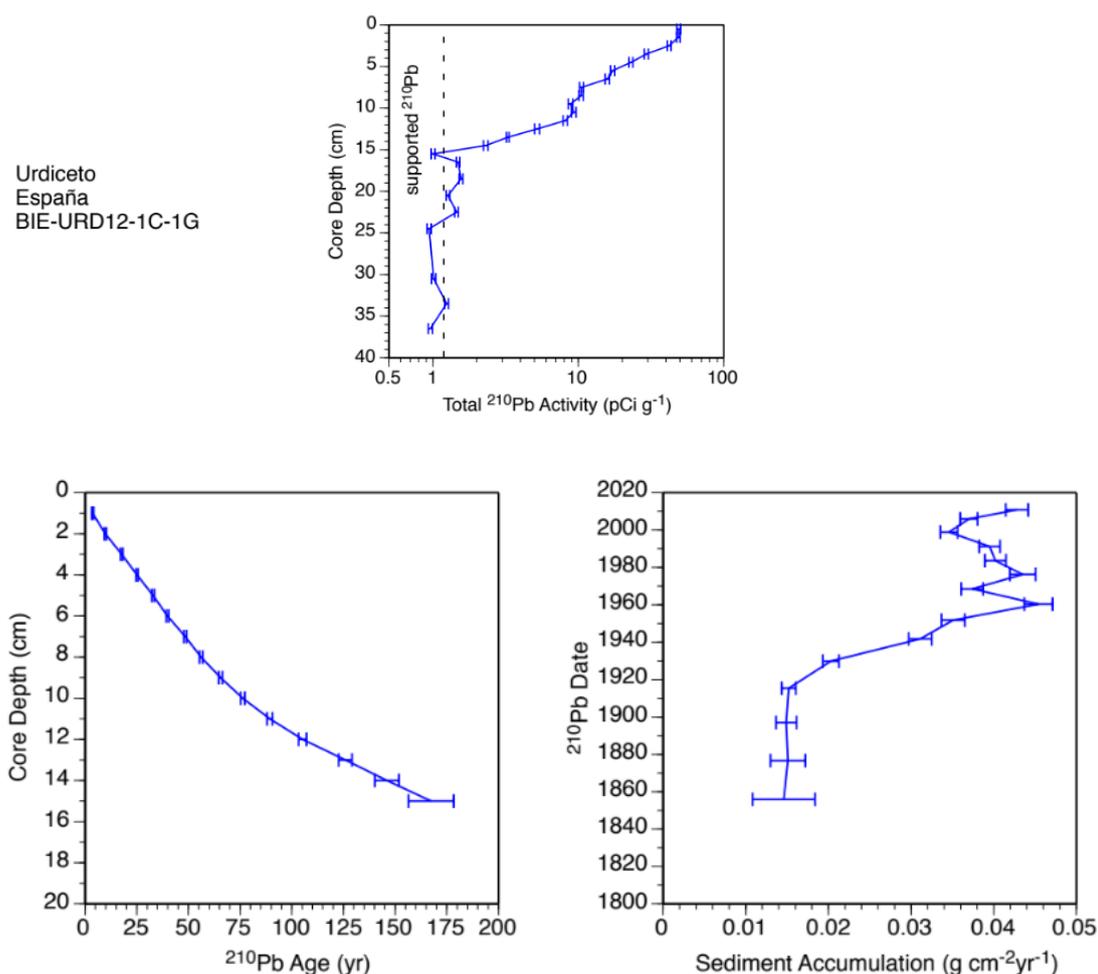


Figura 14. (A) Actividad del ^{210}Pb con respecto a la profundidad, (B) edad del ^{210}Pb con respecto a la profundidad, (C) tasa de sedimentación con respecto a la edad datada con el ^{210}Pb .

5.2. Caracterización del registro sedimentario

5.2.1. Facies sedimentarias

Las facies sedimentarias del sondeo del lago de Urdiceto se diferencian fundamentalmente en el tamaño de grano de los componentes detríticos y el contenido de materia orgánica, además del color.

Estos datos texturales y los valores de TOC que reflejan el contenido en materia orgánica, han permitido definir un total de cuatro facies, con unas características sedimentológicas diferentes en función de los parámetros expuestos anteriormente (Tabla 2). El contenido en carbonato es muy bajo en todas las facies. En las diferentes fotografías de frotis que aparecen en la fig.15, se pueden ver visualmente las diferencias entre estas facies.

Tabla 2. Descripción sedimentológica de cada una de las facies definidas.

Descripción sedimentológica	TIC, TOC, TS
Facies 1: Limos de color gris oscuro a negro masivos, con relativamente abundante materia orgánica lacustre (> 3%).	TS: 0,20 – 0,22 TOC: 3,8 – 5,5 Sin TIC
Facies 2: Limos de color marrón grisáceo masivos, con menor cantidad de materia orgánica lacustre que la facies 1.	TS: 0,1 – 0,2 TIC: 0 – 0,1 TOC: 1,3 – 4,9
Facies 3: Arenas finas que ocasionalmente aparecen en secuencias granodecrescientes, variando en el tamaño de grano de medio a fino. Abundante presencia de clastos de cuarzo angulosos y plagioclasas; algunos restos orgánicos .	TS: 0,05 – 0,145 TIC: 0 – 0,1 TOC: 1,0 – 4,0
Facies 4: Limos arcillosos de color rosa. Una única capa de 1 mm de espesor compuesta por limos muy finos	(Sin datos composicionales)

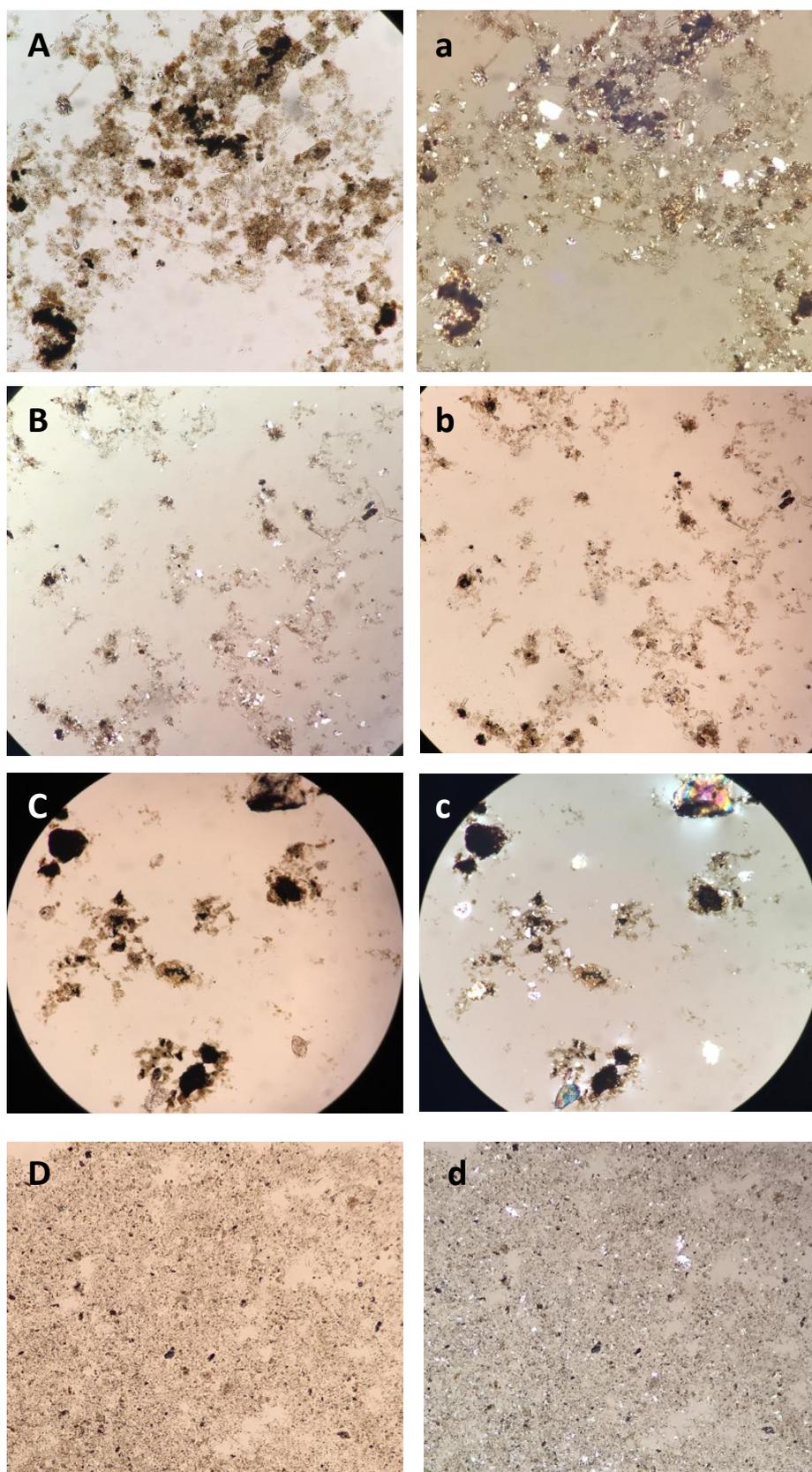


Figura 15. Microfotografías de frotis de las 4 facies diferenciadas en el lago de Urdiceto. Las fotografías A,B,C y D han sido tomadas con nicols paralelos, mientras que a,b,c y d con nicols cruzados. Las fotografías A y a pertenecen a la facies 1, las fotografías B y b a la facies 2, las fotografías C y c a la facies 3, y finalmente las fotografías D y d a la facies 4.

5.2.2 Estratigrafía

La secuencia sedimentaria de Urdiceto se divide en dos unidades: A y B, las cuales tienen unas diferencias bastante marcadas, además la unidad B se divide en dos subunidades (a y b):

-Unidad B:

Esta unidad es la que forma la base, y su vez, el cuerpo principal del sondeo (centímetro 52 a 9). Se compone de dos subunidades:

-Subunidad Bb:

Aparece en la base (centímetro 52) y se encuentra hasta el centímetro 36, está formada por limos marrones grisáceos de la facies 2 y arenas de la facies 3, en una alternancia de capas de alrededor de 1cm de espesor. Hacia la base de esta subunidad las capas de arena presentan una secuencia granodecreciente, donde varían de tamaño de grano medio a fino. Ocasionalmente (sólo aparece una vez en este registro) puede presentar finas láminas de limos arcillosos rosas de la facies 4.

-Subunidad Ba

Esta unidad se sitúa por encima de la subunidad anterior, comienza en el centímetro 36 y termina en el 9. Está constituida por arenas (que también en esta subunidad presenta ocasionales secuencias granodecrecientes) de la facies 3 y limos marrones grisáceos de la facies 2. En esta subunidad la alternancia entre estas facies es más grosera y las capas de las mismas pueden presentarse en tamaños que varían desde 1 centímetro hasta 9 centímetros.

-Unidad A

Se encuentra a techo del sondeo hasta el centímetro 9. Está constituida por limos grises oscuros a negros de la facies 1 y limos marrones grisáceos de la facies 2. Estas facies forman la unidad mediante una alternancia de las mismas, en capas que varían entre 1 y 3 centímetros de espesor.

5.2.3 Contenido en Carbono Orgánico, Carbono inorgánico y azufre

A lo largo del sondeo las tendencias de TIC y TOC (fig.16) muestran patrones muy similares, presentan algunas variabilidades pero su tendencia es aumentar hacia techo del sondeo.

El TIC se mantiene muy bajos en la Unidad B, inferiores a 0,03 en la subunidad Bb, y a 0,05 en la subunidad Ba, aunque incluso en esa fase de mayor estabilidad se sigue apreciando esta tendencia a aumentar hacia techo, pero el mayor aumento se recoge en la unidad A, donde los máximos alcanzan hasta 0,1.

En el TOC el ascenso más marcado de los valores se produce hacia techo de sondeo, pero ya empieza a apreciarse en la subunidad Ba. En la subunidad Bb presenta valores entre 1,04 y 4,04, en la subunidad Ba entre 1,2 y 5, y finalmente alcanza sus valores

mayores en la unidad A, entre 4,73 y 5,45, lo cual corresponde con ser la unidad que más limos y materia orgánica posee.

El TS mantiene esa tendencia de aumento hacia techo del sondeo pero con ligeras diferencias, la variabilidad a lo largo del sondeo es mucho menor que en el caso del TIC o el TOC, a excepción de un pico muy marcado que aparece en la unidad A, los valores que presenta en la subunidad Bb son de 0,05 a 0,15, en la subunidad Ba de 0,06 a 0,19 y finalmente en la unidad A, de 0,19 a 0,35.

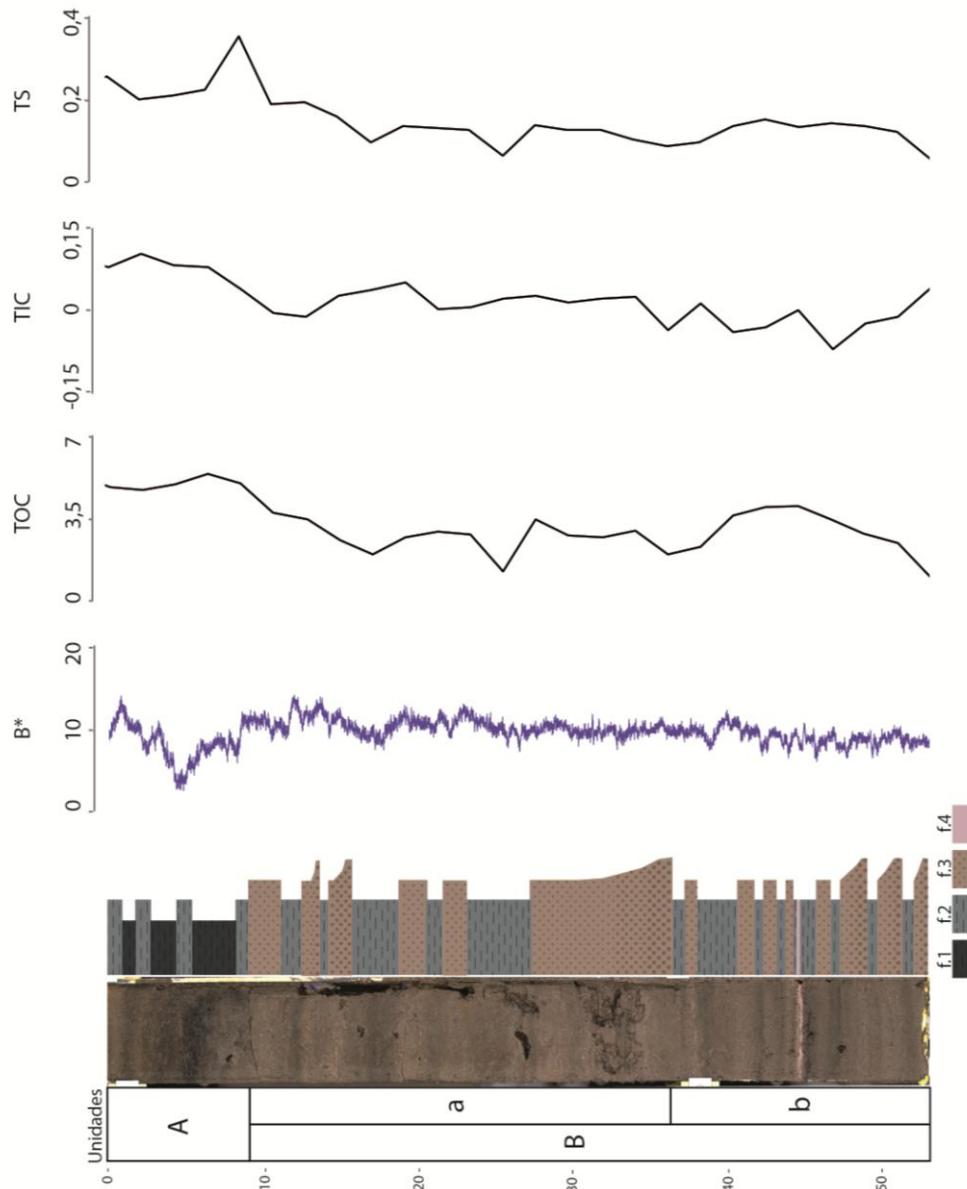


Figura 16. Fotografía y perfil sedimentológico de detalle de la secuencia junto con los diferentes parámetros analizados: parámetro b*, Total Carbono Orgánico, Total Carbono Inorgánico y Total Azufre.

5.2.4 Geoquímica

Dentro de los elementos más abundantes y representativos que se han analizado, se pueden diferenciar agrupaciones de elementos que tienen un comportamiento similar. Una de esas agrupaciones son los elementos pertenecientes a la fracción siliciclástica y elementos asociados a ellos, a este grupo pertenece el Al, Si, K, Ti, Zn y Zr.

Esta agrupación se interpreta como perteneciente a materiales alóctonos arrastrados hasta el lago y que forman un aporte externo (Currás et al., 2012; Kylander et al., 2011; Morellón et al., 2014). En este sondeo, este grupo de elementos tiene valores muy variables a lo largo de todo el sondeo, pero alcanza sus valores más bajos en la unidad A (Unidad formada únicamente por limos de la facies 1 y 2) y sus valores máximos aparecen en la facies 4, lo que indica que ha sido generada prácticamente por completo con aportes externos, probablemente durante un periodo de elevada escorrentía asociada a un evento de precipitación intenso. El resto de valores elevados para este tipo de elementos aparecen relacionados con la facies 3, y en concreto con aquellos tramos de esa facies en las que el tamaño de grano es mayor. Estos intervalos corresponderían a periodos en los que el arrastre de sedimentos hacia el lago ha podido ser mayor.

Además de estos elementos, también están representados en la figura 17 elementos como el Ca, que tiene un comportamiento complejo, ya que la cantidad de este elemento es la suma de minerales con Ca que pueden ser autóctonos y alóctonos. Dada la escasa presencia de carbonatos en la secuencia, se considera que la mayoría del Ca procede de minerales silíceos (plagioclasas) transportadas desde la cuenca.

El Br está relacionado con el S y tienen comportamientos muy similares; la cantidad de estos elementos es proporcional a la cantidad de materia orgánica presente en los sedimentos.

El Pb se mantiene en niveles bajos y constantes durante casi todo el sondeo, pero hacia techo sus valores aumentan muy drásticamente entre los 18 y 9 cm de profundidad, con un máximo a los 9 cm y un descenso rápido entre 9 – 8 cm, posteriormente mantiene unos valores moderados estables a techo que corresponden a las últimas décadas.

Para el estudio geoquímico del registro sedimentario también es muy interesante la elaboración de ratios de los elementos químicos. El primer ratio que se ha calculado es el Fe/Mn, el cual se utiliza como indicador de las condiciones más oxidantes o reductores del ambiente del fondo del lago e indirectamente de la altura de la lámina de agua (condiciones más anóxicas son más frecuentes si hay mayor profundidad). Vemos que este ratio se mantiene más o menos estable en la unidad B pero en la unidad A los valores tienen un descenso importante, coincidiendo con el represamiento del lago. Los valores menores de Fe/Mn se interpretan como un predominio de condiciones más oxidantes durante las últimas décadas en el fondo del lago, que estarían relacionadas con cambios en el régimen de manejo del embalse.

Otro ratio que se ha calculado es el de Ca/Ti, que se interpreta como un indicador del aumento o descenso en la proporción de carbonatos con respecto a materiales detríticos (Morellón et al., 2014; Corella et al., 2013). Este ratio mantiene la tendencia que se veía en casos anteriores, de mantenerse más o menos estable y con alteraciones poco destacables durante la mayoría del sondeo pero elevar sus valores hacia techo. Los valores altos de este ratio podrían indicar un aumento de la formación de calcita endogénica con respecto a los aportes clásticos en las últimas décadas, pero esta

interpretación tiene que contrastarse con otras líneas de evidencia. El ascenso general de la columna de agua podría haber favorecido el descenso de los aportes clásticos al centro del lago, su menor tamaño de grano y la producción de carbonatos en las facies que forman la unidad A.

El siguiente ratio utilizado para el estudio de este registro es el Rb/Zr, el cual es un buen indicador del aporte terrígeno y de cambios en el tamaño de grano. Valores más elevados se asocian a la mayor cantidad de minerales arcillosos más finos. En los valores de este ratio vemos nuevamente unos valores semi-estables, pero que descienden hacia techo y tienen un pico de aumento muy marcado en la base. El descenso de la ratio Rb/Zr ocurre nuevamente en el periodo de mayor impacto antrópico relacionado con la construcción de la presa, de forma que tras la construcción de la misma, y el aumento del nivel general del lago, el aporte de materiales alóctonos a la zona central es menor y los materiales que llegan son más finos (Unidad que únicamente presenta las facies 1 y 2). El pico en la base del sondeo se debe a la facies 4, compuesta por limos arcillosos.

El último ratio utilizado es el de Br/Ti, que refleja la relación entre materia orgánica y los aportes externos. Este ratio es el que muestra más variabilidad durante todo el sondeo, aumentando en las facies 1 y 2 y disminuyendo en las facies 3 y 4. De nuevo, se aprecia ese ascenso en los valores a techo del sondeo coincidiendo con la unidad A, donde solo aparecen las facies 1 y 2.

La variabilidad de todos estos elementos y ratios se puede ver a continuación en la fig. 17.

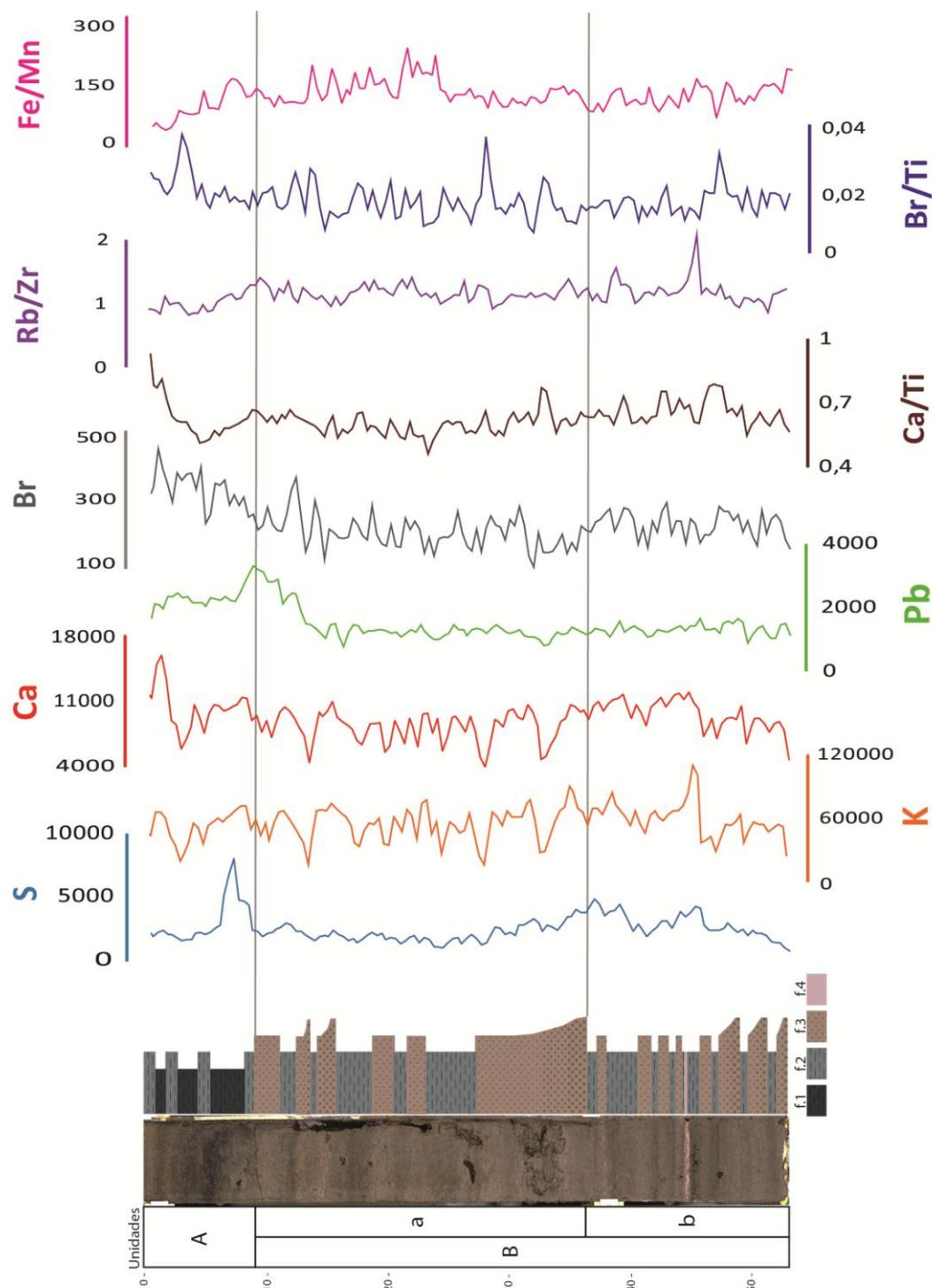


Figura 17. Representación de los elementos (S, K, Ca, Pb y Br) y ratios (Ca/Ti, Rb/ Zr, Br/Ti y Fe/Mn) más relevantes junto con la fotografía y perfil sedimentológico del sondeo.

5.3. Relación con el clima

En la fig. 18, se muestran algunos indicadores sedimentológicos y geoquímicos del sondeo representados de acuerdo con el modelo de edad, la división entre unidades y subunidades sedimentarias, la fotografía del registro, el perfil sedimentológico y los gráficos de datos estandarizados con las series climáticas de precipitación (reconstrucción basada en dendrocronología) y temperatura reconstruidas (Buntgen et al., 2008) y una más ampliada únicamente de los datos instrumentales (Serrano-Notivoli et al., 2017).

A todos estos datos ya explicados en apartados anteriores, se ha incorporado la cronología de los periodos climáticos más importantes conocidos a partir de distintas fuentes de información proxy y citados en un buen número de trabajos sobre paleoclimatología del último milenio (Oliva et al, 2017):

- **Máximo actual:** es un período natural de variación solar en el que desde 1914, ocurre una actividad solar relativamente alta, alcanzando su máximo en 1950 y un segundo máximo en 1990 (Solanki et al., 2004).
- **El Mínimo de Maunder:** se suele datar entre 1645 y 1715 o 1675 y 1715. (Eddy, 1976; Oliva et al., 2017). Recibe su nombre del astrónomo E.W. Maunder quien observó un número anormalmente bajo de manchas solares, hecho que se relaciona con un mínimo de actividad solar. Este periodo coincide con la fase más fría de la Pequeña Edad del Hielo en Europa.
- **El Mínimo de Spörer:** es otro periodo de baja actividad solar que duró desde 1450 a 1550 (Eddy, 1976). Como el Mínimo de Maunder, el mínimo de Spörer registró en prácticamente todo el globo unos valores de temperatura relativamente bajos.

Como se puede ver en la figura 18, no se aprecia una relación directa entre la variabilidad climática y el registro sedimentario, pero sí que se puede ver a grandes rasgos una relación entre sedimentación de facies de mayor tamaño de grano y los eventos o periodos de tiempo más fríos.

Este hecho se puede observar en varios intervalos a lo largo del registro. De base a techo se empieza a ver esta relación entre 1294 y 1255 (45 - 47 cm), con presencia de la facies 3 (mayor tamaño de grano de las facies definidas) depositadas durante un periodo de mínimos de temperatura.

El siguiente tramo con el periodo más frío de los datos reconstruidos coincide a su vez con el mínimo de Maunder, y se encuentra en el sondeo entre los centímetros 26 y 35 (se data entre 1477 y 1570), con sedimentación de facies 3 en un paquete granodecreciente.

Similar relación se aprecia en los centímetros 22 y 19, que datan de 1669 y 1728, y coinciden nuevamente con otro mínimo a nivel mundial, el mínimo de Spörer y deposición de la facies 3. Se repite igualmente el patrón que se apreciaba a base del sondeo, con picos de temperaturas más bajas, separados por un pequeño periodo más cálido y se refleja en una intercalación de la facies 2.

La última relación que se va a destacar con respecto a los periodos más fríos de tiempo es la que ocurre en los centímetros 13 y 10 (datos en 1687 y 1907 respectivamente), donde de nuevo, se puede ver esa concordancia entre descenso de temperatura y deposición de materiales de la facies 3, separados por un pequeño periodo de aumento de la temperatura que se muestra en el registro como una capa de la facies 2.

Estas relaciones cualitativas sugieren que durante los periodos más fríos, los aportes a la zona central del ibón de Urdiceto fueron más gruesos y que en periodos más cálidos el tamaño de grano será menor. Esta dinámica sedimentaria podría estar condicionada por la presencia de eventos de mayor energía durante estos periodos o por niveles del lago relativamente más bajos que permitirían el acceso de los materiales más gruesos a la zona central del lago.

En el registro aparecen tres periodos más marcados donde las temperaturas son mayores: El primero alrededor de 1314 (cm 45) coincide con un tramo del registro donde aparecen la facies 2 y 4. Otro tramo donde se puede apreciar esta relación es entre los centímetros 36 y 45, el cual es un periodo de tiempo largo de temperaturas más cálidas (1300 – 1470) donde abundan los sedimentos de la facies 2, en este periodo aparecen dos picos de descenso de la temperatura en el centímetro 37 y 43 (alrededor de 1344 y 1452 respectivamente) y eso podría corresponder en el registro sedimentario en dos pequeñas capas de escaso espesor de la facies 3.

Finalmente, a techo del sondeo, se encuentra el periodo de tiempo con las temperaturas más cálidas obtenidas en la reconstrucción climática, este periodo es el que se denomina como Máximo Actual, y en el registro está representado desde el centímetro 9 hasta techo del sondeo. En este periodo no se puede hacer una relación directa entre el registro y el clima ya que coincide con el momento de construcción de la presa y, por lo tanto, estos sedimentos no responden únicamente a las variabilidades climáticas, sino también, al régimen de explotación del embalse. En este tramo se presentan únicamente facies de tamaño de grano fino, como son la facies 1 y 2, probablemente ocasionadas por la combinación de ambos impactos.

A pesar de las limitaciones temporales, se puede apreciar que las características del sedimento durante algunos periodos se pueden relacionarse con la variabilidad climática a escala decadal o centenaria. Bien es cierto que en el caso de este lago, no se puede realizar una correlación directa entre eventos climáticos breves (como eventos concretos de precipitación) con tipos de sedimentación anual o estacional como sucede en otros registros, diferenciando entre sedimentación propia de verano o invierno, como es posible en otros lagos: Corella et al., 2013; Larrasoña et al., 2010). La resolución temporal del registro del lago Urdiceto es decadal a multidecadal, lo que puede explicar las dificultades de correlación entre cambios en el tamaño de grano y la variabilidad climática en temperaturas o precipitaciones. . A pesar de ello, se aprecia en el registro que el comportamiento de la sedimentación en el lago responde a la variabilidad debida a cambios climáticos decadales (con un impacto regional), como a cambios climáticos más grandes, a nivel hemisférico y más prolongados en el tiempo (Mínimo Maunder, mínimo Spörer y Máximo Actual).

Por otra parte hay que destacar que en otros intervalos del registro sedimentario del lago no existen estas relaciones tan claras y esto puede deberse a múltiples factores, como que la cuenca es una cuenca muy pequeña y depende en gran medida de factores muy locales. Por ello, se pretende avanzar en la interpretación del registro de este lago con un programa de monitorización del mismo incluyendo trampas de sedimento, de forma

que se conozca su dinámica de forma más minuciosa, y así poder hacer una relación con el clima más precisa.

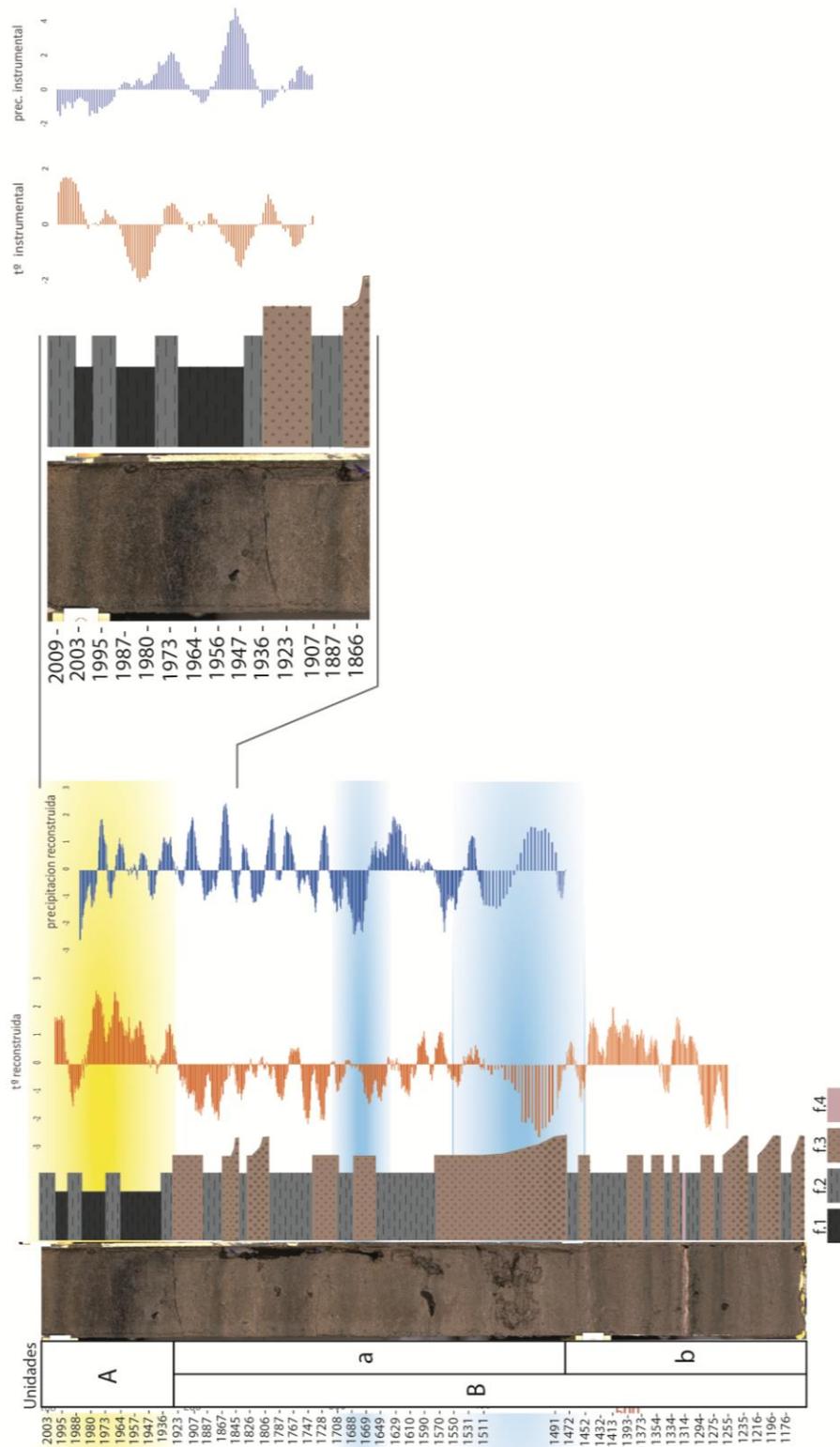


Figura 18. Fotografía del sondeo, datación centímetro a centímetro y gráficos de las diferentes series climáticas.

5.4. Cambios en los usos del suelo

Como ya se ha explicado en la metodología, se utilizaron las categorías que mostraba el SIOSE para la realización de estos mapas, las cuales diferenciaban en la zona de estudio las siguientes clases: lagos, matorral, suelo desnudo y zona erosionada, afloramientos rocosos y pastizal de alta montaña. Además debido a la forma de realización de estos mapas, ha sido necesario introducir también la clase “sombras”.

Los mapas resultantes tras el trabajo de reclasificación del histograma con ArcMap y la edición con Adobe Illustrator, sobre las imágenes del PNOA (Fig. 19) y del vuelo Quinquenal (Fig. 20), son los mostrados a continuación:

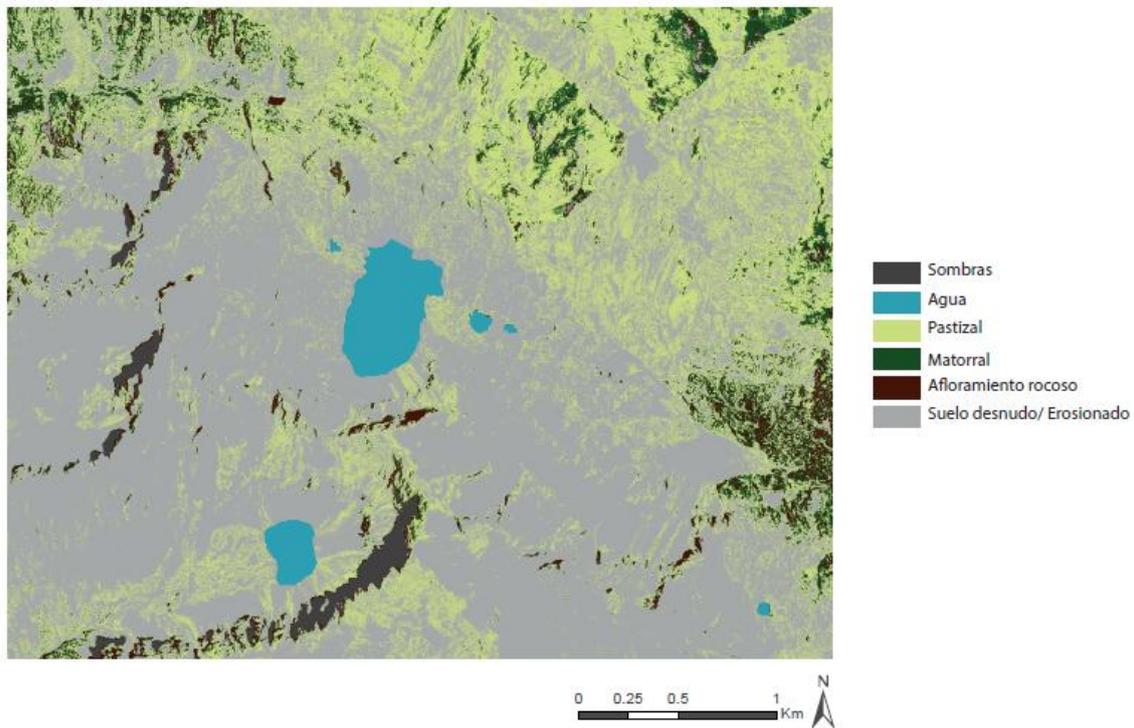


Figura 19. Mapa de usos del suelo basando en la imagen del PNOA de máxima actualidad y en las categorías de cobertura del suelo del SIOSE.

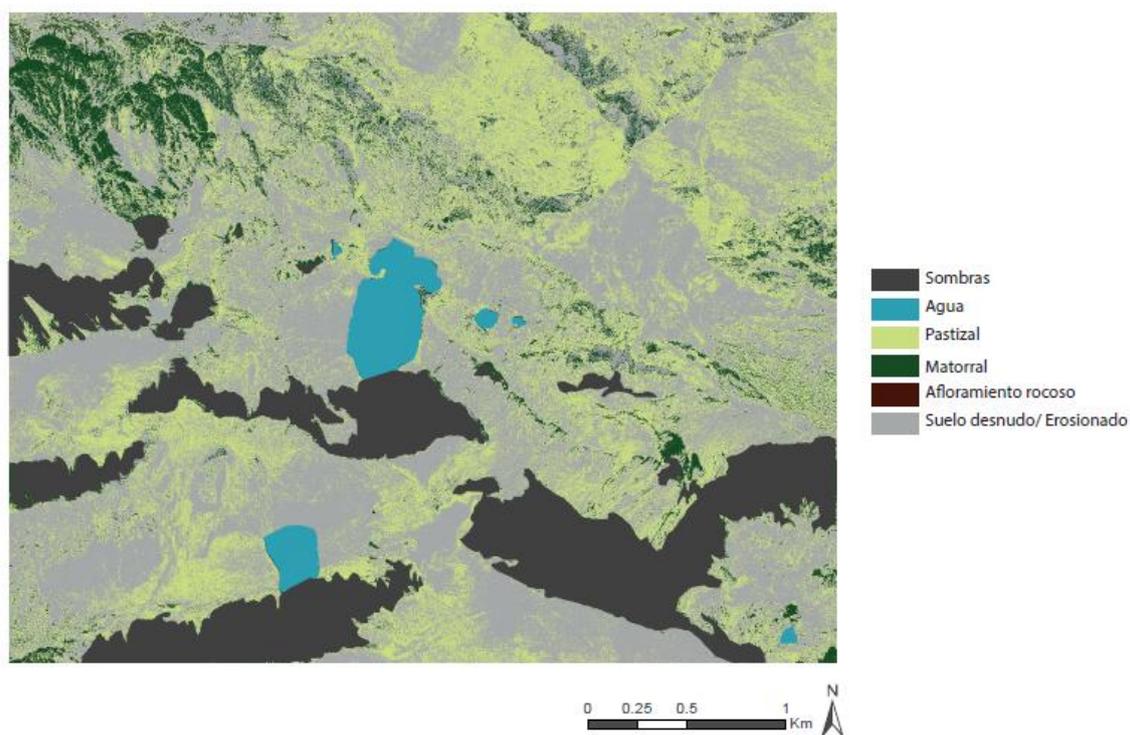


Figura 20. Mapa de usos del suelo basando en la imagen del vuelo Quinquenal (1992-2003) y en las categorías de cobertura del suelo del SIOSE.

Finalmente, tras estudiar los mapas resultantes, las imágenes originales, y las diferentes cartografías en las que se han basado estos mapas (fig. 19 y 20), puede señalarse que no hay cambios lo suficientemente relevantes en las proximidades del lago para que puedan afectar a su dinámica natural, de forma que los cambios que se aprecien en el registro sedimentológico deben ser consecuencia de factores climáticos o antrópicos de otro tipo, como la construcción de la presa.

Un resultado como este es esperable en una zona de estudio sometida a unas dinámicas climáticas y geomorfológicas propias de entornos de alta montaña, en los que el uso antrópico del territorio en forma de explotaciones agrícolas, forestales o ganaderas es inexistente, por las propias limitaciones físicas del territorio, o en todo caso testimonial. Como ya hemos señalado, sólo la construcción de infraestructuras, en este caso de aprovechamiento hidroeléctrico, han supuesto un cambio significativo en el uso y ocupación de este espacio, si bien al ser un cambio abrupto y lógicamente bien datado del cambio en la dinámica sedimentaria del lago no implican problemas en el análisis del periodo anterior.

Para seguir avanzando en este apartado podría ser interesante realizar un estudio de todos los aspectos de erosión que se producen en la cuenca del lago, cómo la génesis y dinámica de los derrubios de ladera. Aunque de la misma forma que con los mapas de cobertura de suelo, únicamente se podría estudiar un periodo de tiempo breve y reciente, que posiblemente no remontaría tiempo atrás de la construcción de la presa. Con lo que no sería posible obtener información de este proceso en un momento sin afecciones antrópicas en la cuenca, y por lo tanto, sería muy difícil reconstruir la dinámica de erosión en condiciones naturales.

5.5. Contaminación por metales pesados

La deposición atmosférica de Pb en el lago de Urdiceto fue muy baja desde el siglo XII hasta el siglo XIX, cuando aumento muy drásticamente (Fig. 21). El mayor ascenso de los valores de este mineral puede deberse a la actividad en la zona minera del Alto Cinca (Parzán) durante el final del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX ya que a pesar de que el mineral no se explotaba en las cercanías del lago ni se realizaban labores metalúrgicas en esta región, una vez que los compuestos de Pb entran a la atmósfera, pueden viajar largas distancia. Los valores de Pb descienden a partir de mediados del siglo XX pero no alcanzan los valores originales. Esto es debido a que entre los años 1950 y 2000 ocurrió un ascenso de los niveles ambientales de plomo a nivel mundial, los cuales aumentaron en más de mil veces, reflejando entre otras cosas, el aumento del uso de gasolina con plomo en todo el mundo (el plomo es liberado al aire cuando se quema carbón, petróleo o desechos) (ATSDR, 2016).

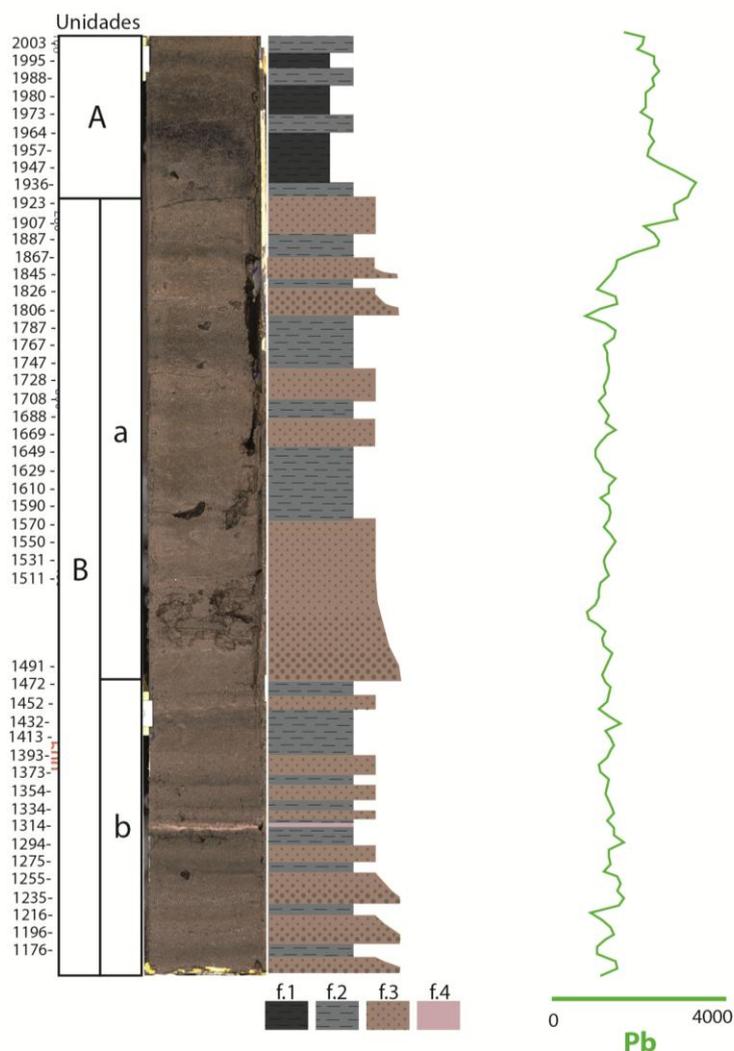


Figura 21. Representación del Pb junto al modelo geocronológico.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha utilizado el registro sedimentario lacustre de un lago de alta montaña como archivo paleoambiental, para reconstruir el impacto natural de la variabilidad del clima y el impacto de las actividades humanas durante los últimos 1000 años. El estudio sedimentológico y la utilización de indicadores geoquímicos ha permitido realizar una reconstrucción de la evolución sedimentaria de este lago desde el siglo XII.

La definición de cuatro facies sedimentarias diferentes, junto con el análisis geoquímico del sondeo y la realización de mapas de ocupación del suelo, ha permitido demostrar que la distribución de facies en el lago de Urdiceto, hasta hace aproximadamente 100 años (Unidad B), respondía prácticamente en exclusiva a la variabilidad del clima. Pero en la distribución más actual de facies (Unidad A), el registro no debe su naturaleza únicamente a la variabilidad climática, sino que también a la acción antrópica debido al régimen de explotación del embalse para su uso hidroeléctrico. Por ello se van a diferenciar estas dos principales fases en el registro, una primera de comportamiento natural del lago, y una posterior de funcionamiento del lago con afecciones antrópicas.

Estos argumentos se basan en la relación de la evolución climática de los últimos siglos con el registro sedimentario depositado en el lago. Una de las relaciones principales que se encuentran en la primera fase de funcionamiento natural del lago sin afecciones antrópicas, es la existente entre periodos fríos prolongados en el tiempo y un mayor tamaño de grano de los sedimentos depositados en el lago. Esta relación se hace más visible en los tramos del sondeo que coinciden con cambios en el clima hacia temperaturas más frías conocidos a nivel hemisférico, es decir, el mínimo de Maunder y el mínimo de Spörer. Estos periodos climáticos se reflejan en el registro sedimentario como intervalos de sedimento de la facies 3 (la cual, es la facies de mayor tamaño de grano del registro). Además, en varios momentos a lo largo del registro, cuando durante un periodo más largo de tiempo con temperaturas frías aparece un periodo más breve de temperaturas cálidas, el registro presenta a su vez un cambio de la facies 3 a la facies 2.

Por otro lado, basándose en el mismo argumento explicado anteriormente pero a la inversa, durante periodos más cálidos el tamaño de grano será menor y el contenido en materia orgánica mayor. En el registro se visualiza este argumento con la mayor presencia de sedimentos de la facies 2 (facies de tamaño fino) en periodos largos de temperaturas más cálidas. De la misma forma que en el caso anterior, cuando aparecen picos ocasionales y breves de descenso de la temperatura se expresa en el registro en pequeñas capas de la facies 3.

Cuando la fase de comportamiento natural del lago termina, y comienza el periodo de afecciones antrópicas (tanto las relacionadas con la minería como con la explotación hidroeléctrica), también comienza el momento climático más cálido del registro, es el que se denomina como Máximo Actual. En este periodo no se puede hacer como en el caso anterior, una relación directa entre el registro y el clima, ya que coexisten a la vez afecciones climáticas y antrópicas y, por lo tanto, estos sedimentos no responden únicamente a las variabilidades climática, sino también, al impacto antrópico.

En este momento el sondeo está únicamente formado por las facies de tamaño de grano más fino, como son la facies 1 y 2. Aún así, dentro de este periodo más cálido, siguen ocurriendo pequeñas fluctuaciones entre periodos de mayor o menor temperatura, más o menos cálido, y se traducen en el sondeo en cambios entre la facies 1 y 2. Es decir, la

relación que se apreciaba en la fase natural del lago, de periodos más fríos con sedimento grueso y periodos más cálidos con sedimento fino, en la fase antrópica del lago, pasa a ser una relación de periodos de menor temperatura con sedimento fino y periodos de mayor temperatura con sedimento muy fino. Y esto es debido a la combinación en esta segunda fase de ambos tipos de impactos.

En conclusión, el registro sedimentario muestra una variabilidad similar en la media y baja frecuencia con los cambios en el clima, es decir, a la vez que observamos cambios en la tipología del sedimento que perduran durante varias décadas (cambios en el tamaño de grano, cantidad de materia orgánica o composición) hay cambios en la dinámica climática que coinciden con eventos fríos y cálidos reconstruidos a partir de diferentes proxies. Existen partes en el registro en las que no se aprecian estas coincidencias y esto puede deberse a múltiples factores, como el reducido tamaño de la cuenca y con ello en su dependencia directa de factores más locales. Una monitorización de los procesos sedimentarios actuales en el lago permitirán avanzar en entender mejor esta relación entre variabilidad climática, eventos hidrológicos extremos y gestión del embalse y los procesos sedimentarios en el lago. Estos datos permitirán mejorar las políticas de adaptación de estos ecosistemas de montaña a los efectos de los cambios climáticos y antrópicos a los que se enfrentan.

7. BIBLIOGRAFÍA

Appleby, P.G., Oldfield, F. (1978): The calculation of ^{210}Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. *Catena*, 5, 1-8.

Appleby, P.G., Oldfield, F. (1983): The assessment of ^{210}Pb data from sites with varying sediment accumulation rates. *Hydrobiologia*, 103, 29-35.

Appleby, P.G., Oldfield, F. (1985): *Empirical testing of ^{210}Pb -dating models for lake sediments*. En Haworth, E.Y., Lund, J.W.G. (eds.), *Lake Sediments and Environmental History*: Minneapolis, Minnesota, EUA, University of Minnesota Press, 93-124.

Appleby, P.G. (2001): *Chronostratigraphic techniques in recent sediments*. En Last, W.M., Smol, J.P. (eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments Volume 1 Basin Analysis, Coring and Chronological Techniques*: Dordrecht. Kluwer Academic, 171-203.

Aranbarri, J., González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B., Moreno, A., Gil-Romera, G., Sevilla-Callejo, M., García-Prieto, E., Di Rita, F., Mata, M.P., Morellón, M., Magri, D., Rodríguez-Lázaro, J. y Carrión, J.S. (2014): Rapid climatic changes and resilient vegetation during the Lateglacial and Holocene in a continental region of south-western Europe. *Global and Planetary Change* 114, 50-65.

ATSDR (2016): *Reseña Toxicológica del plomo*. Serie de resúmenes de salud pública sobre sustancias peligrosas y sus efectos sobre la salud. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs13.html (01/11/2017)

Barreiro-Lostres, F., Brown, E., Moreno, A., Morellón, M., Abbott, M., Hillman, A., Giralt, S., Valero-Garcés, B., (2015): Sediment delivery and lake dynamics in a Mediterranean mountain watershed: Human-climate interactions during the last millennium (El Tobar Lake record, Iberian Range, Spain). *Science of the Total Environment*, 533, 506-519.

Battarbee, R. (1999): The importance of palaeolimnology to lake restoration. *Hydrobiologia*, 395, 149-159.

Bernal, J.P., Baramendi, L.E., Lugo-Ibarra, K.C., Walter, L. (2010): Revisión a algunos geocronómetros radiométricos aplicables al Cuaternario. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62, 305-323.

Büntgen, U., Frank, D., Grudd, H., and Esper, J. (2008): Long-term summer temperature variations in the Pyrenees. *Climate Dynamics*, 31, 615–631.

Carroll, J., Lerche, I. (2003): *Sedimentary processes quantification using radionuclides: Amsterdam*. Elsevier, 272 p.

C.H.E (1994): Inspección y examen de las presas de Pineta, Plandescun, Urdiceto y Laspuña, en el río Cinca e IP en el río Aragón. Ref: 0045B

Chueca, J., Julián, A., Saz, M. A., Novau, J. C., Moreno, J. I. L. (2005): Responses to Climatic Changes Since the Little Ice Age on Maladeta Glacier (Central Pyrenees). *Geomorphology* 68 (3-4), 167-182.

- Cohen, A.S. (2003): *Paleolimnology: The history and evolution of lake systems*. Oxford University Press, New York, 528 p.
- Corella, J.P., Stefanova, V., Anjoumi, A., Rico, E., Giralt, S., Moreno, A., Plata-Montero, A. y Valero-Garcés, B.L. (2013): A 2500-year multi-proxy reconstruction of climate change and human activities in northern Spain: The Lake Arreo record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386, 555-568.
- Cuadrat, J.M., Saz, M.A., Vicente-Serrano, S.M. (2007): *Atlas climático de Aragón*. Gobierno de Aragón, 155-166.
- Cuna, E., Caballero, M., Zawisza, E., Ruiz, C. (2015): Historia ambiental de un lago alpino en el centro de México: 1230-2010, 18, 97-106.
- Currás, A., Zamora, L., Reed, J.M., García-Soto, E., Ferrero, S., Armegol, X., Mezquita-Joanes, F., Marqués, M.A., Riera, S. y Julià, R. (2012): Climate change and human impact in central Spain during Roman times: High-resolution multi-proxy analysis of a tufa lake record (Somolinos, 1280 m asl), *Catena*, 89, 31-53.
- Eddy, J.A. (1976): *The Maunder Minimum*. Science 192, 1189–1202.
- Goldberg, E.D., Koide, M. (1962): Geochronological studies of deep sea sediments by the ionium/thorium method: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 26, 417-450.
- González-Hidalgo, J., Brunetti, M. y De Luis, M. (2011): A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitation trends December 1945-November 2005), *International Journal of Climatology*, 31, 715–731.
- Herrera, S., Gutierrez, J., Ancell, R., Pons, M., Frías, M. y Fernández, J. (2012): Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain, *International Journal of Climatology*, 32, 74–85.
- Krishnaswamy, S., Lal, D. (1978): *Radionuclide Limnology*. En Lerman, A. (ed.). Lakes Chemistry, Geology and Physics: New York, Springer Verlag, 153-177.
- Kylander, M.E., Ampel, L., Wohlfarth, B., Veres, D. (2011): High-resolution X-ray fluorescence core scanning analysis of Les Echets (France) sedimentary sequence: new insights from chemical proxies. *Journal Quaternary Science*, 26, 109–117.
- Larrasoaña, J.C., Ortuño, M., Birks, H.H., Valero-Garcés, B., Parés, J.M., Copons, R., Camarero, L., Bordonau, J. (2010). Palaeoenvironmental and palaeoseismic implications of a 3700-year sedimentary record from proglacial Lake Barrancs (Maladeta Massif, Central Pyrenees, Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 294, 83-93.
- Mattauer, M. (1968): Les traits structuraux essentiels de la chaîne pyrénéenne. *Revue géographique physique et géologie dynamique*, 10, 3-12.
- Montes, C., G. Oliver, F. Molina y J. Cobos (1995): *Bases ecológicas para la restauración de humedales en la cuenca mediterránea*. DGOH. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla, 348 p.

Morellón, M., Anselmetti, F.S., Valero-Garcés, B., Giralt, S., Ariztegui, D., Sáez, A., Mata, M.P., Barreiro-Lostres, F., Rico, M. y Moreno, A. (2014): The influence of subaquatic springs in lacustrine sedimentation: Origin and paleoenvironmental significance of homogenites in karstic Lake Banyoles (NE Spain). *Sedimentary Geology*, 311, 96-111.

Morellón, M., Pérez-Sanz, A., Corella, J. P., Büntgen, U., Catalán, J., González-Sampériz, P., González-Trueba, J. J., López-Sáez, J. A., Moreno, A., Pla-Rabes, S., Saz-Sánchez, M. Á., Scussolini, P., Serrano, E., Steinhilber, F., Stefanova, V., Vegas-Vilarrúbia, T., and Valero-Garcés, B. (2011): A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the Southern Pyrenees, *Clim. Past*, 8, 683-700.

Oliva, M.; Ruiz-Fernández, J.; Barriendos, M.; Benito, G.; Cuadrat, J.M.; García-Ruiz, J.M.; Giralt, S.; Gómez-Ortiz, A.; Hernández, A.; López-Costas, O.; López-Sáez, J.A.; Martínez-Cortizas, A.; Moreno, A.; Prohom, M.; Saz, M.A.; Serrano, E.; Tejedor, E., Trigo, R., Valero-Garcés, B. & Vicente-Serrano, S. (2017). The Little Ice Age in Iberian mountains. *Earth Science Reviews*, 177, 175-208.

Pérez-Sanz, A., González-Sampériz, P., Moreno, A., Valero-Garcés, B., Gil-Romera, G., Rieradevall, M., Tarrats P., Lasheras-Álvarez, L., Morellón, M., Belmonte, A., Sancho, C., Sevilla-Callejo, M., Navas, A.(2013): Holocene climate variability, vegetation dynamics and fire regime in the central Pyrenees: The Basa de la Mora sequence (NE Spain). *Quaternary Science Reviews*, 73, 149-169.

Renaut, R.W., Gierlowski-Kordesch, E.H. (2010): *Lakes*. En: Dalrymple, R., James, N. (eds.), *Facies Models*, 4^o ed. Geological Association of Canada, Toronto (Canada), 541-575.

Ríos, J.L., Lanaja, J.M., Beltrán, F.J., Ríos, J.M., Marín, F.J. (1982): *Memoria explicativa del mapa geológico de España*. Escala 1:50.000, Hoja nº147 (31-8) (Liena). Segunda serie, Primera edición. Servicio de publicaciones del Ministerio de industria y energía.

Ríos, J.L., Lanaja, J.M., Beltrán, F.J., Ríos, J.M., Marín, F.J. (1982): *Memoria explicativa del mapa geológico de España*. Escala 1:50.000, Hoja nº179 (31-9) (Bielsa). Segunda serie, Primera edición. Servicio de publicaciones del Ministerio de industria y energía.

Sanz, J.L. (1991): *Concepto de impacto ambiental y su evaluación*. En: Baretino Fraile, D., Gallego Valcarce, E., Hidalgo Castro, M.N., Jordá Pardo, J.F. y Vadiello Fernández, L. (eds.), *Evaluación y corrección de impactos ambientales*. Serie Ingeniería Geoambiental. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.

Saz, M.A. (2003): *Temperaturas y precipitaciones en la mitad norte de España desde el siglo XV : estudio dendroclimático*. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. 293 p.

Schnurrenberger, D., Russell, J., Kelts, K. (2003): Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components. *Journal of Paleolimnology*, 29, 141–154.

Serrano-Notivoli, R., De Luis, M., Sanz, M.A., Beguería, S. (2017): Spatially based reconstruction of daily precipitation instrumental data series. *Climate Research*, 73, 167-186.

Smol, J.P. (2008): *Pollution of Lakes and Rivers: A Paleoenvironmental Perspective*. Wiley-Blackwell Publishing, Oxford.

Valero Garcés, B., Morellón, M., Martín Puertas, C., Moreno, A., Corella, P., González Sampériz, P., Rico, M., Mata, P. y Navas, A. (2009): Una visión paleolimnológica de tres lagos kársticos (Zoñar, Estanya y Taravilla): evolución sedimentaria y paleohidrológica, clima e impacto humano e implicaciones para la gestión y conservación. *Boletín geológico y minero*, 120, 479-496.

Vera, J.A. (Ed.) (2004). *Geología de España*. SGS-IGME.

Wei, J.H., Finkelstein, D.B., Brigham-Grette, J., Castaneda, I., Nowaczyk, N. (2014): Sediment colour reflectance spectroscopy as a proxy for wet/dry cycles at Lake El'gygytgyn, Far East Russia, during Marine Isotope Stages 8 to 12. *Sedimentology*, 61, 1793–1811.