



**VNiVERSiDAD  
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL



INSTITUTO  
PIRENAICO  
DE ECOLOGÍA

**CSIC**

# **The Sanabria Lake record: Climate and Environmental variability in the NW Iberian Peninsula for the last 26000 years**

**Tesis Doctoral**

**Margarita Jambrina Enríquez**

**Salamanca - mayo 2015**



Departamento de Geología  
Universidad de Salamanca (USAL)  
Salamanca – España



Departamento de Procesos Geoambientales y Cambio Global  
Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC)  
Zaragoza - España

**‘The Sanabria Lake record:  
Climate and Environmental  
variability in the NW Iberian  
Peninsula for the last 26000 years’**

**Tesis Doctoral - *PhD Thesis***

**Margarita Jambrina Enríquez**

Salamanca – mayo 2015





Departamento de Geología  
Universidad de Salamanca (USAL)  
Salamanca – España



Departamento de Procesos Geoambientales y Cambio Global  
Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC)  
Zaragoza - España

***‘The Sanabria Lake record: Climate and  
Environmental variability in the NW Iberian Peninsula  
for the last 26000 years’***

*“El registro del Lago de Sanabria: variabilidad climática y  
ambiental en el NO de la Península Ibérica  
para los últimos 26000 años”*

Memoria presentada por **Margarita Jambrina Enríquez** para optar al grado de **Doctor en Geología** por la **Universidad de Salamanca**.

Directores:

Dr. Blas Lorenzo Valero Garcés  
Profesor de Investigación del Consejo Superior  
de Investigaciones Científicas - CSIC  
Departamento de Procesos Geoambientales y  
Cambio Global  
Instituto Pirenaico de Ecología – IPE-CSIC  
Zaragoza

Dr. Clemente Recio Hernández  
Profesor Titular del Departamento de Geología  
(Petrología y Geoquímica)  
Facultad de Ciencias  
Universidad de Salamanca  
Salamanca





A mis padres





*San Martín de Castañeda,  
espejo de soledades,  
el lago recoge edades  
de antes del hombre y se queda  
soñando en la santa calma  
del cielo de las alturas  
en que se sume en honduras  
de anegarse, ¡pobre!, el alma....*

*Miguel de Unamuno, 1 - 6 - 1930*





La realización de esta Tesis Doctoral ha sido posible gracias a la concesión de la beca predoctoral dentro del Programa de Ayuda para contratos de Formación de Personal Investigador de la Universidad de Salamanca cofinanciada por el Banco de Santander, y a la financiación obtenida por los proyectos CALIBRE (CGL2006-13327-C04-01/CLI), GRACCIE CONSOLIDER (CSD 2007-00067) e INIA (RTA-2008-00026-C07-3) del Ministerio de Economía y Competitividad, Fundación Patrimonio Natural de Castilla y León, PAC08-0187-6481 de la Consejería de Educación y Ciencia de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha; y diversos contratos anuales con REPSOL. *The European Cooperation in Science and Technology, Earth System Science and Environmental Management COST Action ES0907 - INTegrating Ice core, MArine and TErrestrial records - 60,000 to 8000 years ago (INTIMATE) – in the form of a Short-Term Scientific Mission (STSM)* - ha financiado la estancia de investigación en la Universidad de Potsdam (Alemania).



## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mis directores de Tesis, Dr. Blas Lorenzo Valero Garcés y Dr. Clemente Recio Hernández, por la oportunidad que me dieron de trabajar con ellos, por su dedicación y disponibilidad continua, orientación y apoyo ofrecido en el transcurso de esta Tesis Doctoral. Dosis de optimismo, ese necesario y siempre bienvenido soplo de aire fresco.

Quiero destacar en estas líneas de agradecimientos al Dr. Ildefonso Armenteros Armenteros. Comenzamos con unas pequeñas lagunas charras y terminamos con un gran lago por tierras zamoranas. Tus consejos y sugerencias, ayuda e interés en este trabajo. Gracias Ilde.

Me siento afortunada y agradecida de haber podido participar y colaborar en las campañas de sondeos, en congresos y diversos proyectos de investigación con el excelente grupo de personas e investigadores que forman el IPE-CSIC, así como investigadores colaboradores de otros centros. Una gran atmósfera de trabajo y compañerismo. Lo que he aprendido a su lado está más allá de lo que podría haber imaginado. Gracias!!!  
Gracias Mayte por tu colaboración y ayuda en esta investigación.

Grateful acknowledgment is made to D. Schnurremberger, A. Norens and M. Shapley from the Limnological Research Center (LRC, University of Minnesota) for the 2004 Sanabria coring expedition.

A todos los participantes de las campañas de sondeo en Sanabria, gracias!!  
*De aquellos barro... esta Tesis.*

A Meggie, Felix y Raquel, por vuestra acogida durante estos años en el Laboratorio de Isótopos Estables-USAL y colaboración en los análisis.

A los miembros del Dpto. de Geología de la USAL por su interés en este trabajo y las facilidades técnicas aportadas para su desarrollo.

A special thanks is also due to Dr. Dirk Sachse for hosting me and supervising me at the Potsdam University in Germany and introducing me into the world of molecular biogeochemistry. I am very grateful for the opportunity to have met him and to have worked closely with him and his group, offering me complete freedom to use the lab. and its analytical facilities. Above all, I will never forget the 2-day group retreat in Falkensee. I would like also to thank the members of the *Palaeohydrology* group for their great hospitality during my two research stays in Potsdam.  
I would also like to give special thanks to Marlene. I am very happy that I got to meet her. I cannot forget your help and support. Thanks for sharing with me such a good time in Potsdam and Berlin.  
Gracias Carnala!

Estoy muy agradecida al Dr. Roberto Bao por darme la oportunidad de realizar una estancia de investigación en el laboratorio del Departamento de Ciencias de la Tierra (Facultad de Ciencias, Universidad da Coruña). El agradecimiento se hace extensivo al Dr. Armand Hernández, quien con su amabilidad y disposición me mostró las técnicas de preparación de muestras de sedimento para el estudio de isótopos estables en diatomeas, y su gran ayuda en el transcurso de mi tesis. Gracias a todo el equipo por vuestra buena acogida, por hacer más amenas las largas jornadas de trabajo en el lab., y compartir conmigo vuestro tiempo de ocio (Coruña, Santiago, Órdenes, Teo, Refugio de Verdes...; gracias Tania, Armand, Rafa).

A Jesús Palacios Albertí, director del Parque Natural del Lago de Sanabria y Alrededores, por permitir llevar a cabo las actividades de muestreo en el Lago y el apoyo logístico, así como facilitar los datos limnológicos.

A José Carlos Verga (Laboratorio Limnológico del Parque Natural del Lago de Sanabria) por darme todas las facilidades técnicas, tu disponibilidad y ayuda a lo largo de estos dos años de muestreo en las aguas del Lago de Sanabria - ¡de la tranquilidad en los meses de frío al bullicio en la época estival! - . Gracias por compartir tus conocimientos sobre el Lago de Sanabria y las clases de navegación.

Quedo muy agradecida a todos los investigadores que han colaborado en la elaboración de las publicaciones relacionadas con esta tesis: Mayte Rico y Ana Moreno (IPE-CSIC), Manel Leira (Universidade de Lisboa), Patricia Bernárdez (Universidad de Vigo), Ricardo Prego (IIM-CSIC), Dirk Sachse (University of Potsdam, GFZ-German Research Centre for Geosciences), José Carlos Vega (Laboratorio Limnológico del Parque Natural del Lago de Sanabria) y Armand Hernández (Universidade de Lisboa). Vuestra gran experiencia y diferentes puntos de vista han enriquecido este trabajo.

A mis amigos, Ade, Fany, Esther, Fran, Tania, Cris, Ana. Gracias por el apoyo demostrado durante estos años.

A Manolo y Mari, por compartir conmigo numerosas salidas al campo para *oxigenarme* y disfrutar de la mineralogía.

A mi familia, por animarme a seguir adelante sin rendirme.

A mi prima Carmen. Gracias por tus consejos y tus alentadoras palabras de ánimo.

A mis padres Alfonso y Fonsí, y a mi hermana Rut, por estar siempre a mi lado y ser mi apoyo en los momentos difíciles, por escucharme siempre y aconsejarme, por vuestra confianza y palabras de ánimo, por la compañía y ayuda durante las numerosas 'excursiones' al Lago. Gracias por inculcarme la constancia, la responsabilidad, el coraje, el gusto por el trabajo bien hecho.

Muchas gracias!!

## RESUMEN

La presente Tesis Doctoral pretende contribuir, por una parte, a resolver la dinámica de la deglaciación y el clima del Holoceno en el noroeste de la Península Ibérica, con un nuevo conjunto de registros sedimentarios del Lago de Sanabria que abarcan los últimos 26.000 años, abordando así, la creciente necesidad de estudios multi-indicador de alta resolución en regiones sensibles a los cambios climáticos en Europa, y por otra, avanzar en la monitorización de variables físicas, químicas (elemental e isótopo estables) y biológicas del Lago, para poder calibrar la variabilidad limnológica reciente con registros instrumentales, definir los estadios de referencia y las líneas de base para el manejo y la restauración de este sistema, y poder aplicar este conocimiento en las reconstrucciones paleolimnológicas y paleoclimáticas.

El estudio multi-indicador de la secuencia sedimentaria del Lago de Sanabria incluye paleoindicadores geológicos (estratigrafía y sedimentología), geoquímicos elementales (TOC, TN, C/N, BioSi, concentración de elementos mayoritarios) e isotópicos ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}}$ ), magnéticos (susceptibilidad magnética) y biológicos (diatomeas, compuestos orgánicos específicos - biomarcadores) así como un buen modelo de edad basado en 14 dataciones radiocarbónicas y en métodos radiométricos ( $^{137}\text{Cs}$  y  $^{210}\text{Pb}$ ) para los sedimentos más recientes.

Con anterioridad a los 26.000 años se desarrolló un lago proglacial, lo cual indica que el comienzo de la deglaciación ocurrió antes del Último Máximo Glacial Global, de manera similar a otros glaciares alpinos en las montañas del Sur de Europa. Los sedimentos proglaciales datados entre 26 y 14,6 ka muestran la inestabilidad del frente del glaciar durante el LGM. Durante el interstadial GI-1 (Bølling–Allerød) se establece una tendencia hacia condiciones más cálidas. Esta etapa glacio (14,6-13,9 ka) – lacustre (13,9-13,0 ka) contrasta con la tendencia hacia condiciones más frías registrada en los sondeos de hielo de Groenlandia. Durante los últimos 14.000 años se han registrado cambios en la cantidad y composición de la materia orgánica sedimentaria acumulada, como respuesta, por una parte, a los cambios en la vegetación de la cuenca, y por otra, a la descarga de sedimento. La flora de diatomeas ha variado en respuesta a los cambios climáticos; las variaciones de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}}$  reflejan principalmente fluctuaciones en la precipitación. El comienzo del GS-1 (Drías Reciente) está marcado por un reavance glaciar de poca entidad (13,0 ka); entre los 12,4-11,7 ka un aumento de bioproductividad refleja un nuevo dominio de la dinámica lacustre. El Holoceno temprano (11,7-6,8 ka) representa el establecimiento definitivo de los procesos lacustres. Condiciones de mayor humedad son registradas entre los 10,1-8,2 ka por la elevada descarga de sedimentos por el río Tera. Con posterioridad a los 8,2 ka, el Holoceno presenta una tendencia decreciente en la humedad, especialmente pronunciada durante el

Holoceno medio (6,8-4,8 ka). Dicha tendencia, durante el Holoceno final, es interrumpida por intervalos más húmedos entre los 4,8 y 3,3 ka, y durante algunas fases de La Pequeña Edad del Hielo (AD 1670-1760). El Lago de Sanabria ha sido oligotrófico, con baja productividad orgánica, durante todo el Holoceno. Durante los últimos 2.000 años el impacto humano es un factor importante en la dinámica lacustre. La evolución reciente ha permitido diferenciar un horizonte clave depositado por la rotura de la Presa de Vega de Tera en el año 1959 y un aumento de la bioproductividad en las últimas décadas.

El estudio detallado de la secuencia sedimentaria del Lago de Sanabria, y su comparación con otros registros locales, regionales y marinos de la Península Ibérica, y lacustres del Mediterráneo Occidental, han permitido la identificación de capas clásticas durante el Holoceno (10.1, 8.4, 7.5, 6.2, 5.7-5.6, 4.6, 4.2, 3.7, 3.3, 3.1, 2.7, 2.5, 2.0 ka), asociadas a grandes eventos de inundaciones del río Tera. Su sincronidad con otros eventos fríos y húmedos, descritos en el Atlántico y en el Mediterráneo Occidental, demuestra el fuerte control del clima en el NO ibérico por la dinámica del Atlántico Norte a escala de centenas y miles de años. Los datos demuestran una relación directa entre la variabilidad de la Oscilación del Atlántico Norte y la frecuencia de fases húmedas. Así, se han identificado las principales fases de humedad durante el Holoceno 10,1-8,2 y 4,8-3,3 ka, y la LIA (AD 1670-1760) asociadas a fases de la NAO con un índice negativo.

El estudio limnológico incluye el muestreo sistemático de la composición isotópica (isótopos estables) en muestras de agua ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  en la precipitación,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$  en el río Tera y Lago de Sanabria) y vegetación ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ) durante dos ciclos anules (2009-11), combinada con la monitorización de parámetros limnológicos (físicos y químicos).

La variabilidad de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  en el agua del Lago están fuertemente relacionadas con las descargas del río Tera y las precipitaciones; reflejando la composición isotópica media mensual de la precipitación. La variabilidad de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  y  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$  en el lago se encuentran condicionadas por las fluctuaciones de descarga del río Tera, régimen de precipitaciones y la productividad primaria.

La conexión entre paleolimnología y neolimnología ha permitido conocer los cambios medioambientales naturales (escala de miles de años) y los relacionados con la actividad humana (los más recientes, escala de decenas y centenas de años), y establecer las condiciones de referencia para un número amplio de indicadores, con gran aplicación en el contexto de la gestión actual del ecosistema, para conocer la dinámica natural y el desarrollo de problemas medioambientales.

**Palabras clave:** paleolimnología, geoquímica, biomarcadores lipídicos, isótopos estables, diatomeas



## ABSTRACT

This PhD Thesis is a contribution to solving the timing and dynamics of deglaciation and Holocene in NW Iberia, with a new set of cores, from Sanabria Lake (in the North West of Spain) spanning the last 26 ka, and aims to address the increasing need for high-resolution proxy studies of sensitive climate regions in Europe. This approach also extends over the instrumental record with the monitoring of physical, chemical (elemental and stable isotopes) and biological properties in the Lake in order to calibrate the contemporary limnological variability and to define base-lines for restoration and management of this system, and to apply this knowledge to paleolimnological and paleoclimatic reconstructions.

The multiproxy study of sediment cores recovered in Sanabria Lake includes geological (stratigraphy and sedimentology), elemental (TOC, TN, C/N, BioSi, concentration of major elements) and stable isotopic geochemistry ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}}$ ), magnetic (magnetic susceptibility) and biological (diatoms, specific organic components – biomarkers) proxies, as well as a robust age model based on 14 AMS radiocarbon date and  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  radiometric techniques for the most recent sediments.

The development of a proglacial lake before 26 cal ka BP clearly demonstrates the onset of deglaciation before the global Last Glacial Maximum, similarly to other alpine glaciers in southern European mountains. Proglacial sediments (26-14.6 ka) demonstrate the instability of the glacier front during the LGM. The warming trend along GI-1 (Bølling–Allerød) interpreted in the Sanabria sequence as a glacio (14.6-13.9 ka) - lacustrine (13.9-13.0 ka) stage, contrasts with the cooling trend documented in Greenland ice cores. Changes in the amount and composition of OM accumulated over the last 14000 years were driven by variable inputs from terrestrial upland plant sources in response to changes in watershed vegetation and sediment delivery. Diatom flora have been constantly changing following variations in climate; variability  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}}$  records changes in precipitation. A minor glacier readvance phase occurred at the onset of GS-1 (Younger Dryas) (13.0 ka); increased productivity was recorded between 12.4 and 11.7 ka and is interpreted as dominant in-lake processes and a completely deglaciated catchment. The Early Holocene sediments underline the definitive change in Sanabria lake dynamics towards lacustrine processes. Higher river discharge (10.1-8.2 ka) is recorded by several events of higher sediment input into the lake. After 8.2 ka, the Holocene is characterized by a general decreasing trend in humidity, punctuated by the driest phase during the Mid Holocene (ca 6.8-4.8 ka), a wetter interval between 4.8 and 3.3 ka BP and a relative decline of rainfall since then till the

present with a minor increase in humidity during some phases (AD 1670-1760) of the Little Ice Age. Sanabria Lake was an oligotrophic system (low planktonic productivity) during the Holocene. Human impact has become a significant factor over Lake dynamics during the last 2000 years. The most recent sediments show significant changes in the Lake's dynamics with the sedimentation of a clastic horizon associated to the breach of the Vega de Tera Dam in AD 1959 and an increase in bioproductivity from the 1990's.

Discrete silt layers during the Holocene sedimentation reflect large flooding events of the Tera River (10.1, 8.4, 7.5, 6.2, 5.7-5.6, 4.6, 4.2, 3.7, 3.3, 3.1, 2.7, 2.5, 2.0 ka). Their synchronicity with a number of cold and humid events described in the Atlantic and Western Mediterranean records demonstrates a strong control of NW Iberian climate by North Atlantic dynamics at centennial-millennial scale. The findings indicate that significant environmental variability in the Holocene is coincident NAO mode-like climate forcing. Negative NAO mode-like (humid phases) would have prevailed during the Holocene (10.1-8.2 and 4.8-3.3 ka) and some phases of the LIA).

The limnological study combines a stable isotope approach on modern isotopic composition of precipitation ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ), lake and river waters ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ ) and dominant catchment vegetation ( $\delta^{13}\text{C}$ ) during two annual cycles (2009-11), with the monitoring of limnological properties (physical and chemical).

Lake water  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  fluctuations are strongly linked to the Tera River discharges, and follow the monthly mean isotopic composition of precipitation. The Sanabria Lake  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  dynamics depend on river discharge and direct precipitation fluctuations and primary productivity.

Linking neolimnology with paleolimnology has permitted the study of natural (millennia) and recent (decades to centuries) human-induced environmental changes, and the establishment of reference conditions for a number of proxies which can be applied in the context of the modern ecosystem management, in order to understand the natural dynamics and the development of environmental problems.

**Key words:** paleolimnology, geochemistry, lipid biomarkers, stable isotopes, diatoms

# ÍNDICE

<b>1. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción y objetivos.....	3
1.2. Estructura de la Tesis.....	6
1.3. Referencias bibliográficas.....	7
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
2.1. Limnología y paleolimnología.....	11
2.2. Biomarcadores como indicadores paleolimnológicos.....	12
2.2.1. <i>n</i> -Alcanos (hidrocarburos alifáticos).....	13
2.2.2. <i>n</i> -Alcoholes (alcoholes grasos).....	17
2.2.3. <i>n</i> -Ácidos alcanoicos (ácidos grasos).....	19
2.2.4. Triterpenoides y esteroides.....	21
2.3. Isótopos estables como herramienta en el estudio de los ciclos biogeoquímicos y las variaciones paleohidrológicas.....	23
2.3.1. Aplicaciones de los isótopos estables en limnología.....	25
2.3.2. Aplicaciones de los isótopos estables en paleolimnología.....	27
2.3.3. Isótopos estables de carbono.....	28
2.3.4. Isótopos estables de oxígeno e hidrógeno en muestras de agua (precipitación y aguas superficiales)....	32
2.3.5. Isótopos estables de oxígeno en sílice biogénica: frústulos de diatomeas.....	36
2.4. El clima en el noroeste de la Península Ibérica desde la deglaciación hasta la actualidad: estado de la cuestión.....	39
2.4.1. Último Máximo Glacial ( <i>Last Glacial Maximum</i> ).....	41
2.4.2. Bølling–Allerød ( <i>Interstadial GI-1</i> ) (14,6-12,8 ka cal BP).....	44
2.4.3. Dryas reciente ( <i>Younger Dryas</i> ) (12.8-11.6, <i>GS-1</i> ).....	45
2.4.4. El Holoceno.....	46
2.4.5. Holoceno temprano ( <i>Early Holocene</i> ) (11,7-8,2 ka cal. BP).....	49
2.4.6. Holoceno medio ( <i>Mid Holocene</i> ) (8,2-4,6 ka cal. BP).....	48
2.4.7. Holoceno tardío ( <i>Late Holocene</i> ) (4,6 ka cal. BP - 1850 AD).....	50
2.4.8. Antropoceno (1850 AD -actualidad).....	53
2.5. Referencias bibliográficas.....	56
Sección 2.1.....	56
Sección 2.2.....	56
Sección 2.3.....	60
Sección 2.4.....	65

<b>3. ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>71</b>
<hr/>	
3.1. Localización geográfica.....	73
3.2. Contexto hidrológico.....	74
3.3. Geología y tectónica.....	75
3.3.1. Contexto geológico.....	75
3.3.2. Tectónica.....	75
3.3.3. Rocas plutónicas y migmatitas.....	77
3.4. Geomorfología.....	77
3.5. Clima.....	81
3.5.1. Contexto climático.....	81
3.5.2. La Oscilación del Atlántico Norte (North Atlantic Oscillation –NAO).....	83
3.6. Edafología.....	85
3.7. Vegetación.....	86
3.8. Limnología.....	88
3.8.1. Factores físico-químicos.....	88
3.8.1.1. <i>Comportamiento térmico</i> .....	88
3.8.1.2. <i>Tiempo de residencia del agua</i> .....	89
3.8.1.3. <i>Conductividad</i> .....	89
3.8.1.4. <i>pH y alcalinidad</i> .....	90
3.8.1.5. <i>Transparencia del agua</i> .....	91
3.8.1.6. <i>Oxígeno disuelto</i> .....	91
3.8.1.7. <i>Fosfatos</i> .....	92
3.8.1.8. <i>Nitratos</i> .....	93
3.8.1.9. <i>Relación N/P y C/N</i> .....	93
3.8.1.10. <i>Sílice</i> .....	93
3.8.2. Factores bióticos.....	94
3.8.2.1. <i>Fitoplancton</i> .....	94
3.8.2.2. <i>Zooplancton</i> .....	97
3.9. Referencias bibliográficas.....	98
<b>4. METODOLOGÍA</b>	<b>101</b>
<hr/>	
4.1. Estudio de los testigos de sedimento del Lago de Sanabria desde la deglaciación hasta la actualidad.....	103
4.1.1. Campañas de muestreo: Selección de puntos de muestreo y recuperación de los sondeos.....	105
4.1.1.1. <i>Sondeador Kullenberg en plataforma flotante</i> .....	106
4.1.1.2. <i>Sondeador Uwitec® para sondeos cortos</i> .....	107
4.1.2. Análisis de las propiedades físicas.....	109
4.1.3. Análisis sedimentológicos.....	110
4.1.4. Muestreo.....	110
4.1.5. Cronología.....	111

4.1.5.1. <i>Datación con Radiocarbono (<sup>14</sup>C)</i> .....	111
4.1.5.2. <i>Datación mediante <sup>210</sup>Pb</i> .....	113
4.1.5.3. <i>Datación mediante <sup>137</sup>Cs</i> .....	114
4.1.6. <i>Análisis granulométricos</i> .....	114
4.1.7. <i>Análisis geoquímicos</i> .....	115
4.1.7.1. <i>Geoquímica elemental inorgánica: Fluorescencia de Rayos X (X Ray Fluorescence-XRF)</i> .....	115
4.1.7.2. <i>Geoquímica elemental orgánica: TOC, TN, C/N</i> .....	116
4.1.7.3. <i>Geoquímica elemental: Sílice biogénica (Biogenic Silica-BioSi)</i> .....	117
4.1.7.4. <i>Geoquímica isotópica: <math>\delta^{13}\text{C}</math> en materia orgánica sedimentaria (<math>\delta^{13}\text{C}_{org}</math>)</i> .....	119
4.1.7.5. <i>Geoquímica isotópica: <math>\delta^{18}\text{O}</math> en esqueletos de diatomeas</i> .....	120
4.1.8. <i>Análisis biológicos</i> .....	123
4.1.8.1. <i>Compuestos orgánicos específicos. Biomarcadores</i> .....	123
4.1.8.2. <i>Diatomeas</i> .....	126
4.2. <i>Estudio de los ciclos geoquímicos isotópicos en el sistema actual del Lago de Sanabria</i> .....	127
4.2.1. <i>Selección de puntos de muestreo y recogida de muestras</i> .....	128
4.2.2. <i>Medidas <i>in situ</i></i> .....	130
4.2.3. <i>Análisis de parámetros limnológicos en muestras de agua</i> .....	131
4.2.4. <i>Análisis de isótopos estables</i> .....	132
4.2.4.1. <i><math>\delta^{13}\text{C}</math> en materia orgánica particulada (<math>\delta^{13}\text{C}_{POM}</math>)</i> .....	132
4.2.4.2. <i><math>\delta^{13}\text{C}</math> en muestras vegetales actuales (<math>\delta^{13}\text{C}_{org}</math>)</i> .....	133
4.2.4.3. <i><math>\delta^{18}\text{O}</math> y <math>\delta\text{D}</math> en muestras de agua</i> .....	133
4.2.4.4. <i><math>\delta^{18}\text{O}</math> en esqueletos de diatomeas actuales</i> .....	134
4.2.4.5. <i><math>\delta^{13}\text{C}</math> en el carbono inorgánico disuelto (<math>\delta^{13}\text{C}_{DIC}</math>)</i> .....	135
4.2.5. <i>Biológicos</i> .....	136
4.2.5.1. <i>Biomarcadores en plantas actuales</i> .....	136
4.2.6. <i>Referencias bibliográficas</i> .....	138
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>141</b>
5.1 <i>Artículo 1: Timing of deglaciation and postglacial environmental dynamics in NW Iberia: the Sanabria Lake record</i> .....	144
5.1. <i>Paper 1: Timing of deglaciation and postglacial environmental dynamics in NW Iberia: the Sanabria Lake record</i> .....	146
5.1.1. <i>Abstract</i> .....	146
5.1.2. <i>Introduction</i> .....	147
5.1.3. <i>Site description</i> .....	149
5.1.4. <i>Methods</i> .....	152
5.1.5. <i>Results</i> .....	156
5.1.5.1. <i>Chronology</i> .....	156
5.1.5.2. <i>Sedimentary facies</i> .....	158
5.1.5.3. <i>The Sedimentary sequence</i> .....	162
5.1.5.4. <i>Diatoms</i> .....	164
5.1.6. <i>Discussion</i> .....	167
5.1.6.1. <i>An early onset of deglaciation: a proglacial stage (25.6-14.6 cal ka BP)</i> .....	168
5.1.6.2. <i>The GI-1 interstadial (Bølling-Allerød): a glacio-lacustrine stage (14.6-13.0 cal ka BP)</i> .....	170

5.1.6.3. <i>A glacier reactivation at 13.0 cal ka BP (GS-1 / Younger Dryas-YD)</i> .....	172
5.1.6.4. <i>The onset of the Holocene (11.7-10.1 cal ka BP)</i> .....	175
5.1.6.5. <i>The Early Holocene (10.1-6.8 cal ka BP)</i> .....	176
5.1.6.6. <i>The Mid Holocene (6.8–4.8 cal ka BP)</i> .....	178
5.1.6.7. <i>The Late Holocene (4.8–1.5 cal ka BP)</i> .....	179
5.1.6.8. <i>The last 1.5 cal ka BP</i> .....	181
5.1.7. Conclusions.....	184
5.1.8. Acknowledgements.....	186
5.1.9. References.....	187
5.2. Artículo 2: A 26 ka biomarker-based reconstruction of climate and environmental variability in NW Iberian Peninsula: the Sanabria Lake sequence.....	197
5.2. Paper 2: A 26 ka biomarker-based reconstruction of climate and environmental variability in NW Iberian Peninsula: the Sanabria Lake sequence.....	199
5.2.1. Abstract.....	199
5.2.2. Introduction.....	200
5.2.3. Site description.....	201
5.2.4. Materials and methods.....	203
5.2.4.1. <i>Modern vegetation sampling</i> .....	203
5.2.4.2. <i>The Sanabria Lake sequence</i> .....	203
5.2.4.3. <i>Lipid extraction</i> .....	204
5.2.5. Results.....	205
5.2.5.1. <i>Modern vegetation</i> .....	205
5.2.5.2. <i>The Sanabria sequence</i> .....	206
- <i>n-alkane distribution and concentration un lake sediments</i> .....	206
- <i>n-alkanols</i> .....	208
- <i>n-alkanoic acids</i> .....	208
- <i>Triterpenoids: higher plants biomarkers</i> .....	209
5.2.6. Discussion.....	209
5.2.6.1. <i>n-alkane, alkanol and alkanoic acid concentration and distribution of modern vegetation</i> .....	209
5.2.6.2. <i>Biomarkers in Sanabria Lake sequence: Watershed and Lake evolution since deglaciation</i> .....	211
- <i>The GS-2 (Last Glacial Maximum and Late glacial, 25.6-14.6 cal ka BP)</i> .....	214
- <i>The GI- 1 interstadial (Bolling – Allerød, 14.6-13.0 cal ka BP)</i> .....	214
- <i>GS-1 / Younger Dryas-YD (13.0-11.7 cal ka BP)</i> .....	216
- <i>The Early Holocene (11.7-7.5 cal ka BP)</i> .....	217
- <i>Mid Holocene (7.5-3.7 cal ka BP)</i> .....	218
- <i>The Late Holocene (3.7 – 1.0 cal ka BP)</i> .....	219
- <i>The Little Ice Age and the Recent Changes (AD 1520–2004)</i> .....	220
5.2.6.3. <i>Implications for the paleoenvironmental history of Sanabria Lake</i> .....	221
5.2.7. Conclusions.....	222
5.2.8. Acknowledgements.....	223
5.2.9. References.....	224
5.2.10. Supplementary data.....	227
5.3. Artículo 3: Annual isotopic signatures in an oligotrophic, hydrologically-open mountain lake (Lago de Sanabria, NW Iberian Peninsula): recent trends and climate-human activities synergies.....	234

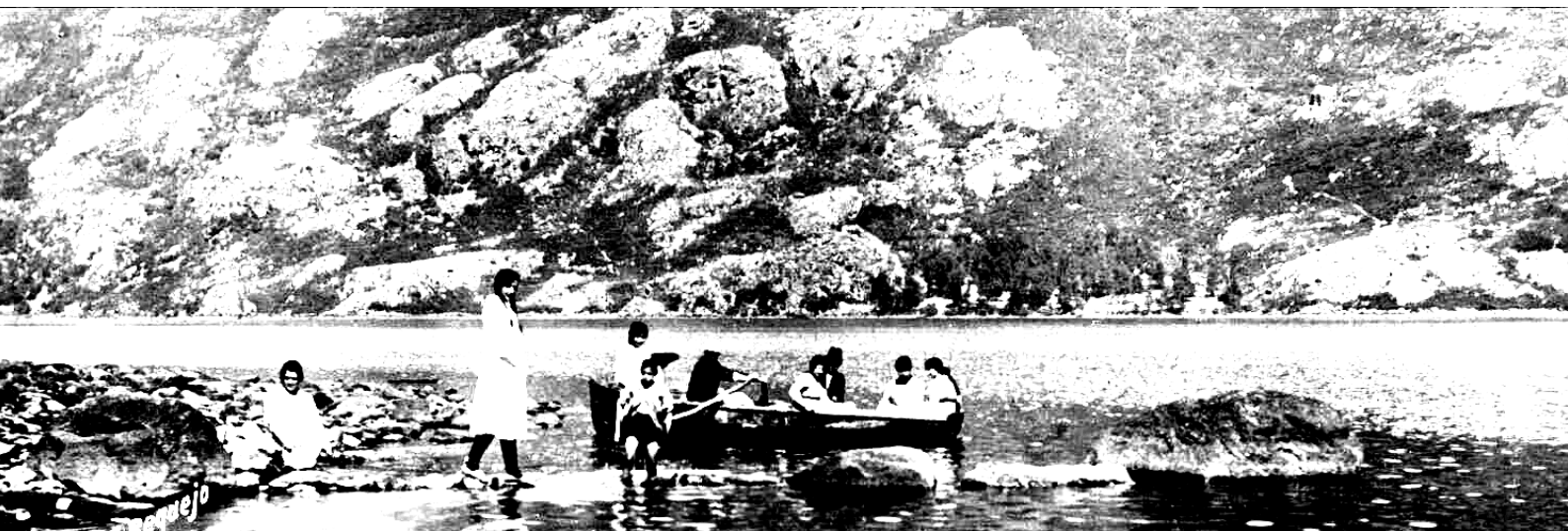
5.3. Paper 3: Annual isotopic signatures in an oligotrophic, hydrologically-open mountain lake (Lago de Sanabria, NW Iberian Peninsula): recent trends and climate-human activities synergies.....	236
5.3.1. Abstract.....	236
5.3.2. Introduction.....	236
5.3.3. Site description.....	238
5.3.4. Methods.....	239
5.3.4.1. <i>Physical and chemical limnological properties</i> .....	239
5.3.4.2. <i>Climate variables</i> .....	240
5.3.4.3. <i>Stable isotopes</i> .....	240
5.3.5. Results.....	242
5.3.5.1. <i>Physical and chemical variables</i> .....	242
5.3.5.2. <i>Water oxygen and hydrogen isotope composition</i> .....	245
- <i>Precipitation</i> .....	245
- <i>Tera River</i> .....	246
- <i>Sanabria Lake</i> .....	248
5.3.5.3 <i>Carbon isotopes</i> .....	248
- <i>C isotopes of particulate organic matter (<math>\delta^{13}C_{POM}</math>)</i> .....	249
- <i>C isotopes of dissolved inorganic carbon (<math>\delta^{13}C_{DIC}</math>)</i> .....	249
5.3.6. Discussion.....	256
5.3.6.1. <i>Hydrological change</i> .....	251
5.3.6.2. <i>Thermal stratification, bioproductivity and water column hydrochemistry</i> .....	255
5.3.6.3 <i>The carbon isotope cycle in Sanabria Lake: river input versus phytoplanktonic productivity</i> .....	257
- <i>The Tera River input</i> .....	258
- <i>Phytoplankton productivity</i> .....	260
5.3.7. Conclusions.....	262
5.3.8. Acknowledgments.....	263
5.3.9. References.....	264
5.3.10. Supplementary data.....	267
5.4 Artículo 4: The palaeohydrological evolution of Sanabria Lake during the Late Glacial and Holocene based on oxygen isotopes in diatom silica.....	277
5.4 Paper 4: The palaeohydrological evolution of Sanabria Lake during the Late Glacial and Holocene based on oxygen isotopes in diatom silica.....	279
5.4.1. Abstract.....	279
5.4.2. Introduction.....	280
5.4.3. Site description.....	281
5.4.3.1. <i>Location and setting</i> .....	281
5.4.3.2. <i>Climate</i> .....	283
5.4.3.3. <i>Limnology</i> .....	283
5.4.3.4. <i>Sedimentary record</i> .....	284
5.4.4. Methods.....	285
5.4.4.1. <i>Sampling site</i> .....	285
5.4.4.2. <i>Diatom extraction: sampling and chemical treatment</i> .....	285
5.4.4.3. <i>Oxygen isotope analysis of diatoms</i> .....	287
5.4.5. Results.....	289

5.4.5.1. Contamination measurements: Mass balance correction and light microscopy study.....	289
5.4.5.2. Diatom stratigraphy.....	292
5.4.5.3. Oxygen isotopes from fossil and modern diatoms.....	293
5.4.6. Discussion.....	295
5.4.6.1. $\delta^{18}\text{O}$ from modern diatoms.....	295
5.4.6.2. $\delta^{18}\text{O}$ from fossil diatoms.....	299
5.4.6.3. Paleoenvironmental reconstruction.....	300
- Deglaciation.....	300
- From the Holocene onset to the Early Holocene (11.7 – 8.2 cal ka BP).....	302
- Mid Holocene stability (8.2 – 4.8 cal ka BP).....	303
- Late Holocene variability.....	304
5.4.7. Conclusions .....	307
5.4.8. Acknowledgements.....	305
5.4.9. References.....	308
<b>6. SYNTHESIS OF THE PROJECT</b>	<b>315</b>
<hr/>	
6.1. General discussion.....	317
6.1.1. An early onset of deglaciation: a proglacial stage (25.6-14.6 cal ka BP).....	318
6.1.2. The GI-1 interstadial (Bølling – Allerød): a glacio-lacustrine stage (14.6-13.0 cal ka BP).....	319
6.1.3. GS-1 (Younger Dryas-YD) (13.0-11.7 cal ka BP).....	320
6.1.4. Early Holocene (11.7-6.8 cal ka BP).....	321
6.1.5. The Mid Holocene (6.8 – 4.8 cal ka BP).....	323
6.1.6. The Late Holocene (4.8 – 1.5 cal ka BP).....	324
6.1.7. The last millennium.....	326
6.1.8. The Little Ice Age (LIA).....	327
6.1.9. The “Anthropocene” (climate change versus human impact).....	327
6.1.9.1. Since the LIA to recent times.....	327
6.1.9.2. Recent Changes in geochemical cycles in Sanabria Lake.....	328
6.2. Conclusions.....	329
6.3. Further work.....	333
6.4. References.....	335



## CAPÍTULO 1.

### *OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS*





# 1. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

## 1.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Diversos estudios del clima pasado de la Península Ibérica han evidenciado su carácter sensible a la variabilidad climática global a diferentes escalas de tiempo, mostrando, además, una respuesta variada temporal y espacialmente a lo largo de la península. Aunque los patrones temporales y regionales, así como los mecanismos subyacentes de esta variabilidad siguen sin estar claros, la dinámica climática del Atlántico Norte y las sinergias entre fluctuaciones de la criosfera, hidrosfera y atmósfera apuntan a ser son los principales mecanismos que han condicionado el clima en la Península Ibérica desde el último periodo glacial (Cacho et al., 2010).

En el sector noroccidental de la península, tanto registros marinos (por ejemplo, de Abreu et al., 2003; Bernárdez et al., 2008; Muñoz Sobrino et al., 2012) como registros terrestres (Muñoz Sobrino et al., 2013), han puesto de manifiesto ese fuerte control del clima por parte de la dinámica del Atlántico Norte y han demostrado la presencia de cambios bruscos coherentes con los registros de Groenlandia (Lowe et al., 2008). Sin embargo, el conocimiento de la dinámica de la deglaciación y el clima del Holoceno en el noroeste de Iberia, y la correlación con la variabilidad climática global, aún es incompleto, en su mayoría, debido a la ausencia de una buena resolución y un adecuado control cronológico. Es por ello que se requieren nuevos registros bien datados y de alta resolución en regiones clave, ubicadas en zonas sensibles a los cambios climáticos, que permitan realizar un completo análisis de carácter *multiproxy* (o multi-indicador). Con ellos, será posible conocer el desarrollo y alcance de los cambios climáticos abruptos y las peculiaridades de la última deglaciación y el Holoceno en latitudes meridionales como la Península Ibérica y resolver los vínculos entre la dinámica climática de regiones en latitudes medias y septentrionales.

El Lago de Sanabria (NO España) (Fig. 1.1) es precisamente uno de esos sitios clave para el desarrollo de reconstrucciones paleoclimáticas debido a su ubicación en una zona de transición entre dos regiones bioclimáticas, la Atlántica y la Mediterránea (Luque, 2003; Rivas-Martínez et al., 2003; Muñoz Sobrino et al., 2004), la fuerte influencia de la dinámica del Atlántico Norte en el clima actual (Trigo et al., 2004, Hernández et al., 2015), la rápida respuesta de algunas propiedades limnológicas al clima (de Hoyos 1996; de Hoyos et al., 1998; de Hoyos y Comín, 1999; Giralt et al., 2011), y la respuesta geoquímica del sistema lacustre a las oscilaciones climáticas e impacto humano durante los últimos milenios (Luque, 2003; Julià y Luque, 2006; Julià et al., 2007).

Esta Tesis Doctoral pretende, por una parte, i) contribuir a resolver la dinámica de la deglaciación y el Holoceno en el noroeste de Iberia, con un nuevo conjunto de registros sedimentarios del Lago de Sanabria que abarcan los últimos 26.000 años, y por otra, ii) avanzar en la monitorización de variables físicas, químicas y biológicas del lago, para poder calibrar la variabilidad limnológica reciente con registros instrumentales (meteorológicos, hidrológicos) y poder aplicar este conocimiento a reconstrucciones paleolimnológicas y paleoclimáticas.

Para alcanzar el primer objetivo fundamental se siguen metodologías paleolimnológicas esencialmente sedimentológica y de geoquímica inorgánica y orgánica, tanto elemental como isotópica, para el estudio de testigos largos de sedimento que incluyen el intervalo temporal desde la deglaciación hasta el último milenio y de sondeos cortos (testigos de sedimento de 65 cm de longitud) que permiten evaluar los procesos recientes. En ambos casos, se utilizan numerosos paleoindicadores (geológicos y biológicos) junto con un buen modelo cronológico ( $^{14}\text{C}$  y  $^{210}\text{Pb}$ ).

Los objetivos específicos son:

- Reconstruir la variabilidad climática, en detalle, desde la última deglaciación y durante el Holoceno con una resolución temporal centenaria o decadal (Artículos 1, 2, 4).
- Comprobar hipótesis previas como la presencia de ciclos de Bond o el impacto de la Oscilación del Atlántico Norte-NAO en la precipitación del pasado en el NO peninsular (Artículo 1).
- Determinar la existencia de sincronidad o no entre las principales fases climáticas reconstruidas en la secuencia de Sanabria y los sondeos de hielo de Groenlandia, así como en otras secuencias marinas y terrestres del sector occidental de Europa (Artículo 1).
- Descifrar la secuencia de los eventos climáticos, ambientales e hidrológicos rápidos desde la deglaciación (Artículos 1, 2, 4).
- Entender el ciclo de la materia orgánica (origen, productividad en el lago, aportes de la cuenca, preservación) y su relación con los cambios climáticos y de usos del suelo (Artículo 2).
- Investigar los cambios paleohidrológicos a escala de decenas y centenas de años a partir de las variaciones de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}}$  (Artículo 4).

El segundo objetivo fundamental se centra en el estudio detallado de los ciclos geoquímicos isotópicos en el sistema actual del Lago de Sanabria y la monitorización de varios parámetros durante dos ciclos anuales (2009-2011) con el fin de evaluar el estado ecológico y la dinámica del lago.

Los objetivos específicos son:

- Caracterizar los ciclos biogeoquímicos (ciclo del carbono y del agua) y sus variaciones estacionales mediante el análisis isotópico en muestras de vegetación, materia orgánica particulada y carbono inorgánico disuelto ( $^{13}\text{C}$ ) y muestras de agua ( $^{18}\text{O}$  y D) en el río Tera y Lago de Sanabria, combinado con los parámetros limnológicos (físicos y químicos) (Artículo 3).
- Evaluar la relación entre la precipitación, la escorrentía y la entrada de materia orgánica particulada, con el fin de entender la dinámica del lago y su respuesta a las actividades humanas recientes (Artículo 3).

El estudio integrado de las condiciones ambientales del pasado y de los procesos actuales en el Lago de Sanabria, nos permitirá conocer mejor y comprender los efectos del cambio climático actual y discernirlos de los producidos por la actividad humana, así como definir los estadios de referencia y las líneas de base para el manejo y la restauración de este sistema.



**Figura 1.1.** Panorámica del Lago de Sanabria (NO España). Es el lago de origen glaciar más grande de la Península Ibérica (longitud máxima de 3,16 km, anchura máxima de 1,53 km, volumen de 96 Hm<sup>3</sup>, Vega et al., 2005).

## 1.2. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta Tesis está organizada en seis capítulos. El capítulo 1 recoge la motivación de esta investigación y presenta los objetivos marcados. El capítulo 2 proporciona una introducción de los aspectos generales de la limnología y paleolimnología, con especial detalle en el uso de indicadores paleoambientales (biomarcadores e isótopos estables), además de una revisión de la evolución del clima en el NO de la Península Ibérica desde la deglaciación. La caracterización de la zona de estudio, la cual cubre aspectos geológicos, climáticos, biológicos y limnológicos está detallada en el capítulo 3. La metodología empleada en el estudio paleo y neo-limnológico está recogida en el capítulo 4. Los resultados de esta Tesis se presentan organizados en cuatro secciones dedicadas a una determinada disciplina (capítulo 5) y que tienen el formato de un artículo al haber sido enviados a revistas científicas para su publicación. La primera sección recoge los resultados obtenidos de la metodología multi-indicador (sedimentología, propiedades físicas, geoquímica elemental e isotópica, diatomeas); la segunda se centra en el uso de biomarcadores como herramienta paleoambiental; la tercera presenta el estudio limnológico a partir de análisis isotópicos y datos de monitorización, y la cuarta está dedicado al análisis de  $^{18}\text{O}$  en frústulos de diatomeas del registro fósil y actuales. Cada uno de los artículos contiene una introducción, metodología, resultados, discusión y conclusiones escritas en Inglés, e incluye un resumen en Español. Los anteriores capítulos (capítulos 1, 2, 3 y 4) presentan detalladamente la introducción, descripción del lugar y la metodología empleada en Español. En la síntesis de este trabajo (capítulo 6), escrita en Inglés, se exponen de una manera integrada un resumen de los principales resultados, las conclusiones generales y las nuevas perspectivas de trabajo.

### 1.3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernárdez, P., González-Álvarez, R., Francés, G., Prego, R., Bárcena, M.A., Romero, O.E., 2008. Late Holocene history of the rainfall in the NW Iberian peninsula—Evidence from a marine record. *J. Marine Syst.* 72, 366–382.
- Cacho I., Valero Garcés B. y González Sampérez P., 2010. Revisión de las reconstrucciones paleoclimáticas en la Península Ibérica desde el último periodo glacial. En: Pérez F. Fiz y Boscolo Roberta (eds.), *Clima en España: pasado, presente y futuro*, pp. 9-24.
- de Abreu, L., Shackleton, N.J., Schönfeld, J., Hall, M.A., Chapman, M.R., 2003. Millennial-scale oceanic climate variability off the Western Iberian margin during the last two glacial periods. *Mar. Geol.* 196 (1-2), 1-20.
- de Hoyos, C., 1996. *Limnología del Lago de Sanabria: variabilidad interanual del fitoplankton*. PhD Thesis, Univ. Salamanca, Spain.
- de Hoyos, C., Aldasoro, J.J., Toro, M., Comín, F.A., 1998. Specific composition and ecology of chrysophyte flagellates in Lake Sanabria (NW Spain). *Hydrobiologia* 369/370, 287-295.
- de Hoyos, C., Comín, F.A., 1999. The importance of inter-annual variability for management. *Hydrobiologia* 395/396, 281-291.
- Giralt, S., Rico-Herrero, M.T., Vega, J.C., Valero-Garcés, B.L., 2011. Quantitative climate reconstruction linking meteorological, limnological and XRF core scanner datasets: the Lake Sanabria case study, NW Spain. *J. Paleolimnol.* 46(3), 487-502.
- Hernández, A., Trigo, R.M., Pla-Rabes, S., Valero-Garcés, V.L., Jerez, S., Rico-Herrero, M., Vega, J.C., Jambrina-Enríquez, M., Giralt, S., 2015. Sensitivity of two Iberian lakes to North Atlantic atmospheric circulation modes. *Climate Dynamics* DOI 10.1007/s00382-015-2547-8
- Julià, R., Luque, J.A., 2006. Climatic changes vs. catastrophic events in lacustrine systems: a geochemical approach. *Quat. Int.* 158, 162-171
- Julià, R., Luque, J.A., Riera, S., Alejandro, J.A., 2007. Climatic and land use changes on the NW of Iberian Peninsula recorded in a 1,500-year record from Lake Sanabria. *Contrib. Sci.* 3 (3), 355-369.
- Lowe, J.J., Rasmussen, S.O., Björck, S., Hoek, W.Z., Steffensen, J.P., Walker, M.J.C., Yu, Z.C., 2008. Synchronisation of palaeoenvironmental events in the North Atlantic region during the Last Termination: a revised protocol recommended by the INTIMATE group. *Quat. Sci. Rev.* 27 (1–2), 6–17.
- Luque, J.A., 2003. *El Lago de Sanabria: un sensor de las oscilaciones climáticas del Atlántico Norte durante los últimos 6000 años*. PhD Thesis, Univ. Barcelona, Spain.
- Muñoz Sobrino, C., Ramil-Rego, P., Gómez-Orellana, L., 2004. Vegetation of the Lago de Sanabria área (NW Iberia) since the end of the Pleistocene: a palaeological reconstruction on the basis of two new pollen sequences. *Veg. Hist. Archaeobot.* 13, 1-22.
- Muñoz Sobrino, C., García-Gil, S., Iglesias, J., Martínez Carreño, N., Ferreiro da Costa, J., Díaz Varela, R.A., Judd, A., 2012. Environmental change in the Ría de Vigo, NW Iberia, since the mid-Holocene: new palaeoecological and seismic evidence. *Boreas* 41, 578–601.
- Muñoz Sobrino, C., Heiri, O., Hazekamp, M., van der Velden, D., Kirilova, E.P., García-Moreiras, I., Lotter, A.F., 2013. New data on the Lateglacial period of SW Europe: a high resolution multiproxy record from Laguna de la Roya (NW Iberia). *Quat. Sci. Rev.* 80, 58-77.
- Rivas-Martinez, S., Penas, A., Luengo, M.A., Rivas-Saenz, S., 2003. Worldwide bioclimatic classification system. In: Lieth, H. (Ed.). *Cimate and Biosphere*, CD series. [www.globalbioclimatics.org](http://www.globalbioclimatics.org)
- Trigo, R.M., Pozo-Vázquez, D., Osborne, T., Castro-Díez, Y., Gómiz-Fortis, S., Esteban-Parra, M.J., 2004. North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.* 24, 925–944
- Vega, J.C., de Hoyos, C., Aldasoro, J.J., de Miguel, J., Fraile, H., 2005. Nuevos datos morfométricos para el Lago de Sanabria. *Limnética* 24(1-2), 115-122.





## CHAPTER 5.

### *RESULTS*





## 5. RESULTADOS

En este capítulo, se recogen los resultados obtenidos en el desarrollo de esta Tesis Doctoral, organizados en cuatro secciones dedicadas a una determinada disciplina, estableciendo un orden lógico en el estudio paleo y neo-limnológico del Lago de Sanabria, y que tienen el formato de un artículo al haber sido enviados a revistas científicas para su publicación.

La primera sección (artículo), *Timing of deglaciation and postglacial environmental dynamics in NW Iberia: The Sanabria Lake record*, publicado en la revista *Quaternary Science Reviews* (índice de impacto: 4.571), está basado en una metodología “*multiproxy*” o multindicador, integrando la descripción de las facies y diversos paleoindicadores geoquímicos (elemental e isotópico) junto con un buen modelo cronológico creado a partir de dataciones de  $^{14}\text{C}$  y  $^{210}\text{Pb}$ . Además, este trabajo incluye una primera aproximación del estudio taxonómico y ecológico de las diatomeas del registro fósil.

La segunda sección, *A 26 ka biomarker-based reconstruction of climate and environmental variability in NW Iberian Peninsula: The Sanabria Lake sequence*, artículo aceptado en la revista *Journal of Paleolimnology* (índice de impacto: 2.139), recoge el novedoso estudio de biomarcadores en la materia orgánica sedimentaria en el registro lacustre y en muestras actuales de vegetación, basado en la identificación y cuantificación de *n*-alcanos, *n*-alcanoles, *n*-ácidos alcanoicos y componentes específicos (esteroles, triterpenoides).

La sección tercera, *Annual isotopic signatures in an oligotrophic, hydrologically-open mountain lake (Lago de Sanabria, NW Iberian Peninsula): recent trends and climate-human activities synergies* (artículo enviado a *Science of the Total Environment*), se centra en el estudio neo-limnológico del Lago de Sanabria durante dos ciclos anuales (2009-2011), combinando el análisis de parámetros físico-químicos e isótopos ambientales ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) en diferentes componentes (vegetación, materia orgánica particulada, agua).

La sección cuarta incluye el artículo *The palaeohydrological evolution of Sanabria Lake during the Late Glacial and Holocene based on oxygen isotopes in diatom silica* (en preparación), presenta los resultados obtenidos a partir de la determinación de  $\delta^{18}\text{O}$  en frústulos de diatomeas del registro fósil y actuales, combinado con el estudio ecológico de las diatomeas y otros indicadores paleoambientales presentados en previos artículos.

## 5.1 Artículo 1: TIMING OF DEGLACIATION AND POSTGLACIAL ENVIRONMENTAL DYNAMICS IN NW IBERIA: THE SANABRIA LAKE RECORD

*\*basado en el artículo publicado en Quaternary Science Reviews 94: 136-158.*

*doi:10.1016/j.quascirev.2014.04.018*

*Margarita Jambrina-Enríquez, Mayte Rico, Ana Moreno, Manel Leira, Patricia Bernárdez, Ricardo Prego, Clemente Recio, Blas L. Valero-Garcés.*

Los objetivos de este trabajo fueron reconstruir la variabilidad climática en detalle desde la última deglaciación y su evolución más reciente; comprobar hipótesis previas (ciclos de Bond, impacto de la Oscilación del Atlántico Norte-NAO en la precipitación), y descifrar la secuencia de los eventos climáticos, ambientales e hidrológicos de los últimos milenios. Para ello, se realizó un estudio *multiproxy*, combinando análisis sedimentológicos (identificación de facies, granulometría) y de las propiedades físicas del sedimento (susceptibilidad magnética, luminiscencia), geoquímicos (Flourescencia de Rayos X, Carbono y Nitrógeno elemental,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ , Sílice Biogénica) y biológicos (identificación y cuantificación de diatomeas) en dos sondeos obtenidos en la cubeta más profunda del Lago de Sanabria (cubeta oriental:  $Z_{\text{max}}=51$  m): 1) SAN04-3A-1K, de 9 m de longitud que abarca los últimos 26.000 años y 2) SAN07-2M de 64 cm de longitud que recoge los últimos 1.500 años. La cronología se ha establecido a partir de dataciones mediante radiocarbono y  $^{210}\text{Pb}$ .

El trabajo de investigación mostró el desarrollo de un lago proglacial con anterioridad a los 26.000 años, lo cual indica que el comienzo de la deglaciación ocurrió antes del Último Máximo Glacial Global, de manera similar a otros glaciares alpinos en las montañas del Sur de Europa. El comienzo del Interestadial GI-1e (Bolling, 14,6 ka) estuvo caracterizado por una rápida deglaciación, la cual fue seguida por un breve episodio de reavance glacial entre 14,4 y 14,2 ka (GI-1d), y una nueva etapa de retirada del glacial de Tera de la cuenca del Lago de Sanabria a los 13,9 ka, relacionada con la mejora en las condiciones climáticas del GI-1c. Esta tendencia hacia condiciones más cálidas durante el GI-1, identificada en Sanabria y en otros registros de la península, contrasta con la tendencia hacia condiciones más frías documentada en los sondeos de hielo de Groenlandia, e ilustra el diferente comportamiento durante la deglaciación en latitudes altas e intermedias. Una nueva fase de reactivación glacial tuvo lugar entre los 13,0 y 12,4 ka, de manera sincrónica al comienzo del GS-1 (Drías Reciente). El comienzo del Holoceno (11,7-10,1 ka) fue seguido por un periodo de condiciones más húmedas (10,1-8,2 ka), caracterizado por la

elevada descarga de sedimentos por el río Tera. Con posterioridad a los 8,2 ka, el Holoceno presenta una tendencia decreciente en la humedad, especialmente pronunciada durante el Holoceno medio (6,8-4,8 ka). Dicha tendencia, durante el Holoceno final, es interrumpida por intervalos más húmedos entre los 4,8 y 3,3 ka, y durante algunas fases de La Pequeña Edad del Hielo (*Little Ice Age-LIA*) (AD 1670-1760). La evolución reciente del Lago de Sanabria ha permitido diferenciar un horizonte más arenoso, con una capa de 12 centímetros de espesor, depositada por la rotura de la Presa de Vega de Tera en el año 1.959.

El estudio detallado de la secuencia sedimentaria del Lago de Sanabria, y su comparación con otros registros locales, regionales y marinos de la Península Ibérica, y lacustres del Mediterráneo Occidental, han permitido la identificación de capas de limos intercaladas entre los depósitos con elevado contenido orgánico durante el Holoceno (10.1, 8.4, 7.5, 6.2, 5.7-5.6, 4.6, 4.2, 3.7, 3.3, 3.1, 2.7, 2.5, 2.0 ka), asociadas a grandes eventos de inundaciones del río Tera (el principal sistema hídrico de entrada y salida). Su sincronidad con otros eventos fríos y húmedos, descritos en el Atlántico y en el Mediterráneo Occidental, demuestra el fuerte control del clima en el NO ibérico por la dinámica del Atlántico Norte a escala de centenas y miles de años.

Los datos demuestran una relación directa entre la variabilidad de la Oscilación del Atlántico Norte y la frecuencia de fases húmedas. Así, se han identificado las principales fases de humedad durante el Holoceno 10,1-8,2 y 4,8-3,3 cal ka BP, y la LIA (AD 1.670-1.760) asociadas a fases de la NAO con un índice negativo.

## **5.1. Paper 1: TIMING OF DEGLACIATION AND POSTGLACIAL ENVIRONMENTAL DYNAMICS IN NW IBERIA: THE SANABRIA LAKE RECORD**

*\*based on the paper published in Quaternary Science Reviews 94: 136-158.*

*doi:10.1016/j.quascirev.2014.04.018*

*Margarita Jambrina-Enríquez, Mayte Rico, Ana Moreno, Manel Leira, Patricia Bernárdez, Ricardo Prego, Clemente Recio, Blas L. Valero-Garcés.*

### **5.1.1. Abstract**

The multiproxy study (sedimentology, geochemistry and diatoms) of sediment cores from Sanabria Lake (42°07'30" N, 06°43'00" W, 1000 m a.s.l.) together with a robust <sup>14</sup>C chronology provides the first high-resolution and continuous sedimentary record in the region, extending back the last 26 ka. The development of a proglacial lake before 26 cal ka BP demonstrates the onset of deglaciation before the global Last Glacial Maximum, similarly to other alpine glaciers in southern European mountains. Rapid deglaciation occurred at the beginning of the Greenland Interstadial GI-1e (Bølling, 14.6 cal ka BP). Following a short-lived episode of glacier re-advance (14.4-14.2 cal ka BP, GI-1d), a climatic improvement at 13.9 cal ka BP suggests the glaciers retreated from the lake basin during the GI-1c. Another glacier reactivation phase occurred between ca 13.0-12.4 ka, starting earlier than the onset of GS-1 (Younger Dryas). Rapid deglaciation during the Early Holocene (11.7-10.1 cal ka BP) was followed by a period of higher river discharge (10.1-8.2 cal ka BP). After 8.2 ka, the Holocene is characterized by a general decreasing trend in humidity, punctuated by the driest phase during the Mid Holocene (ca 6.8-4.8), a wetter interval between 4.8 and 3.3 cal ka BP, and a relative decline of rainfall since then till present with a minor increase in humidity during some phases (ca 1670-1760) of the Little Ice Age.

Discrete silt layers intercalated in the organic-rich Holocene deposits reflect large flooding events of the Tera River (ca 10.1, 8.4, 7.5, 6.2, 5.7-5.6, 4.6, 4.2, 3.7, 3.3, 3.1, 2.7, 2.5 and 2.0 cal ka BP). Their synchronicity with a number of cold and humid events described in the Atlantic demonstrates a strong control of NW Iberian climate by North Atlantic dynamics at centennial-millennial scale. Comparison with Western Mediterranean records points to similar regional dynamics during the Holocene, although modulated in the NW Iberian Peninsula by the stronger Atlantic influence.



## 5.2. Artículo 2: A 26 KA BIOMARKER-BASED RECONSTRUCTION OF CLIMATE AND ENVIRONMENTAL VARIABILITY IN NW IBERIAN PENINSULA: THE SANABRIA LAKE SEQUENCE

*\*basado en el artículo aceptado en Journal of Paleolimnology.*

*Margarita Jambrina-Enríquez, Dirk Sachse, Blas L. Valero-Garcés.*

Dada la estrecha relación existente entre el régimen de precipitaciones, la dinámica del clima en el Atlántico y la bio-productividad en el Lago de Sanabria, uno de los principales objetivos se centra en afinar la reconstrucción paleambiental investigando el origen y producción de la materia orgánica, incluyendo la variabilidad climática y el impacto humano. Este trabajo ha permitido mejorar la reconstrucción de los cambios ambientales en el Lago y en su cuenca de drenaje, desde la deglaciación, utilizando como herramienta la identificación y cuantificación de biomarcadores (*n*-alcanos, *n*-alcanoles, *n*-ácidos alcanóicos) y componentes específicos (esteroles, triterpenoides) en la materia orgánica del sedimento y de muestras de plantas actuales. La variabilidad de biomarcadores (*CPI-carbon preference index*; *ACL-average carbon length*, *Paq-proportion of aquatic plants*), su integración con la sedimentología y la composición geoquímica de la secuencia del Lago de Sanabria (SAN04-3A-1K y SAN07-2M), y su comparación con la vegetación actual y los registros de polen han permitido diferenciar las distintas contribuciones de los aportes de materia orgánica.

Las variaciones en la distribución de *n*-alcanos y biomarcadores terrestres, en la secuencia del Lago de Sanabria están reguladas por un aporte variable de materia orgánica procedente de las plantas superiores, como respuesta a los cambios en la descarga de sedimento y en la vegetación de la cuenca de drenaje.

La composición lipídica (*n*-alcano, *n*-alcanol, *n*-ácido alcanóico) de los sedimentos lacustres indican una importante aportación alóctona al contenido de materia orgánica durante la historia del lago, coherente con un estado oligotrófico. Durante la etapa proglacial (26-14,7 ka cal BP) la cuenca de drenaje estaba cubierta de hielo y la sedimentación clástica en el lago presenta escaso contenido orgánico. La baja concentración de biomarcadores así como los valores próximos a 1 del parámetro CPI sugieren que los *n*-alcanos derivan de materia orgánica antigua con alto grado de madurez. Durante el tardiglacial (14,7 - 11,7 ka cal BP) y el Holoceno (últimos 11,7 ka BP) se registran intervalos con mayor concentración de biomarcadores (alcanos dominantes  $nC_{29}$ ,  $nC_{31}$ )



que corresponden a la sedimentación de limos ricos en materia orgánica. Estos intervalos se caracterizan por tener valores elevados de los parámetros CPI y ACL, y bajos del parámetro  $P_{aq}$ , todos ellos indicativos de una mayor contribución de las plantas terrestres vasculares, en una cuenca forestada, sugiriendo condiciones más cálidas (y húmedas). Los intervalos con menor concentración de biomarcadores ( $nC_{27}$ ) corresponden a limos pobres en materia orgánica, interpretados como depósitos de inundación. Durante el Holoceno medio (7,0-4,0 ka cal BP), se registran las concentraciones más elevadas de biomarcadores de toda la secuencia coincidiendo con el máximo desarrollo forestal regional; a partir de los 4 ka BP y durante la LIA (siglos XVII y XIX) se produce un descenso en la concentración de biomarcadores, coincidiendo con la disminución regional de los bosques. Las actividades humanas (deforestación, manejo de la cuenca) han sido importantes durante los últimos 3 milenios, pero la relación entre el registro de los biomarcadores y aporte de sedimentos no es siempre directa. Así la época romana se caracteriza por valores relativamente bajos de la descarga de sedimento pero una mayor concentración de biomarcadores que durante la Alta Edad Media, donde el aporte sedimentario elevado no va paralelo a los notables incrementos en la concentración de biomarcadores.

Contrariamente a los periodos anteriores del Holoceno con baja concentración de biomarcadores, dos períodos durante el último milenio (1,3-1,0 ka cal BP y AD 1960-1992), con una menor concentración de biomarcadores ( $\% nC_{23}$  y  $nC_{31}\%$ , respectivamente) y triterpenoides, son sincrónicos con etapas de alta bioproductividad en el Lago. Corresponden a la fundación de monasterios (siglo IX), y en las últimas décadas, a la recuperación del sistema tras la rotura de la presa de Vega de Tera en el año 1959.

El estudio demuestra que la composición lipídica de los sedimentos desde la deglaciación ha dependido esencialmente de los aportes alóctonos de materia orgánica, coherente con un estado oligotrófico y ha sido controlada por los cambios en la descarga de sedimento y en la vegetación de la cuenca de drenaje, y modulada por los cambios climáticos desde el tardiglacial y por las actividades humanas durante los últimos 3000 años.

## 5.2. Paper 2: A 26 KA BIOMARKER-BASED RECONSTRUCTION OF CLIMATE AND ENVIRONMENTAL VARIABILITY IN NW IBERIAN PENINSULA: THE SANABRIA LAKE SEQUENCE

*\* based on the paper accepted in Journal of Paleolimnology.*

*Margarita Jambrina-Enríquez, Dirk Sachse, Blas L. Valero-Garcés.*

### 5.2.1. Abstract

Biomarker analyses in a  $^{14}\text{C}$  and  $^{210}\text{Pb}$ - $^{137}\text{Cs}$  dated sediment sequence from Sanabria Lake (NW Spain) and in recent aquatic and terrestrial vegetation allowed a reconstruction of past environmental changes in the lake and the watershed for the last 26 ka. The lipid composition ( $n$ -alkanes,  $n$ -alkanols,  $n$ -alkanoic acids) of lake sediments indicates a major allochthonous contribution to the organic matter budget during the lake history, coherent with its oligotrophic status. During the proglacial stage (26-14.7 cal ka BP), as the watershed was ice-covered and the lake bioproductivity was very low, clastic sediments had a very low organic concentration. The low biomarker concentration and CPI values  $\sim 1$  suggest that the  $n$ -alkanes derived from older organic matter with high degree of maturity. During the Late glacial (14.7 – 11.7 cal ka BP) and the Holocene (last 11.7 cal ka BP) intervals with higher biomarker concentrations of  $n\text{C}_{29}$ ,  $n\text{C}_{31}$  alkanes correspond to organic oozes and organic-rich silty layers. They  $n$ -alkane distributions are characterized by high CPI and ACL, and low  $P_{\text{aq}}$ , and are indicative of major contribution of vascular land plants from a forested watershed, suggestive of warmer and wetter conditions. Intervals with lower biomarker concentrations dominated by  $n\text{C}_{27}$  correspond to organic-poor silts, interpreted as flood layers. During the Mid Holocene (7.0 – 4.0 cal ka BP), maximum regional forest development is marked by high biomarkers concentrations; regional forest decline after 4 ka BP and during the LIA (17<sup>th</sup>-19<sup>th</sup> centuries) is consistent with lower biomarker concentration. Human activities have become significant during the last 3 millennia, and their impact on the biomarker record shows large variability: decreased (increased) sediment delivery and higher (lower) biomarker concentration during Roman (Early Medieval) times underlines a stronger deforestation and watershed management during Medieval times. Unlike previous lower biomarker Holocene intervals, two periods during the last millennium (1.3-1.0 cal ka BP and AD 1960-1992) with lower biomarker ( $\%n\text{C}_{23}$  and  $\%n\text{C}_{31}$ , respectively) and triterpenoid concentrations are synchronous with higher bioproductivity stages in the lake. They correspond

to the foundation of monasteries (9<sup>th</sup> century AD) and the three decades after the Tera River dam collapse in AD 1959. The lipid composition of Sanabria sequence is coherent with an oligotrophic lake status and responds mainly to climate variability via rainfall, runoff and watershed vegetation since deglaciation, modulated by human impact during the last 3000 years.



### **5.3. Artículo 3. ANNUAL ISOTOPIC SIGNATURES IN AN OLIGOTROPHIC, HYDROLOGICALLY-OPEN MOUNTAIN LAKE (LAGO DE SANABRIA, NW IBERIAN PENINSULA): RECENT TRENDS AND CLIMATE-HUMAN ACTIVITIES SYNERGIES**

*\*basado en el artículo enviado a Science of the Total Environment*

*Margarita Jambrina-Enríquez, Clemente Recio, José Carlos Vega, Blas L. Valero-Garcés.*

Este trabajo presenta el primer estudio sistemático y detallado de la composición isotópica (isótopos estables) en muestras de agua y vegetación del Lago de Sanabria y su cuenca. Se evalúa su estado ecológico y la dinámica lacustre a través de una detallada caracterización isotópica del ciclo hidrológico ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  en la precipitación y muestras de agua del río Tera y Lago de Sanabria) y del ciclo biogeoquímico del carbono ( $\delta^{13}\text{C}$  en la materia orgánica particulada, carbono inorgánico disuelto y en la vegetación), combinada con la monitorización de parámetros limnológicos (físicos y químicos) durante dos ciclos anuales (2009-2011).

Los principales objetivos de este estudio son: 1) investigar las variaciones estacionales de los isótopos de O e H en el Lago de Sanabria, río Tera y la precipitación local durante los ciclos anuales, relevante para conocer la relación hidrológica y ecológica del sistema, y comprobar las diferencias entre los períodos de mezcla y estratificación; 2) comprobar las variaciones estacionales de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$  y distribución  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  durante un período anual para entender el ciclo del carbono en un lago oligotrófico y los cambios en la composición isotópica del C inducidos por las actividades humanas recientes; 3) evaluar la relación entre la precipitación y la escorrentía y el aporte de materia orgánica particulada y su reflejo en  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$  como indicador de la contribución de materia autóctona y alóctona. Para ello, se seleccionaron cuatro puntos de muestreo situados aguas arriba de Ribadelago, en Ribadelago Nuevo, y otros dos en las zonas más profundas de la cubeta occidental ( $Z_{\text{max}}=45$  m) y oriental ( $Z_{\text{max}}=51$ m), de los que se tomaron muestras de agua a diferentes profundidades. Las muestras de agua de precipitación se recogieron de un pluviómetro localizado en la orilla sur del Lago.

El Lago de Sanabria es un lago oligotrófico y monomítico, hidrológicamente abierto, con un tiempo de residencia corto ( $< 1$  año), fuertemente regulado por el caudal del río Tera y el régimen de precipitaciones. Sólo durante el verano, cuando las precipitaciones son menores, o ausentes, cobran importancia los aportes producidos por el sistema de presas.

Durante el periodo 2009-2011 se han observado importantes variaciones en los parámetros limnológicos e isotópicos a escala estacional y en la columna de agua. La mezcla invernal tiene lugar entre los meses de noviembre y marzo, con una temperatura constante y buena oxigenación en la columna de agua. Durante el periodo de estratificación térmica (abril - octubre) se desarrolla un gradiente térmico (termoclina a 10 m de profundidad) y el pH y clorofila-*a* aumentan en el epilimnion debido a la fotosíntesis. Aunque el Lago de Sanabria es un área protegida, existen algunas fuentes puntuales de contaminantes. El aumento de aportes de la cuenca durante la estación de lluvias (invierno) y el aumento de población durante el verano incrementan la descarga al lago de nutrientes y materia orgánica con el consiguiente impacto en el ciclo del carbono. Sin embargo, tanto las mediciones de la transparencia del agua (disco de Secchi) como las concentraciones de clorofila-*a* y fósforo, no ha detectado eutrofización.

La precipitación en el area de Sanabria define una línea de agua meteórica local (LMWL)  $\delta D = 8.32 \delta^{18}O + 12.91$ , muy próxima a la línea de agua meteórica global (GMWL). Las fluctuaciones isotópicas en el agua del lago están fuertemente relacionadas con las descargas del río Tera y las precipitaciones, reflejando la composición isotópica media mensual de la precipitación. Los cambios en la composición isotópica de la precipitación en el área de Sanabria se explican por el efecto combinado entre el origen de la humedad, la variabilidad de la temperatura y la dinámica general del clima en el Atlántico, en particular de la Oscilación del Atlántico Norte. Los perfiles de profundidad de  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  muestran una estratificación en el epilimnion durante el verano y el comienzo del otoño.

La variabilidad de  $\delta^{13}C_{POM}$  y  $\delta^{13}C_{DIC}$  en el Lago de Sanabria refleja fundamentalmente la dinámica de los aportes de materia orgánica alóctona por el río Tera durante eventos de mayor precipitación y escorrentía, y cambios menores en productividad primaria. Solamente durante el verano, cuando la productividad primaria y el aporte de nutrientes son altos, y la descarga del río limitada, una mayor proporción de la materia orgánica particulada podría ser de origen autóctono, siendo esta parcialmente atribuida al impacto humano estacional en la cuenca.

### **5.3. Paper 3. ANNUAL ISOTOPIC SIGNATURES IN AN OLIGOTROPHIC, HYDROLOGICALLY-OPEN MOUNTAIN LAKE (LAGO DE SANABRIA, NW IBERIAN PENINSULA): RECENT TRENDS AND CLIMATE-HUMAN ACTIVITIES SYNERGIES**

*\*based on the paper submitted to Science of the Total Environment*

*Margarita Jambrina-Enríquez, Clemente Recio, José Carlos Vega, Blas L. Valero-Garcés.*

#### **5.3.1. Abstract**

Mountain lakes are sensitive y to increasing human activities as their oligotrophic conditions may be rapidly altered. Sanabria Lake, the largest lake of glacial origin in the Iberian Peninsula provides an opportunity to identify recent trends in an oligotrophic, hydrologically-open mountain lake, and their relationship with climate and hydrological variability, traditional land uses in the watershed, and increasing tourism. We conducted a monitoring survey during two consecutive annual cycles (2009-2011) including  $\delta^{13}\text{C}$  analyses of particulate organic matter-POM and dissolved inorganic carbon-DIC,  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  of precipitation, river and lake waters, together with physical and chemical analyses (pH, temperature, dissolved oxygen, conductivity, chlorophyll-*a*, nitrates, phosphorus, silica) of lake waters to investigate seasonal fluctuation of carbon, oxygen and deuterium signatures.

Lake water  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  fluctuations are strongly linked to the Tera River discharges, and follow the monthly mean isotopic composition of precipitation.  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  in Tera River and Sanabria Lake revealed a higher contribution of allochthonous organic matter in winter and spring due to higher river inflow and lower primary productivity in the lake. Increased phytoplankton biomass in late summer correlated significantly with higher pH and Chl-*a*, and higher nutrient input; this is partially attributed to seasonal human impact. However, no eutrophication trend has been detected during the survey. The small  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$  seasonal amplitude underlines the stability of the oligotrophic conditions of Sanabria Lake and the isotopic variation in POM and DIC reflect small seasonal fluctuations mostly as a consequence of the Tera River dynamics.





#### 5.4 Artículo 4: THE PALAEOHYDROLOGICAL EVOLUTION OF SANABRIA LAKE DURING THE LATE GLACIAL AND HOLOCENE BASED ON OXYGEN ISOTOPES IN DIATOM SILICA

*\*en preparación*

En este estudio, basado en el sondeo SAN04-3A-1K, se investigan las relaciones entre los cambios paleohidrológicos y las variaciones de  $\delta^{18}\text{O}$  en las diatomeas durante el Tardiglacial y el Holoceno (14.000-810 años BP). Aunque son varios los factores que controlan los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  de las diatomeas, existen un consenso de que reflejan esencialmente los valores isotópicos del agua de lago (Leng y Barker, 2006). Dada la existencia de numerosos indicadores obtenidos para la secuencia de Sanabria en trabajos anteriores (Jambrina-Enríquez et al., 2014), los datos isotópicos ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}}$ ) son comparados con indicadores que reflejan los aportes alóctonos al sistema lacustre (susceptibilidad magnética, luminosidad), el contenido de materia orgánica (carbono orgánico total, sílice biogénico), y con las asociaciones de diatomeas. Además, se dispone de datos isotópicos de oxígeno del agua de precipitación y del Lago y de sílice biogénica de diatomeas actuales.

Los análisis isotópicos en las muestras de agua del Lago muestran un mínimo efecto de la evaporación, y una fuerte relación entre la composición isotópica de sus aguas y la precipitación. Dado que el Lago de Sanabria es hidrológicamente abierto, con tiempo de residencia corto, y cuya dinámica y sedimentación están fuertemente ligadas a los aportes del río Tera y la precipitación directa, la variabilidad en  $\delta^{18}\text{O}$  en las diatomeas fósiles es interpretada en términos de cambios en las precipitaciones en lugar de la temperatura. Los resultados de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}}$  (modernas y fósiles) muestran la ausencia de efectos importantes entre las especies.

Entre 14,0 y 12,4 ka cal BP, los valores bajos de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}}$  (promedio 17,0 ‰) son consistentes con un entorno glacio-lacustre, y el aporte de agua de fusión del glaciar del Tera. El aumento de la productividad, reflejado en el contenido de materia orgánica y sílice biogénica (*Aulacoseira subborealis* 80%), coincide con un cambio hacia valores altos de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}}$  (promedio 22,2 ‰), corroborando un cambio en las condiciones ambientales durante la transición YD/Holoceno, en consonancia con un ambiente lacustre menos influido por la dinámica glaciaria. El Holoceno se caracteriza por grandes fluctuaciones entre las asociaciones de diatomeas planctónicas y tictoplanctónicas, y por un rango de valores  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}}$ , entre 15 – 23 ‰, asociados a variaciones en el régimen de precipitación y escorrentía. Intervalos con valores

menores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}}$  se interpretan como periodos más húmedos con mayor precipitación invernal, mientras que aquellos con valores más elevados se interpretan como periodos relativamente más secos, con menor precipitación invernal y mayor evaporación durante el verano. En torno a los 10,2 ka un breve episodio de descenso de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}}$  (promedio 17,1 ‰) sugiere cambios en la hidrología del Lago (periodo húmedo) al comienzo del Holoceno. Entre los 8,2 y 4,8 ka (Holoceno temprano y medio), los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}}$  son relativamente altos y constantes (promedio 19,3 ‰), y sugieren un intervalo prolongado de condiciones hidrológicamente estables. El Holoceno tardío comienza con un pequeño descenso en los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}}$  entre los 4,8 y 4,0 ka (promedio 18,2 ‰) reflejando condiciones de mayor humedad, seguido por una tendencia continuada hacia valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}}$  más altos. Durante el Holoceno tardío destacan dos intervalos con los valores más elevados de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}}$ . El primero ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}} \sim 22,9$  ‰) entre los 3,7 y 3,2 ka, coincide con el cambio más significativo en las comunidades de diatomeas (*Tabellaria flocculosa var linearis* 60%; los taxones planctónicos están en gran medida ausentes) y el segundo ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}} \sim 20,6$  ‰) con el comienzo del periodo cálido Medieval (900-1300 AD). Durante la Alta Edad Media (500-900 AD) se registraron valores bajos de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}}$  (promedio 17,2 ‰).

A lo largo del Holoceno, aparecen varias excursiones hacia valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomeas}}$  más ligeros, aproximadamente a 10.1, 8.4, 6.7, 5.8, 4.3, 3.0, 2.7, 2.5-2.4, 1.6 cal ka BP, que han sido atribuidos a episodios de inundación del río Tera. Estos eventos son sincrónicos con una serie de eventos fríos y húmedos descritos en el NO de la Península Ibérica, y que muestran el fuerte control de la dinámica del Atlántico sobre el clima regional.

## 5.4 Paper 4: THE PALAEOHYDROLOGICAL EVOLUTION OF SANABRIA LAKE DURING THE LATE GLACIAL AND HOLOCENE BASED ON OXYGEN ISOTOPES IN DIATOM SILICA

*\*in preparation*

### 5.4.1. Abstract

Lateglacial and Holocene climate variability was reconstructed in the Sanabria Lake (NW Iberian Peninsula) sediment record spanning the last ca 14,000 years from using the oxygen isotope composition of diatom silica ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}}$ ) and sedimentary proxies. The modern lake hydrology is controlled by river input and precipitation variability, and, consequently, the variability in smoothed- $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}}$  has been interpreted in terms of changes in  $\delta^{18}\text{O}_{\text{lakewater}}$  due to precipitation (amount and source) rather than temperature.

Low oxygen isotope values (average 17.0 ‰) occurred during the lateglacial until 12.4 cal ka BP, and are interpreted as input of glacier meltwater and a reflection of  $^{18}\text{O}$  depleted precipitation during glacial times. A sharp increase (average 22.2 ‰) occurred at 12.4 cal ka BP coinciding with the expansion of *Aulacoseira subborealis* (ca 80% of the assemblage) and the onset of warmer conditions at the end of the Younger Dryas.

The Holocene period is characterized by major fluctuations between planktonic and tychoplanktonic diatom assemblages and  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}}$  values between 15 and 23 ‰. During the Holocene, relatively humid periods are indicated by lower  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}}$  values whereas relatively dry episodes are marked by higher values. Between 10.2 and 8.2 ka, a brief, episodic decreases in  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}}$  (average 17.1 ‰) reflect a period of higher precipitation and runoff, followed by generally higher values during the Mid Holocene (8.2-4.8 ka;  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}} = 19.3$  ‰). Relatively lower  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}}$  values at the onset of Late Holocene (4.8-4.9 ka,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}} = 18.2$  ‰) were followed by an increasing trend with the highest values between 3.7 and 3.2 ka ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}} = 22.9$  ‰), coinciding with the most significant change in the diatom communities - *T. flocculosa* var. *linearis* 60% of the assemblage-, and at the onset of Medieval Climate Anomaly ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}} = 20.6$  ‰). Lower isotopic values were found during the Dark Ages ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}} = 17.2$  ‰).

Short-term excursions in the isotopic value found at 10.1, 8.4, 6.7, 5.8, 4.3, 3.0, 2.7, 2.5-2.4, 1.6 cal ka BP correlate with large flooding events of the Tera River. These events are synchronous

with a number of cold and humid events described in the NW Iberian Peninsula and likely demonstrate the influence of North Atlantic dynamic over NW Iberian climate.



CHAPTER 6.  
*SYNTHESIS OF THE PROJECT*





## 6.2. CONCLUSIONS

1.- The Sanabria Lake (SAN04-3A-1K) record provides the first high-resolution and continuous sedimentary record in the region, extending back the last 26 ka. This multiproxy study (sedimentology, inorganic and organic geochemistry, diatoms and biomarkers) demonstrates the response of the lake environment, in terms of changes in watershed hydrology, precipitation, temperature, meltwater influx, seasonal ice cover, runoff, allochthonous and autochthonous OM contribution and nutrient loading to climate variability since deglaciation and the anthropic influence during the last 4 millennia.

2.- The sediment record can be divided into three facies associations and nine facies which reflect different depositional environments (and processes).

- *Clastic association* (Proglacial lake): Facies A (meltwater fluxes), Facies B (strong meltwater fluxes/glacier advances).

- *Clastic – organic association* (Glacio-lacustrine): Facies C (glacier influence), Facies D (lacustrine influence), Facies E (glacier and lacustrine influences).

- *Organic (Distal lacustrine)*: Facies F (low fluvial input, organic deposition), Facies G (high fluvial input), Facies Ha (turbidite) and Facies Hb (anthropogenic flashflood).

3.- Several sedimentological (facies, lightness, magnetic susceptibility) and geochemical proxies (terrestrial-derived fractions, XRF data) are potential indexes of hydrological changes and fluvial input variability during the Holocene. There is a strong control of precipitation and river discharge over Lake dynamics and sedimentation, with periods of higher terrestrial (OM) contribution consistent with higher (lower) precipitation and runoff. Discrete silt layers intercalated in the organic-rich deposits reflect large flooding events of the Tera River (ca 10.1, 8.4, 7.5, 6.2, 5.7-5.6, 4.6, 4.2, 3.7, 3.3, 3.1, 2.7, 2.5 and 2.0 cal ka BP). The findings indicate that significant environmental variability in the Holocene is coincident with Bond Events. Nevertheless, flooding and other evidence of environmental and hydrological change occurred not only during these Bond events.

4.- The age model constrained by 13 <sup>14</sup>C (AMS) dates on terrestrial macro remains and bulk organic matter, have allowed a robust chronological control of the main climate and environmental events during the last 26,000 years, with higher uncertainties in the basal section. The age model for the short core SAN07-2M, based on <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs techniques, and one



radiocarbon date, allowed the reconstruction of the most recent changes in Sanabria Lake since ca AD 1500.

5.- The timing and dynamics of main climatic phases during the last deglaciation and the Holocene recorded in Sanabria sequence are in agreement with oscillations described in Greenland ice cores and in other marine and terrestrial Western European sequences. The development of a proglacial lake before 26 cal ka BP demonstrates the onset of deglaciation before the global Last Glacial Maximum, similarly to other alpine glaciers in southern European mountains. The Sanabria sequence illustrates a different behavior, as observed in Greenland ice cores during deglaciation (GI-1) and a small glacial advance at the end of GI-1 and onset GS-1 (ca 13.0 ka). Whereas the Greenland ice cores show evidences of a cooling trend along GI-1, the depositional and limnological dynamics of Sanabria Lake seem more coherent with a warming trend, which GI-1a is warmer than GI-1e. These asynchronous responses at the onset and termination of GI-1 have been recorded in western Mediterranean records. The causes of these different patterns is still no clear, although all hypotheses suggest a close link to the North Atlantic ocean, atmospheric circulation patterns, Scandinavian ice sheet retreat and sea ice cover.

The Tera glacier dynamic is complex with several glacier recessions and readvances during the Late Glacial period. Full deglaciation conditions occurred during the Bølling interstadial (ca 14 cal ka BP), as in other northern mountains of the Iberia Peninsula, but the Tera glacier activity continued closer to the headwall areas between 14 and 13 ka. Tera glacier became active at the onset of Younger Dryas period (GS-1) consistent with the results from the Pyrenees or in the Alps.

6.- The inferred climate and hydrological variability from Sanabria Lake is closely linked to North Atlantic ocean dynamics. Comparison with modern modes of climatic variability, in particularly the NAO, has been used to explain past climate variability. Periods of positive NAO mode-like (decrease winter precipitation) would have prevailed during the mid part of the Holocene (since 8.2, but particularly between 6.8 and 4.8 cal ka BP) and negative NAO mode-like (maximum winter precipitation) during the early part of the Holocene (10.1-8.2 cal ka BP) and some phases of the late Holocene (4.8-3.3 cal ka BP and LIA). Comparison with Western Mediterranean records points to similar regional dynamics during the Holocene, although modulated in the NW Iberian Peninsula by the stronger Atlantic influence.

7.- The organic proxies also document changes in lake/catchment productivity and vegetation cover. Sanabria Lake was an oligotrophic system during the Holocene (low planktonic productivity). Human impact has become a significant factor during the last 2 millennia. Changes in the amount and composition of OM accumulated in Sanabria Lake over the last

14000 years were driven by variable inputs from terrestrial upland plant sources in response to changes in sediment delivery, watershed vegetation and lake level fluctuations. Periods of low productivity and low vascular plant OM inputs (dilution by detrital materials eroded from the surroundings) are related to humid and cooler conditions; periods of high productivity (low allochthonous OM) are generally related to lake low-stands and warmer conditions and higher nutrient loading in recent times. Higher inputs from terrestrial upland plant sources show consistency with periods of a more forested watershed.

8.- Diatom analyses reveal that the diatom flora of Sanabria Lake has changed over the last 14,000 years following changes in climate. *Aulacoseira subborealis* dominates the diatom assemblages through most of the sediment record, while *Tabellaria flocculosa* fluctuates and peaks ca 3,500 yrs BP, reflecting natural variability (lowering water levels and/or warming states) more than anthropogenic impact. Over the past ca 50 years, the presence of *Cyclotella spp.* becomes increasingly abundant and it has been interpreted as increased human activity. The results from  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}}$  (modern and fossil) show the absence of significant species-effects, and support the variability in smoothed- $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}}$  in the Sanabria record in terms of changes in precipitation, similar to other hydrologically open lakes with short residence times and minimal evaporation. Changes of moisture origin and seasonality of the precipitation may be at least partly responsible for changes in the  $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatom}}$ .

9.-The comparison between paleo and neo-limnology highlights how the lake and watershed have responded to environmental and climatic perturbations in the past, and how they might respond to changes in the future:

- The  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  variability in lake water is strongly linked to Tera River discharges and follows the mean monthly isotopic composition of precipitation.
- Limnological parameters, together with the isotopic analysis in POM ( $\delta^{13}\text{C}$ ) underlines the oligotrophy of its water (low planktonic productivity and higher non-living OM input):
  - a) The Sanabria Lake  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  dynamics reflect substantial inputs of terrestrial detrital carbon from the Tera River during events of high precipitation and run-off. Only during summer, when in situ primary productivity is relatively higher and the river discharge and direct precipitation are lower, particulate material could originate from autochthonous primary production.

b) No eutrophication trend has been detected. Sanabria Lake water chemistry during the period 2009-2011 shows lower values of conductivity and nutrients (nitrate and total phosphorus) than the 1987-89 survey.



**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA**

**DEPARTAMENTO DE PROCESOS GEOAMBIENTALES  
Y CAMBIO GLOBAL  
INSTITUTO PIRENAICO DE ECOLOGIA**