

# EVALUACION Y SEGUIMIENTO DEL CAMBIO GLOBAL EN LA LAGUNA DE LA MOSCA (SIERRA NEVADA, GRANADA). INDICADORES BIOLÓGICOS

CARMEN PÉREZ-MARTÍNEZ<sup>1</sup>, POL TARRATS<sup>2</sup>, GONZALO JIMÉNEZ-MORENO<sup>3</sup>,  
NARCÍS PRAT<sup>4</sup>, MARÍA RIERADEVALL<sup>5\*</sup>

## RESUMEN

En este proyecto se analizan la comunidad actual de diatomeas y quironómidos así como la comunidad pasada de los últimos 4000 años mediante el registro sedimentario de La Mosca, una laguna somera situada en las altas cumbres de Sierra Nevada. Nuestro objetivo es la identificación de bioindicadores potencialmente útiles para los programas de evaluación y seguimiento del Cambio Global en estos sistemas lacustres, así como el análisis de los cambios ocurridos en el pasado como referencia para la evaluación de los posibles cambios futuros.

Los valores de las variables físico-químicas y biológicas analizadas de la laguna de la Mosca permiten caracterizarla como un sistema oligotrófico. En las muestras litorales domina la diatomea *A. minutissimum* y en las muestras del testigo sedimentario las pequeñas fragilariáceas. Las densidades de quironómidos son globalmente muy bajas, dominando en las muestras litorales *Corynoneura* sp. y en el bentos profundo *Micropsectra radialis*. *M. radialis* y *Pseudodiamesa nivosa* fueron las especies dominantes en las muestras del testigo sedimentario.

La laguna ha experimentado cambios apreciables en la composición de las diatomeas a lo largo del período de 4000 años estudiado, probablemente asociados a cambios climáticos, mientras que para los quironómidos la composición no ha variado sustancialmente aunque sí la densidad de individuos, observándose tanto en quironómidos como en diatomeas períodos de escasez de individuos que probablemente corresponden a momentos de intensos derrubios en la laguna o arrastre de hielo. En los últimos 200 años el principal cambio registrado parece estar asociado al calentamiento reciente.

La laguna de la Mosca, laguna remota oligotrófica en la alta montaña mediterránea más meridional de Europa, constituye un laboratorio natural para el estudio del Cambio Global y se propone como uno de los sistemas claves en los programas de seguimiento a realizar.

**Palabras clave:** Bioindicadores, diatomeas, quironómidos, Sierra Nevada, laguna alta montaña, sedimentos.

<sup>1</sup> Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada.

<sup>2</sup> Grupo de investigación F. E. M. (Freshwater Ecology and Management), Departament d'Ecologia, Universitat de Barcelona.

<sup>3</sup> Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada.

<sup>4</sup> Grupo de investigación F. E. M. (Freshwater Ecology and Management), Departament d'Ecologia, Universitat de Barcelona.

<sup>5</sup> Grupo de investigación F. E. M. (Freshwater Ecology and Management), Departament d'Ecologia, Universitat de Barcelona. \*Fallecida

# EVALUATION AND MONITORING OF GLOBAL CHANGE IN LA MOSCA LAGOON (SIERRA NEVADA, GRANADA): BIOLOGICAL INDICATORS

## ABSTRACT

In this project we analyze the current diatom and chironomid community of the lake La Mosca as well as the community of the past 4000 years by the sedimentary record of this lake. La Mosca is a shallow lake located in the high peaks of Sierra Nevada Mountains. Our goal is the identification of potentially useful bioindicators for monitoring and evaluation programs of Global Change in these lake system and the analysis of past changes as a reference for the assessment of possible changes in the future.

The values of the physico-chemical and biological variables analyzed in La Mosca indicate it is an oligotrophic system. *A. minutissimum* dominates the littoral diatom community whereas small fragilarioid species dominate in sediment samples covering past 4000 years. Chironomid densities are generally low, dominating *Corynoneura* sp. in littoral samples and *Micropsectra radialis* in the deep benthos. *M. radialis* and *Pseudodiamesa nivosa* dominate throughout past 4000 years.

The lake has undergone significant changes in the composition of diatoms over the past 4000 years studied probably associated with climate changes, while chironomids composition has not substantially changed although the density of individuals observed both in chironomids and diatom experience periods of shortage of individuals that probably correspond to moments of intense washouts or drag ice in the lake. In the last 200 years the most significant change appears to be associated with recent warming.

La Mosca Lake, an oligotrophic and remote lake in Europe's southernmost Mediterranean high mountain range, is a natural laboratory for the study of Global Change and is proposed as one of the key systems for monitoring programs.

**Keywords:** bioindicators, diatoms, chironomids, Sierra Nevada, high mountain lake, sediments.

## INTRODUCCIÓN

El proyecto CLAM (Evaluación y seguimiento del cambio global en tres lagos de alta montaña) ha planteado el estudio comparativo y complementario de tres lagos de alta montaña, Marboré, Enol y La Mosca, situados en tres Parques Nacionales (Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido-PNOMP, Parque Nacional de Picos de

Europa-PNPE y Paque Nacional de Sierra Nevada-PNSN, respectivamente), con el fin de realizar una evaluación y un seguimiento multidisciplinar de indicadores de Cambio Global (biológicos, físico-químicos y paleolimnológicos), siguiendo los protocolos LTER (Long Term Evolution Research). Se buscaba mejorar la información disponible ya que resultaba insuficiente en algunos aspectos y desigual entre cada lago,

además de contemplar tanto la caracterización de su funcionamiento actual como los cambios producidos en ellos durante los últimos 2000-3000 años. El proyecto CLAM, compuesto por dos subproyectos (CLAM-1 y CLAM-2), pretendía ofrecer a los gestores de los Parques una información lo más completa posible. CLAM-2 se centra en el estudio de la biodiversidad de varios grupos de indicadores biológicos seleccionados (diatomeas, cladóceros, quironómidos y polen), con el fin de facilitar el diseño de un programa adecuado para el seguimiento de la respuesta de la biota al Cambio Global, más allá de los actuales programas de calidad de agua. Los resultados de los lagos Enol y Marboré se presentan en otro trabajo de este mismo volumen (RIERADEVALL *et al.*, este volumen).

La Laguna de la Mosca es el lago seleccionado en Sierra Nevada dentro del proyecto CLAM-2 para realizar los estudios sobre indicadores biológicos del cambio global en el Parque Nacional de Sierra Nevada. Aunque inicialmente se había escogido la laguna de La Caldera, la imposibilidad de poder tomar un testigo de sedimento en la misma hizo necesario cambiar la localización del lugar de muestreo. La laguna de La Mosca cumple todas las condiciones iniciales que se impusieron a la hora de escoger los lagos de muestreo, es decir, que sea remota y que estuviera lo menos alterada posible para que los cambios que se puedan detectar sean debidos a cambios globales y no a cambios de tipo local.

En este informe se han incluido trabajos realizados en la laguna de forma directa en este proyecto y otros que, aunque se realizaron en otros contextos, son imprescindibles para entender los cambios que se puedan detectar en el futuro. Los objetivos del trabajo son no sólo describir las características actuales de sus comunidades biológicas (diatomeas y quironómidos esencialmente) sino también los cambios que han tenido lugar en el pasado mediante el estudio de testigos de sedimento.

## Localización y características de la laguna

La laguna de la Mosca se encuentra en la cara Norte del macizo de Sierra Nevada, es una laguna de pequeño tamaño y relativamente somera dentro del conjunto de lagunas de Sierra Nevada (Tabla I). Presenta flujo de agua continuo a lo largo del verano. Sólo en años extremadamente secos y al final del verano (e. g. 2005, 2015) se ha observado seco su efluente.

Los valores de las variables analizadas de la laguna de la Mosca permiten caracterizarla como un sistema oligotrófico de aguas de baja alcalinidad (Tabla I). Sin embargo, dentro de las lagunas de Sierra Nevada, la laguna de la Mosca presenta valores de Ca y alcalinidad relativamente altos.

**Tabla I.** Caracterización morfométrica y valores de distintas variables fisicoquímicas de la laguna de la Mosca (Sierra Nevada).

Laguna de la Mosca	
Coordenadas	37° 3.58' N / 3° 18.88' W
Altitud (m. s. n. m.)	2896
Profundidad máxima (m)	3.4
Superficie laguna (ha)	0.48
Area captación (ha)	39.7
Alcalinidad (meq/L)	1.57
pH	7.8
Conductividad (µs/cm)	36.6
DOC (mg/L)	1.38
Cl-a (ug/L)	1.10
TP (ug/L)	11.30
SRP (ug/L)	4.69
TN (ug/L)	288
DIN (µg/L)	181
Ca (mg/L)	3.70
Prados alpinos	Si
Efluentes	Si
Presencia briófitos orilla	Si

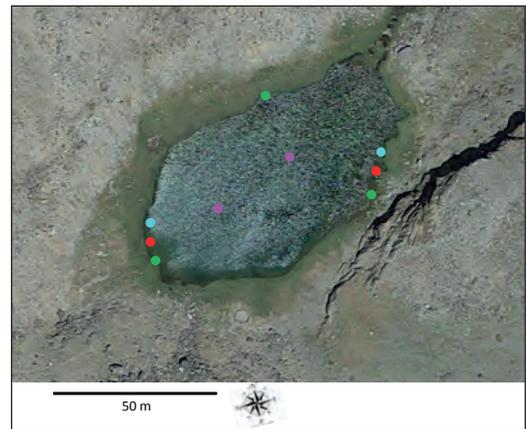
## MATERIAL Y MÉTODOS

### La comunidad actual

Para el proyecto CLAM se realizó una campaña de muestreo el 10 de Octubre de 2014. Las muestras de agua para análisis químicos y biológicos de la columna de agua se tomaron en el punto de máxima profundidad de la laguna (Fig. 1). Las muestras litorales de epilíton y epifíton se tomaron siguiendo la metodología recogida en CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO (2005) con tres réplicas en cada una de ellas que se unieron en una sola muestra de epilíton y otra de epifíton. Las muestras se sometieron a digestión con ácido y los restos silíceos se montaron en portaobjetos con Naphrax para su recuento. Se identificaron y enumeraron un mínimo de 300 frústulos de diatomeas en cada muestra usando un microscopio óptico a 1000x aumentos (N.A. = 1.4) y contraste de interferencia (DIC). La metodología propuesta para el tratamiento de las muestras de sedimento, identificación y recuento de las diatomeas se encuentra en PEARL methodology (<http://post.queensu.ca/~pearl/Methods.htm>) y BATTARBEE et al., (2001). Las diatomeas se identificaron hasta nivel de especie en lo posible usando una selección de fuentes taxonómicas, incluyendo KRAMMER y LANGE-BERTALOT (1986-1991), HOFMANN et al., (2011), BEY y ECTOR (2013). La abundancia de los taxa de diatomeas se expresó como abundancia relativa respecto al número total de valvas contadas en cada muestra.

Para los macroinvertebrados bentónicos se han tomado dos tipos de muestras: i) zona litoral y ii) parte profunda de la laguna. Por un lado, en la zona litoral se siguió la metodología «kick» con una red de 250 µm de malla, recolectando 3 réplicas en dos puntos de la laguna. En el caso de la zona profunda, se usó una draga Eckman (superficie de muestreo 225 cm<sup>2</sup>), con 3 réplicas a 2 y 3 m de profundidad. Para la caracterización del bentos, los macroinvertebrados se identificaron con la ayuda de un estereoscopio a 30x y guías

especializadas (TACHET et al., 2010). En el caso de los quironómidos, se extrajeron todos los individuos presentes en cada muestra o un mínimo de 300 cuando eran más abundantes. Después de separarlos por morfotipos, un número determinado de cada morfotipo fue tratado con KOH a 70°C y montado en portaobjetos en Euparal. Estos individuos fueron identificados mediante un microscopio con la ayuda de diferentes guías (WIEDERHOLM 1983; RIERADEVALL y BROOKS 2001; BROOKS et al., 2007). Más adelante, cuando los diferentes morfotipos fueron correctamente identificados, los individuos pertenecientes a estos morfotipos fueron directamente identificados en las muestras.

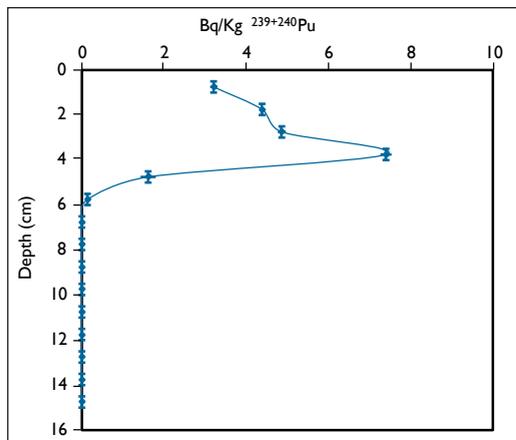


**Fig. 1.** La laguna de La Mosca (Sierra Nevada), con indicación de las muestras tomadas en Octubre de 2014. En esta figura se pueden ver en color verde las muestras tomadas de Epilíton/Epifíton; en color celeste las de microcrustáceos; en color rojo los macroinvertebrados de la zona litoral y en color rosa los macroinvertebrados de sedimento blando.

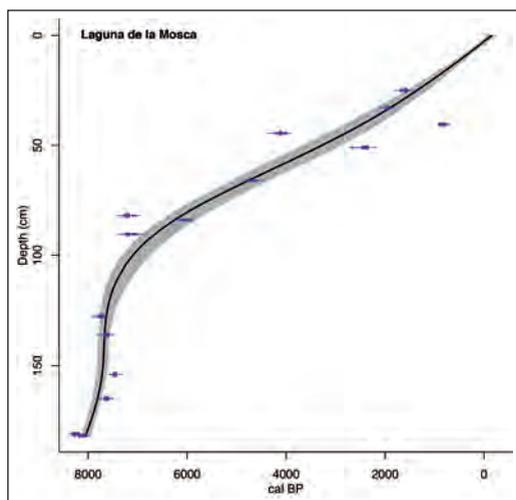
### Muestras subfósiles

Varios testigos sedimentarios se tomaron de la Laguna de la Mosca en septiembre de 2013. Se obtuvieron un testigo corto de unos 29 cm de longitud y uno largo de 190 cm mediante una sonda de tipo Livingstone. Los testigos se envolvieron y se guardaron en tubos de PVC en una cámara frigorífica en la Universidad de Granada.

El sondeo corto se muestreó cada 0.5 cm y se tomaron muestras para datación mediante Pu, dando un pico en este elemento a 3.5-4.0 cm, localizando el año 1963 a esa profundidad (Fig. 2). El sondeo largo se escaneó para análisis de susceptibilidad magnética y se tomaron datos para dataciones de carbono 14 (Fig. 3).



**Fig. 2.** Datación del sondeo corto de la Laguna de la Mosca mediante Plutonio (Pu). El pico de Pu (año 1963) se alcanza entre 3.5-4.0 cm.



**Fig. 3.** Modelo de edad del sondeo largo de la Laguna de la Mosca. Nótese que el sondeo abarca el registro más o menos continuo de los últimos 8000 años.

### Restos silíceos de diatomeas

Muestras de sedimento se sometieron a digestión con ácido y los restos silíceos se montaron en portaobjetos con Naphrax para su recuento. Se identificaron y enumeraron un mínimo de 300 valvas de diatomeas en cada intervalo usando un microscopio óptico a 1000x aumentos y contraste de interferencia (DIC), aunque en aproximadamente un 10% de las muestras fue imposible llegar a 300 valvas por la escasez de las mismas y abundancia de restos minerales que impedían su correcta visión al microscopio.

### Quironómidos

Para los quironómidos, se tomaron muestras de hasta 5 gramos de sedimento a diferentes profundidades. Este sedimento fue tratado con hidróxido de potasio (KOH) al 10%, lo que resulta en la separación de los aglomerados de fango que quedan en forma de sedimentos en suspensión que se filtran con filtros metálicos de 90 micras de poro donde quedan retenidos los materiales orgánicos e inorgánicos de tamaño superior. El material retenido en los filtros se trasvasa a una cámara de contaje tipo Bogorov y se examina mediante una lupa binocular. Una vez deshidratados, los restos de quironómidos se preparan con Euparal como líquido de montaje. Cada uno de los fragmentos se monta de forma independiente y se identifica mediante un microscopio con la ayuda de diferentes guías (WIEDERHOLM 1983; RIERADEVALL y BROOKS 2001; BROOKS *et al.*, 2007). Las preparaciones así realizadas se enumeran bajo códigos simples y se mantienen en la colección que los autores tienen en la Universidad de Barcelona.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### La comunidad actual

#### Diatomeas

La comunidad actual de diatomeas epilíticas y epifíticas (Figura 4) está dominada por *Achnanidium minutissimum*, una de las diatomeas bénticas globalmente más frecuentes y especie considerada ubicua (POTAPOVA y HAMILTON 2007) aunque descrita en ocasiones como indicadora de aguas oligotróficas (POTAPOVA y CHARLES 2007). La presencia de *Staurosirella pinnata* y *Pseudostaurosira pseudoconstruens* junto con *Encyonema minutum* en Sierra Nevada ha sido descrita como propia de lagunas con más borreguiles (prados de montaña) y mayor flujo de agua y de valores relativamente altos de alcalinidad (LINARES et al., 2007).

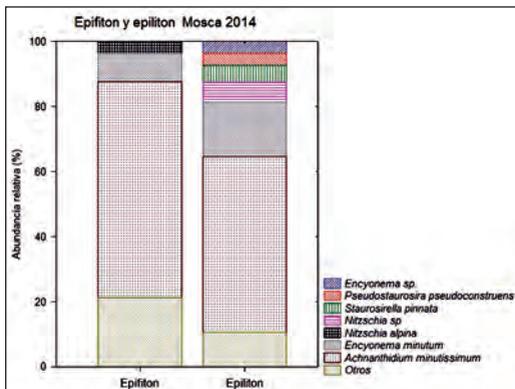


Fig. 4. Abundancia relativa (%) de las diatomeas epilíticas y epifíticas identificadas en la laguna de la Mosca.

#### El bentos litoral y profundo

Los datos de las muestras tomadas en el litoral y los de las muestras profundas (muestras D) de la laguna de la Mosca, se pueden encontrar en la Tabla 2. Como puede verse en la tabla, en la zona litoral se encuentran menos taxa a nivel de

grandes grupos que en el lago de Enol (hasta 37 taxa en Enol, solo cinco en La Mosca si contamos todos los quironómidos de forma conjunta como se hizo en Enol). Ello es debido a las condiciones más estresantes (por la mayor duración de la cobertura de hielo y las bajas temperaturas) que se producen a mayor altitud y que impiden la colonización de muchas especies. Además, las densidades de todos los taxones a excepción de la familia Chironomidae son muy bajas y en la zona más profunda de la laguna (2 y 3 m) tan solo encontramos representada la familia de los quironómidos.

En la zona litoral se encuentran hasta 10 especies de quironómidos, mientras que en la zona más profunda disminuye este valor a la mitad y, especialmente, la densidad, que como puede verse en la tabla 2 es muy baja. La zona litoral está ampliamente dominada por *Corynoneura*, seguida de *Psectrocladius* y *Micropsectra radialis*. Por su parte, la zona más profunda está dominada por *Micropsectra radialis*. Hay que destacar que en ese caso, como en los otros, la clasificación hasta nivel de especie se ha hecho mediante las exuvias pupales de los quironómidos que se encontraron en la zona litoral. Lamentablemente no se encontraron exuvias de *Corynoneura* por lo que no podemos saber la especie o especies que habitan La Mosca. La dominancia de *Corynoneura* y *Psectrocladius* en la zona litoral de la laguna puede estar relacionada con la presencia de vegetación y macrófitos, ya que han sido géneros repetidamente asociados a estas condiciones (BRODERSEN et al., 2001). Por otra parte, la importancia de *Micropsectra radialis* y la presencia de otros taxones como *PseudoDiamesa nivosa* estarían relacionadas con las condiciones de laguna de alta montaña de La Mosca. Ambas especies han sido identificadas en otros lagos de alta montaña en la Península Ibérica, como el Lago Redó (RIERADEVALL et al., 1999; CATALAN et al., 2002) o el Lago de Marboré, también estudiado en este proyecto (RIERADEVALL et al., este volumen).

**Tabla 2.** Bentos litoral y profundo actual de la laguna de La Mosca. Se indica el valor en ind/m<sup>2</sup> de las tres réplicas tomadas en dos zonas del litoral y dos zonas de la zona profunda (muestras D).

TAXON	MOSCA_Litoral_1a	MOSCA_Litoral_1b	MOSCA_Litoral_1c	MOSCA_Litoral_2a	MOSCA_Litoral_2b	MOSCA_Litoral_2c	MOSCA_D2.1	MOSCA_D2.2	MOSCA_D2.3	MOSCA_D3.1	MOSCA_D3.2	MOSCA_D3.3
<i>Oligochaeta</i>	2	15	68	26	47	42	0	0	0	0	0	0
<i>Dytiscidae</i>	18	5	8	5	4	6	0	0	0	0	0	0
<i>Corixidae</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Baetidae</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<b>Chironomidae</b>												
<i>Conchapelopia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
<i>Paramerina /Pentaneurella</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pseudodiamesa nivosa</i>	0	0	0	6	6	7	0	0	0	0	0	0
<i>Corynoneura</i>	10048	3232	4000	9472	7968	9600	1	0	0	0	3	1
<i>Acricotopus</i>	2	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Limnophyes</i>	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Metriconevus cf. albolineatus</i>	6	0	20	4	1	12	0	0	0	0	0	0
<i>Psectrocladius (Allopsectrocladius)</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Psectrocladius (Psectrocladius)</i>	170	102	102	76	84	90	6	0	0	1	3	4
<i>Micropsectra cf. contracta</i>	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Micropsectra cf. lindrothi</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Micropsectra radialis</i>	62	70	95	74	76	124	18	6	2	1	4	3

## Registro paleolimnológico

### Datación y muestras tomadas

Tanto del testigo corto como del largo se tomaron muestras para diatomeas, quironómidos, polen, carbones y geoquímica tanto inorgánica como orgánica. Aunque muchos de estos análisis se encuentran en realización en estos momentos, a continuación se muestran los datos que ya se disponen.

En el caso del sondeo corto se muestra en la figura 3 la datación obtenida mediante el método del Plutonio que permite datar el año en que se

sucedieron las mayores pruebas nucleares en la atmósfera, lo que se refleja en el plutonio que se depositó en los lagos por la lluvia que se produjo en aquellos momentos.

Para el testigo largo el uso de la datación mediante carbono 14 ha permitido establecer la edad de los diferentes niveles tal como se muestra en la figura 4.

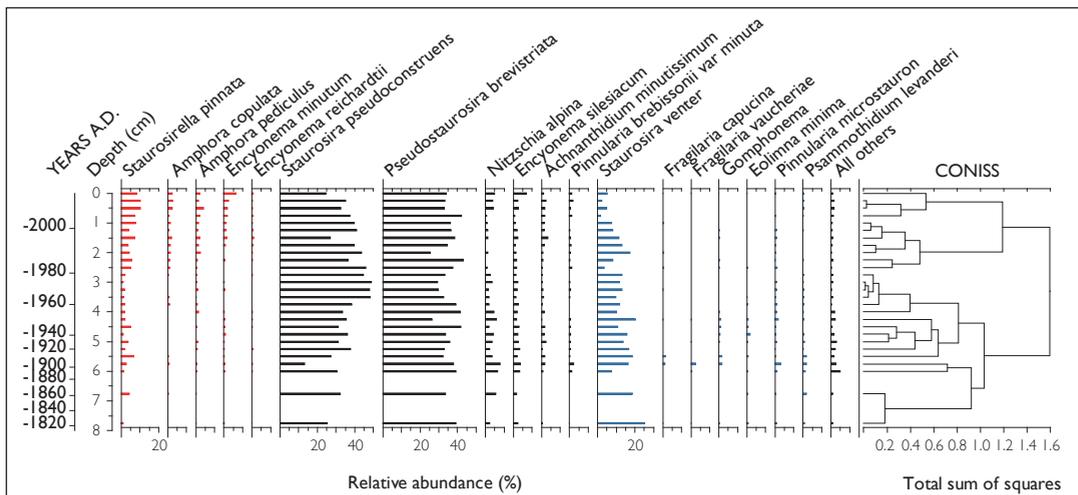
### Diatomeas

Por lo que se refiere al registro paleolimnológico de diatomeas, existen diferentes estudios sobre

las comunidades subfósiles de diatomeas en este lago que describen perfectamente los cambios en el tiempo, tanto para los últimos 200 años (testigo corto) como para los 3000 años (testigo largo).

Se han identificado más de 50 especies de diatomeas en la laguna de la Mosca. La composición florística de esta laguna es típica de lagunas alpinas de pequeña profundidad con ausencia de especies planctónicas y siendo las especies dominantes pequeñas fragilariáceas de habitat

epipélico, epilítico y epifítico. Los resultados del testigo corto (Figura 5), con una alta resolución, muestran que el cambio principal en la laguna durante los últimos 200 años se ha producido a partir de la década 1970s destacando el incremento de *Staurosirella pinnata*, especie asociada a valores relativamente altos de conductividad y alcalinidad (SCHMIDT et al., 2004). Este cambio podría asociarse al incremento de temperaturas observadas en la zona desde esos años junto con la disminución de precipitaciones.



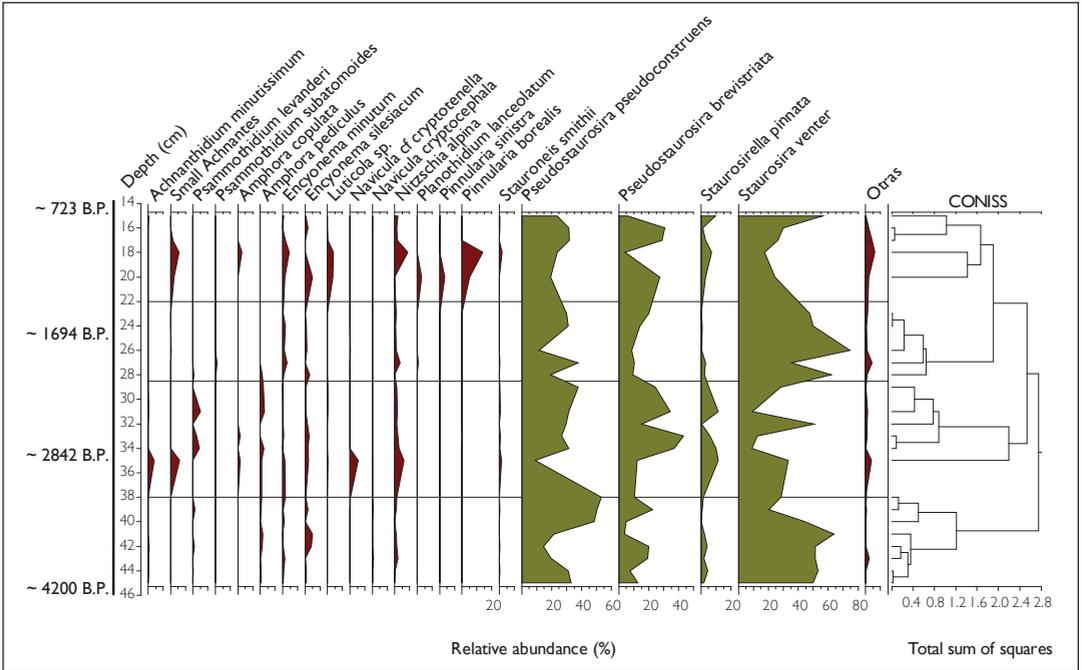
**Fig. 5.** Cambios observados en la comunidad de diatomeas de la laguna de la Mosca a lo largo de los últimos 200 años. Resultados del testigo corto tomado en la laguna.

En el testigo largo (Figura 6) se observan distintos periodos a lo largo de los últimos 4000 años. En la parte más baja del testigo predomina *Staurosira venter* junto con otras pequeñas fragilariáceas (color verde), observándose una baja diversidad. Estas especies tienen un carácter colonizador muy acusado y altas tasas de crecimiento y suelen dominar bajo condiciones desfavorables para otras especies. En el siguiente periodo (3900-1900 y B. P.) adquieren más importancia especies de pequeño tamaño (e. g. *Achnantes* spp., *Encyonema* spp., *Achnantheidium minutissimum*) asociadas a vegetación (KELLY et al., 2005) y *S. pinnata*. Estos cambios pueden estar

condicionados por un cambio en el clima hacia condiciones más secas y el aumento del período libre de hielo que permitieran un mayor desarrollo de los borreguiles circundantes. El período siguiente (1900-1200 y B. P.), vuelven condiciones parecidas a las del primer periodo mientras que el último periodo se caracteriza por una disminución de *Staurosira venter* y aumento de *S. pinnata* y algunas especies de la diatomoflora edáfica como *Pinnularia borealis* o *Luticola* sp. (SMOL Y STOERMER 2010) Las muestras de este periodo mostraban un alto contenido en materia mineral y escasez de valvas de diatomeas. Es probable que corresponda a un periodo de in-

tenso derrubios en la laguna o arrastre de hielo. El crecimiento de especies propias del ambiente húmedo circundante a la laguna y descenso de

especies propias acuáticas sugiere un período de perturbaciones intensas en la laguna y/o de duración corta de la estación de crecimiento.



**Fig. 6.** Cambios observados en la comunidad de diatomeas de la laguna de la Mosca a lo largo de los últimos 4000 años. Resultados del testigo largo tomado en la laguna.

### Quironómidos

Se han estudiado los quironómidos de los primeros 50 cm, que corresponden a los últimos 4000 años (Figura 7). En primer lugar hay que destacar la escasa densidad de cápsulas en general y en algunos niveles en particular, solo aumentando en los sedimentos más recientes. La comunidad se encuentra dominada casi en la totalidad del perfil por dos especies: *Micropsectra radialis* y *Pseudodiamesa nivosa*. Los cambios que se producen en la abundancia relativa de estas dos especies son debidos a la escasez de material. No obstante, se observa claramente que cuando aumenta el número de cápsulas domina *M. radialis*, lo que es un refle-

jo de la fauna actual dominada por esta especie. Solo aparecen de forma poco abundantes en la parte más superior del core algunas de las especies propias de la zona litoral actual, como son *Psectrocladius*, *Diamesa* o *Corynoneura*. Es interesante ver como un género tan abundante en la zona litoral como *Corynoneura* no aparece apenas en el testigo sedimentario. En la parte superior del core no se estudiaron los quironómidos como las diatomeas y por lo tanto no se ven tendencias generales. El aumento de las formas litorales podría ser debido a la disminución de la profundidad de la laguna en el tiempo y un pequeño aumento de la productividad biológica y de presencia de macrófitos.

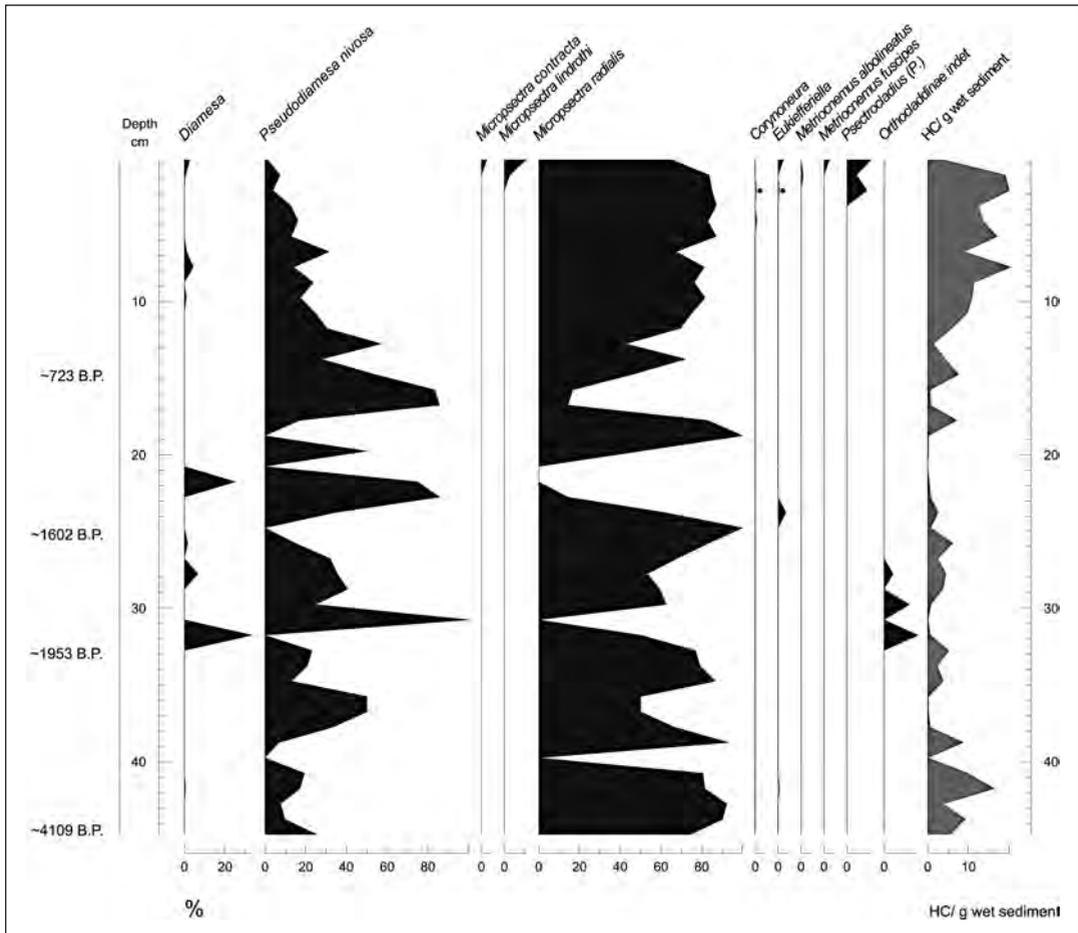


Fig. 7. Cambios observados en la comunidad de quironómidos de la laguna de la Mosca a lo largo de los últimos 4000 años. Resultados del testigo largo tomado en la laguna.

En la zona más profunda no aparecen cambios en la composición de las especies de quironómidos como los obtenidos por las diatomeas. Queda por ver si estos cambios recientes son debidos a cambios en las temperaturas u otros parámetros de la laguna o sus alrededores y hasta qué punto persisten en el futuro. Precisamente el haber realizado este estudio permitirá fijar cual es la línea de base a la que hay que tender si las condiciones actuales se prefijan como las que deben darse en un futuro.

## CONCLUSIONES

La laguna de la Mosca, en Sierra Nevada, es un sistema lagunar oligotrófico, tanto por lo que se refiere a las características físico-químicas como biológicas. La composición y baja densidad global de especies de diatomeas y quironómidos así lo indican. Las densidades de quironómidos son muy bajas especialmente si las comparamos con sistemas más eutróficos como el lago Enol. La laguna de la Mosca, en el marco del proyecto CLAM, se parece mucho,

en su composición y baja densidad de quironómidos por ejemplo, al lago Marboré, también estudiado en el proyecto CLAM-2 (RIERADEVALL *et al.*, este volumen).

La laguna ha experimentado cambios apreciables en la composición de las diatomeas a lo largo del período de 4000 años estudiado, probablemente asociados a cambios climáticos, mientras que para los quironómidos la composición no ha variado sustancialmente. Podría destacarse que hay periodos de disminución en la densidad que coinciden con periodos de cambio de diatomeas (i. e. cm 21, 28-30, 38), hecho que indicaría una inestabilidad de los sedimentos y períodos de erosión. En los últimos 200 años el principal cambio registrado parece estar asociado al calentamiento reciente y afecta más, por lo que respecta a la composición, a las diatomeas que a los quironómidos ya que en estos últimos sigue dominando la misma especie. El aumento de riqueza de quironómidos podría estar asociado a una mayor productividad del lago, siempre dentro de su oligotrofia, y a la mayor presencia de macrófitos.

Actualmente es una laguna de carácter oligotrófico sometida a leves presiones humanas directas. Su carácter remoto, oligotrófico y su apreciable respuesta a los cambios ambientales aconseja el uso de esta laguna como referencia

en el estudio del cambio global en el futuro. Los sistemas de alta montaña de clima mediterráneo se encuentran entre los más vulnerables al calentamiento global y la situación geográfica de la laguna de la Mosca, en la alta montaña mediterránea más meridional de Europa, la señalan como un laboratorio natural para su estudio. El hecho que su fauna de quironómidos se parezca tanto a la de Marboré, hace que el seguimiento conjunto de los dos lagos pueda proporcionar buenas informaciones sobre los cambios globales que se produzcan en la península, al estar tan separados en el espacio. La red de Parques Nacionales española puede, de esta manera, ser un referente en la detección de los cambios globales que se produzcan en el futuro si se establece un protocolo de estudio con muestras anuales de las diatomeas y los quironómidos de lago.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha podido realizar gracias a la financiación recibida con los proyectos CLAM-2 (623S/2012) del Organismo Autónomo de Parques Nacionales y MICINN CGL2011-23483. Pol Tarrats agradece la financiación recibida a través del programa FI-DGR de la Generalitat de Catalunya, así como la ayuda inestimable en los trabajos de campo y de laboratorio de Núria Sánchez.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATTARBEE, R. W.; CARVALHO, L.; JONES, V. J.; FLOWER, R. J.; CAMERON, G., BENNION, H. y JUGGINS, S. (2001): Terrestrial, algal, and siliceous indicators: Diatoms, in *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*, edited by J. P. SMOL *et al.*, pp. 155-134, Springer, New York.
- BEY M. Y. y ECTOR L. (2013): *Atlas des diatomées des cours d'eau de la région Rhône-Alpes. Tome 1 Centriques, Monoraphidées. Tome 2 Araphidées, Brachyraphidées. Tome 3 Naviculacées: Naviculoidées. Tome 4 Naviculacées: Naviculoidées. Tome 5 Naviculacées: Cymbelloidées, Gomphonématoidées. Tome 6 Bacillariacées, Rhopalodiácees, Surirellacées.* Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Rhône-Alpes, Lyon, 1182+27p. [www.rhonealpes.developpement-durable.gouv.fr/atlas-des-diatomees-de-la-region-a3480.html](http://www.rhonealpes.developpement-durable.gouv.fr/atlas-des-diatomees-de-la-region-a3480.html).
- BRODERSEN, K. P.; ODGAARD, B. V.; VESTERGAARD, O. y ANDERSON, N. J. (2001): Chironomid stratigraphy in the shallow and eutrophic Lake Søbygaard, Denmark: chironomid -macrophyte co-occurrence. *Freshw Biol* 46:253-267.

- BROOKS, S. J.; LANGDON, P. G. y HEIRI, O. (2007): The identification and use of Palaearctic Chironomidae larvae in palaeoecology. Quaternary Research Association.
- CATALAN, J.; PLA, S.; RIERADEVALL, M.; FELIP, M.; VENTURA, M.; BUCHACA, T.; CAMARERO, L.; BRANCELJ, A.; APPLEBY, P. G.; LAMI, A.; GRYTNES, J. A.; AGUSTÍ-PANAREDA, A. y THOMPSON, R. (2002): Lake Redó ecosystem response to an increasing warming in the Pyrenees during the twentieth century. *J Paleolimnol* 28:129-145. doi: 10.1023/A:1020380104031.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO (2005): Metodología para el establecimiento del Estado Ecológico según la Directiva Marco del Agua. Protocolos de Muestreo y Análisis para Fitobentos (Microalgas bentónicas). Confederación Hidrográfica del Ebro, Ministerio de Medio Ambiente, Zaragoza, 43 p.
- HOFMANN, G.; WERUM, M. y LANGE-BERTALOT, H. (2011): *Diatomeen im Süßwasser-Benthos von Mitteleuropa. Bestimmungsflores Kieselalgen für die ökologische Praxis. Über 700 der häufigsten Arten und ihre Ökologie*. Ruggell, A. R. G. Gantner Verlag, 908 p.
- KELLY, M. G.; BENNION, H.; COX, E. J.; GOLDSMITH, B.; JAMIESON, J.; JUGGINS, S.; MANN, D. G. y TELFORD, R. J. (2005): Common freshwater diatoms of Britain and Ireland: an interactive key. Environment Agency, Bristol. <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/taxon13310170.html>
- KRAMMER, K. y LANGE-BERTALOT, H. (1986-1991): *Bacillariophyceae*. In: Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H., Mollenhauer, D. (Eds.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa*, vol. 2 (1-4). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/Jena.
- LINARES-CUESTA, J. E.; OLOFSSON, L. y SÁNCHEZ CASTILLO P. (2007): Comunidades de diatomeas epipélicas en las lagunas de alta montaña de Sierra Nevada (Granada, España). *Limnetica*, 26(1), 99-113.
- POTAPOVA, M. y CHARLES, D. F. (2007): Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States. *Ecological Indicators* 7:48-70.
- POTAPOVA, M. y HAMILTON, P. B. (2007): Morphological and ecological variation within the *Achnanthydium minutissimum* (*Bacillariophyceae*) species complex. *Journal of Phycology* 43:561-575. 10.1111/j.1529-8817.2007.00332.x.
- RIERADEVALL, M.; BONADA, N. y PRAT, N. (1999): Substrate and depth preferences of macroinvertebrates along a transect in a Pyrenean high mountain lake (Lake Redó, NE Spain). *Limnetica* 17:127-134.
- RIERADEVALL, M. y BROOKS, S. J. (2001): An identification guide to subfossil Tanypodinae larvae (Insecta: Diptera: Chironomidae) based on cephalic setation. *J Paleolimnol* 25:81-99. doi: 10.1023/A:1008185517959.
- RIERADEVALL, M.; GONZÁLEZ-SAMPÉREZ, P.; PÉREZ-MARTÍNEZ, C.; TARRATS, P.; LEUNDA, M.; ARANBARRI, J. GIL.; ROMERA, G. y PRAT, N.: Este volumen. Evaluación y seguimiento del cambio global en dos lagos de alta montaña (Enol y Marboré) de la red española de parques naturales: indicadores biológicos (CLAM2).
- SCHMIDT, R.; KAMENIK, C.; LANGE-BERTALOT, H. y ROLF, K. (2004): *Staurosira* (*Bacillariophyceae*) from sediment surfaces of 40 lakes in the Austrian Alps in relation to environmental variables, and their potential for palaeoclimatology. *Journal of Limnology* 63(2):171-189.
- SMOL, J. P. y STOERMER, E. F. (2010): *The Diatom: Applications for the Environmental and Earth Sciences*. Cambridge University Cambridge, p. 667.
- TACHET, H.; RICHOUX, P.; BOURNAUD, M. y USSEGLIO-POLATERA, P. (2010): «Invertébrés d'Eau Douce. Systematique, Biologie Ecologie». Paris, France. CNRS Éditions. 588 páginas.
- WIEDERHOLM, T. (1983): Chironomidae of the Holarctic region: keys and diagnoses. P. I, Larvae. *Entomologica Scandinavica*.