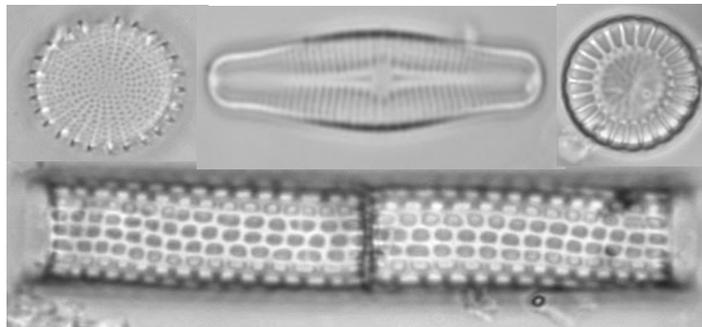


LAS DIATOMEAS FÓSILES PERMITEN RECONSTRUIR CAMBIOS TRÓFICOS EN UN LAGO SUBTROPICAL



Lourdes Gabito

Informe de pasantía final de grado, Licenciatura en Ciencias Biológicas

Sección Limnología - Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales

Facultad de Ciencias - UdelaR

TUTOR: Dra. Sylvia Bonilla

COTUTOR: Dr. Dermot Antoniades

Montevideo, 2010

ÍNDICE

	Páginas
Agradecimientos.....	2
Resumen.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	7
3. OBJETIVO GENERAL.....	7
3.1. Objetivos específicos.....	7
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
4.1. Área de estudio.....	8
4.2. Muestreo.....	8
4.3. Datación.....	8
4.4. Diatomeas, Clorofila <i>a</i> y Materia Orgánica.....	9
4.5. Análisis de datos.....	9
5. RESULTADOS.....	12
5.1. Análisis cuantitativo y cualitativo de diatomeas, clorofila <i>a</i> y materia orgánica fósiles.....	12
5.2. Análisis de diatomeas totales, clorofila <i>a</i> y fósforo total actuales.....	17
6. DISCUSIÓN.....	19
7. BIBLIOGRAFÍA.....	25
Anexo I: Lámina con especies de diatomeas fósiles encontradas en el lago Rodó.....	28

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi familia y a todos mis amigos por estar siempre conmigo y ayudarme a seguir adelante, especialmente a mi mamá. Sin su apoyo hubiese sido imposible realizar este trabajo. A mis tutores Sylvia Bonilla y Dermot Antoniades por haber sido fundamentales en mi formación y por todo su apoyo, su respaldo y sus aportes para realizar este trabajo. A Carla Kruk y Gissell Lacerot por su ayuda tanto académica como moral, incondicionalmente siempre que las necesité. A Felipe García Rodríguez por su interés y sus ideas. A todos mis compañeros y amigos de la Sección Limnología con quienes compartí horas de mi vida y quienes de una manera u otra también me ayudaron a finalizar mi pasantía. Al Tico por su paciencia y su amor. Este proyecto fue parcialmente financiado por ANII (FCE2007_353) y el Fonds Québécois de la Recherche Sur la Nature et les technologies, Université Laval, Canadá. Este trabajo se lo quiero dedicar a mi papá Ricardo Gabito, que estuvo en mi corazón todo el tiempo y fue el motor que me impulsó a seguir adelante siempre, porque este sueño no era mío, era nuestro.

RESUMEN

La eutrofización antrópica es uno de los problemas más comunes que afecta a los sistemas de agua dulce en el mundo. La paleolimnología puede ser una herramienta muy útil en estos casos ya que permite obtener un perfil de la historia y reconstruir las condiciones biológicas y tróficas pasadas en un sistema acuático. Además, mediante estudios paleolimnológicos es posible estimar desde cuando un sistema comenzó a evidenciar signos de eutrofización. Las diatomeas fósiles se preservan muy bien en los sedimentos de los lagos, tienen una alta especificidad de hábitat y altas tasas de crecimiento por lo que responden rápidamente a las fluctuaciones del ambiente. Esto las hace apropiadas para evaluar los cambios ambientales que ocurren en los lagos tanto a corto como a largo plazo. En este trabajo se realizó un estudio paleolimnológico para validar el uso de diatomeas fósiles como herramienta para reconstruir cambios tróficos en un lago hipereutrófico somero, situado en la ciudad de Montevideo, del cual se tienen datos limnológicos desde el año 1992 y que fue sometido a medidas de rehabilitación. El análisis de la composición y abundancia de especies de diatomeas fósiles mostró tres períodos en el tiempo que coincidieron con la aplicación de las distintas medidas de rehabilitación. Las especies de diatomeas fósiles más abundantes encontradas fueron *Stephanodiscus hantzschii*, *Aulacoseira granulata*, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, *Synedra acus* y *Fragilaria crotonensis*. Éstas fueron buenas indicadoras de cambios tróficos en el lago a lo largo de los tres períodos. En el testigo, los perfiles de clorofila *a*, materia orgánica, índice diatomeas planctónicas / bentónicas (o perifíticas) y diversidad N2 de Hill también mostraron cambios relacionados al estado trófico del sistema que coincidieron con los tres períodos, reflejando efectos positivos durante la rehabilitación, y aumentando luego de finalizada la misma, recuperando su nivel de eutrofia. Los perfiles temporales de abundancia de diatomeas fósiles y diatomeas planctónicas mostraron una alta correlación entre sí por lo que podríamos utilizarlas para inferir cambios en la comunidad fitoplanctónica y en el estado trófico en el lago Rodó. Estos resultados resaltan el valor de las diatomeas fósiles como herramienta de evaluación y monitoreo en lagos eutróficos subtropicales.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas acuáticos proporcionan varios servicios para el hombre, desde su uso para la potabilización del agua hasta su utilización para la recreación, por lo que el mantenimiento de su calidad de agua es fundamental. Muchos sistemas acuáticos han sufrido un deterioro rápido y severo en su calidad de agua como consecuencia de actividades antrópicas comprometiendo estos servicios ecosistémicos (Wetzel 1983). La eutrofización es uno de los problemas más comunes que afecta los sistemas acuáticos en el mundo y Uruguay no es la excepción (Bonilla 2009; Conde 2009). Si bien la eutrofización es un proceso natural, puede ser acelerado por actividades antrópicas, siendo el incremento de la carga de fósforo la causa más importante (Wetzel 1983). Como consecuencia de este proceso los sistemas sufren un crecimiento en la biomasa de fitoplancton, una disminución en los niveles de oxígeno disuelto y transparencia, así como la ocurrencia de floraciones de cianobacterias, las cuales pueden ser tóxicas (Wetzel 1983; Whitton & Potts 2000; Kalff 2002). Para revertir la condición de eutrofización, es necesario aplicar medidas de rehabilitación que provoquen la disminución de la biomasa de fitoplancton y un aumento de la transparencia y el oxígeno disuelto. Las medidas más comunes incluyen procedimientos físicos como el dragado de sedimentos, la disminución del aporte de nutrientes, o la biomanipulación de comunidades biológicas (Scasso *et al.* 2001). Sin embargo los efectos de estas medidas tienen baja predictabilidad en cuanto a su eficacia, especialmente en sistemas subtropicales, como los uruguayos (Meerhoff *et al.* 2003).

Por otro lado, la historia de los ecosistemas acuáticos es un aspecto fundamental a tener en cuenta para implementar programas de rehabilitación adecuados. Para esto en primer lugar es necesario conocer cuanto ha cambiado el estado trófico de un sistema a lo largo de la historia ya que algunos lagos son naturalmente eutróficos y no han sufrido grandes variaciones a lo largo del tiempo (Engstrom *et al.* 2006). Es posible conocer la historia de un lago gracias a que sus sedimentos acumulan una importante cantidad de información química y ecológica, la cual puede ser utilizada para inferir cambios históricos ocurridos en su estado trófico (Stoermer & Smol 1999; Smol 2002). En este sentido, una de las herramientas más efectivas es el estudio de microfósiles como las diatomeas, que permiten reconstruir las condiciones biológicas y los niveles de nutrientes del pasado (Battarbee *et al.* 2005; Antoniades *et al.* 2007). Estos estudios permiten evaluar el impacto progresivo del aporte de nutrientes en los lagos, el cambio climático o el efecto de medidas de rehabilitación (Smol 2002; Battarbee *et al.* 2005; Antoniades *et al.* 2007).

Las diatomeas son microalgas que forman parte del fitoplancton, y que suelen preservarse muy bien como fósiles en los sedimentos de los lagos (Stoermer & Smol 1999). Estas microalgas poseen una alta especificidad de hábitat en cuanto a variables ambientales, como temperatura, pH, salinidad, alcalinidad y nutrientes, así como altas tasas de crecimiento, por lo que responden rápidamente a los cambios ambientales que ocurren durante la eutrofización o la rehabilitación de un lago (Stoermer & Smol 1999). La mayor parte de los estudios destinados a evaluar la utilidad de estos organismos para reconstrucciones históricas se han realizado en lagos del hemisferio norte (Wessels *et al.* 1999; Schelske & Kenney 2001; Riedinger-Whitmore *et al.* 2005; Engstrom *et al.* 2006; Valero-Garcés *et al.* 2006), y solo en los últimos años se han iniciado estudios regionales y en nuestro país (García-Rodríguez *et al.* 2002; García-Rodríguez *et al.* 2004; García-Rodríguez 2006).

Un ejemplo de lago eutrófico con alta biomasa fitoplanctónica en nuestro país es el lago Rodó en Montevideo. Este lago fue construido en el año 1917 y se utiliza con fines recreativos. Sin embargo, como consecuencia de la eutrofización se ha visto comprometido su uso recreativo y su valor estético (Sommaruga 1995; Scasso *et al.* 2001). En 1996 se pusieron en práctica medidas de rehabilitación, siendo el primer intento de este tipo en el país. El lago se drenó completamente y se removieron sus sedimentos mediante dragado (Scasso *et al.* 2001). En verano de 1997 se comenzó el llenado del sistema con agua subterránea con alta concentración de nutrientes. En 1998 se realizó una conexión del cuerpo principal del lago a dos piscinas con macrófitas flotantes y a un sistema de recirculación del agua, con el fin de disminuir los nutrientes disponibles para el fitoplancton (Rodríguez-Gallego 2004). Las principales consecuencias luego de la rehabilitación fueron la disminución de la biomasa del fitoplancton, constatándose fases de agua clara (Disco de Secchi > 1 m; primavera de 1997 y 1998) y la disminución del fósforo total ($70 \mu\text{g l}^{-1}$ en primavera de 1997) (Scasso *et al.* 2001). Sin embargo, estas medidas no se mantuvieron en el tiempo y actualmente el lago ha retornado a su condición previa a la aplicación de las medidas de rehabilitación, encontrándose en un estado hipereutrófico con alta turbidez y alta biomasa de fitoplancton registrando su valor máximo de clorofila *a* ($411,6 \mu\text{g l}^{-1}$) en verano de 2004 (Aubriot 2008).

El lago Rodó es un sistema que ha sido muy estudiado, para el cual existe una base de datos con parámetros fisicoquímicos y biológicos desde el año 1992 (Sommaruga 1995; Kruk 2001; Scasso *et al.* 2001; Lacerot & Kruk 2002; Meerhoff 2002; Rodríguez-Gallego 2004; Aubriot 2008). Por lo tanto, constituye un excelente caso de estudio para probar el uso de las diatomeas fósiles

y de la paleolimnología como herramienta para evaluar cambios tróficos históricos en lagos someros subtropicales. La validación de esta técnica nos permitirá estudiar otros lagos eutrofizados en nuestro país, sobre los cuales no se cuente con información previa.

2. HIPÓTESIS DE TRABAJO

Debido a que las diatomeas fósiles responden a cambios en el estado trófico, pueden ser utilizadas para evaluar cambios tróficos históricos (Stoermer & Smol 1999). Nuestra hipótesis plantea que las diatomeas fósiles son buenas indicadores de cambios tróficos en el lago Rodó.

A partir de esta hipótesis generamos las siguientes **predicciones**:

1 - Los cambios en la composición y abundancia relativa de las diferentes especies de diatomeas fósiles reflejan cambios en el estado trófico del lago.

2 - Las variaciones en la abundancia total de las diatomeas fósiles, en la concentración de clorofila *a* y en el contenido de materia orgánica fósiles indican cambios en la biomasa fitoplanctónica y en el estado trófico del sistema

3 - Las medidas de rehabilitación implementadas se pueden detectar en los sedimentos con indicadores como la composición y abundancia de diatomeas fósiles, el índice diatomeas planctónicas/bentónicas (o perifíticas), la diversidad N2 de Hill, la clorofila *a* y la materia orgánica fósiles.

3. OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este estudio fue reconstruir los cambios tróficos utilizando diatomeas, clorofila *a* y materia orgánica fósiles, en un lago eutrófico subtropical somero.

3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1 - Realizar un análisis taxonómico de las diatomeas fósiles del lago Rodó

2 - Determinar los cambios temporales en la composición específica, abundancia total y diversidad de las diatomeas fósiles del lago Rodó en los testigos estudiados.

3 - Determinar las variaciones en la concentración de la clorofila *a* fósil y en el contenido de materia orgánica fósil en los testigos y utilizarlas como indicadores del estado trófico y la producción total del sistema respectivamente.

4 - Evaluar la relación entre la abundancia de diatomeas fósiles y la abundancia de diatomeas actuales.

5 - Relacionar los cambios observados en la composición y abundancia de las diatomeas fósiles, la clorofila *a* y la materia orgánica fósiles con las medidas de rehabilitación aplicadas.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

El lago Rodó está situado en la ciudad de Montevideo (34°55'S; 56°10'W). Es un lago hipereutrófico, somero (área: 1.5 ha, profundidad máxima: 2.5 m) con alta turbidez provocada por una alta biomasa fitoplanctónica. El primer estudio limnológico del lago se realizó en el año 1992, donde se encontró que *Planktothrix agardhii* (Cyanobacteria) dominaba la comunidad fitoplanctónica durante todo el año, llegando a valores máximos de biovolumen ($1,5 \times 10^{11} \mu\text{m}^3 \text{ l}^{-1}$), clorofila *a* ($335 \mu\text{g l}^{-1}$) y una transparencia de 0.2 m, que indicaban condiciones hipereutróficas (Sommaruga 1995). Por este motivo en el año 1997 se pusieron en práctica medidas de rehabilitación (Scasso *et al.* 2001) como se detalló en la introducción.

4.2. Muestreo

El 28 de diciembre de 2007 extrajimos dos testigos de sedimento del lago Rodó de 21 cm de profundidad (uno para realizar el estudio y otro como respaldo), con un equipo de gravedad según el procedimiento descrito en Smol (2002). Inmediatamente luego de la extracción protegimos los testigos de la luz y les colocamos espuma OASIS para impedir pérdidas de agua. Los testigos se transportaron al laboratorio en oscuridad y fueron procesados inmediatamente. En el laboratorio, utilizando discos metálicos cortamos los primeros 5 cm del testigo cada 0.5 cm, los siguientes 10 cm cada 1 cm, y los últimos 6 cm cada 2 cm, totalizando 23 muestras. Finalmente, colocamos las muestras en bolsas individuales herméticas y las guardamos en congelador (-20 °C) para su posterior análisis.

4.3. Datación

Realizamos la datación de los sedimentos de forma relativa. Encontramos dos épocas claramente diferentes en las propiedades del sedimento, incluyendo los valores de clorofila *a*, materia orgánica y diatomeas totales fósiles. Asumimos que la caída abrupta de estos valores representa el contacto entre los sedimentos anteriores y posteriores a la rehabilitación (verano 1997). A partir de dicha fecha asumimos una tasa de sedimentación constante. En base a este cálculo, y asumiendo que el testigo abarcaba entre marzo de 1997 y diciembre de 2007 llegamos a una tasa de acumulación promedio de 1.2 cm por año.

4.4. Diatomeas, Clorofila a y Materia Orgánica

Para realizar los análisis de composición y abundancia de diatomeas fósiles y clorofila a liofilizamos por 24 horas submuestras de peso conocido de las 23 muestras.

Para el análisis de la composición y abundancia de las diatomeas fósiles oxidamos todas las submuestras con H₂O₂ 30% durante 4 y 8 horas (dependiendo del contenido de materia orgánica de cada muestra). Posteriormente las centrifugamos a 1200 rpm durante 15 minutos y las enjuagamos con agua destilada. Este paso se repitió tres veces. Una vez terminada la digestión, adicionamos microesferas a cada muestra, como marcadores externos para calcular la concentración absoluta de diatomeas. Finalmente, realizamos preparados fijos con resina ENTELLAN. Contamos hasta 300 valvas utilizando microscopio óptico a un aumento de 1000x, y calculamos las abundancias según el método de Battarbee (1986) modificado. Para el análisis de la composición de la comunidad llegamos a nivel de especie en casi todos los casos utilizando bibliografía apropiada (Krammer & Lange-Bertalot 1991; Metzelin *et al.* 2005; Antoniades *et al.* 2008).

Además, tomando submuestras de las 23 muestras iniciales, realizamos el análisis del contenido de materia orgánica (MO) en sedimentos como indicador del estado trófico utilizando el método "Loss on Ignition" (LOI) (Dean 1974). También realizamos el análisis de clorofila a (Clo a), utilizando acetona 90% como solvente, mediante espectrofotometría (Jeffrey *et al.* 1997) para utilizarla como indicador de biomasa del fitoplancton total.

Posteriormente, recopilamos información disponible en informes técnicos, artículos científicos y tesis del lago Rodó para su caracterización limnológica antes, durante y posterior al período de rehabilitación. Para esto, utilizamos la base de datos limnológicos con la que cuenta la Sección Limnología desde el año 1992. Utilizamos valores de fósforo total (PT) y de clorofila a (Clo a) que abarcan los períodos comprendidos entre marzo 1997 - marzo 2000, octubre 2000 – diciembre 2000, enero 2003 – mayo 2004, febrero 2006 – junio 2006 y enero 2007- junio 2007. Los valores de abundancia total de diatomeas en fitoplanctónicas fueron tomados de los períodos que comprenden: marzo 1997- marzo 2000, enero 2003 – mayo 2005, enero 2006 – junio 2006 y enero 2007 – junio 2007.

4.5. Análisis de datos

Calculamos el peso seco de sedimento en gramos de cada submuestra e introdujimos en cada una un número conocido de microsferas para luego calcular la concentración total absoluta de diatomeas fósiles utilizando la fórmula de Battarbee (1986).

$$\text{Diatomeas Totales (diatomeas g sed seco}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Microsferas Introducidas} \times \text{Diatomeas Contadas}}{\text{Microsferas Contadas}}$$

Expresamos la abundancia absoluta de diatomeas fósiles como el número de diatomeas totales por gramo de peso seco de sedimento. Para analizar la variación de la abundancia relativa de las diatomeas fósiles a lo largo del tiempo realizamos un análisis de componentes principales (ACP). Seleccionamos este análisis luego de determinar la longitud del gradiente de cambio (ter Braak 1986). También realizamos histogramas de distribución para evaluar los perfiles verticales de las variables en el testigo (abundancia de diatomeas fósiles, MO fósil, Clo a fósil y abundancia de cada especie de diatomeas). Para comparar las relaciones entre las variables: diatomeas fósiles totales, MO fósil y Clo a fósil y para la abundancia de diatomeas fitoplanctónicas de los datos limnológicos recopilados utilizamos regresiones lineales simples ajustadas por métodos de mínimos cuadrados. Para realizar este análisis, probamos previamente los supuestos de normalidad y la homogeneidad de varianza con las pruebas Kolmogorov-Smirnov y Spearman rank, respectivamente. Las variables que no cumplieron con estos supuestos fueron transformadas por $\log_{10}(x)$ (MO y diatomeas fósiles totales) y $\sqrt{\quad}$ (Clo a fósil).

Para inferir el uso de diferentes formas de vida dominantes calculamos el índice diatomeas planctónicas / bentónicas (P/B), en donde fueron tomadas como especies bentónicas o perifíticas las que habitan en el sedimento o adheridas a cualquier sustrato según la literatura. En base a la abundancia se calculó el índice de diversidad N2 de Hill (Hill 1973) para las diatomeas fósiles. Este índice mide el número efectivo de especies presentes en una muestra, y nos da una medida del grado de distribución de las abundancias relativas entre las especies. Para buscar relaciones entre las formas de vida y la diversidad comparamos el índice P/B con la diversidad N2 de Hill calculando el coeficiente de relación no paramétrico de Spearman. Con los datos limnológicos recopilados graficamos los valores de Clo a y calculamos los promedios y desvíos estándar para fósforo total (PT).

El ACP se realizó utilizando el programa CANOCO versión 4.5. Todos los histogramas en este trabajo fueron realizados con en el programa C2 versión 1.4.3. Las regresiones lineales simples y la gráfica de Clo a actual fueron realizadas con el programa SigmaPlot versión 10.0. El coeficiente de relación no paramétrico de Spearman se calculó con el programa STATISTICA versión 6.

5. RESULTADOS

5.1. Análisis cuantitativo y cualitativo de diatomeas, clorofila a y materia orgánica fósiles

Identificamos 30 especies de diatomeas pertenecientes a 18 géneros diferentes (Tabla 1). De las 30 especies, 5 fueron céntricas y 25 pennadas, y a su vez, 7 especies correspondieron a formas planctónicas y 23 a formas bentónicas (Tabla 1).

Tabla 1. Lista de especies de diatomeas fósiles encontradas en el testigo. Se indica el hábito: P: especie planctónica, B: especie bentónica.

Diatomeas Céntricas		Diatomeas Pennadas	
<i>Cyclotella stelligera</i>	P	<i>Achnanthes inflata</i>	B
<i>Aulacoseira granulata</i>	P	<i>Achnantheidium minutissimum</i>	B
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	P	<i>Amphora veneta</i>	B
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	P	<i>Cocconeis placentula</i>	B
<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	P	<i>Cymbella excisa</i> var. <i>angusta</i>	B
		<i>Encyonema</i> cf. <i>reichardtii</i>	B
		<i>Encyonema</i> cf. <i>vulgare</i>	B
		<i>Epithemia adnata</i>	B
		<i>Epithemia sores</i>	B
		<i>Fragilaria crotonensis</i>	P
		<i>Gomphonema batei</i>	B
		<i>Gomphonema parvulum</i>	B
		<i>Gomphonema</i> sp.	B
		<i>Gomphonema uruguayense</i>	B
		<i>Navicula</i> sp.	B
		<i>Nitzschia</i> sp.	B
		<i>Nitzschia amphibia</i>	B
		<i>Nitzschia denticula</i>	B
		<i>Nitzschia hungarica</i>	B
		<i>Nitzschia intermedia</i>	B
		<i>Nitzschia palea</i>	B
		<i>Nitzschia sigma</i>	B
		<i>Pinnularia</i> sp.	B
		<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	B
		<i>Suirella ovalis</i>	B
		<i>Synedra acus</i>	P

El ACP basado en la composición y abundancia de especies de diatomeas explicó el 55.5% de la varianza total en los 2 primeros ejes y mostró tres períodos distintos en la composición y abundancia de especies a lo largo del testigo (Figura 1). Dichos períodos correspondieron a tres épocas diferentes en el tiempo claramente definidas.

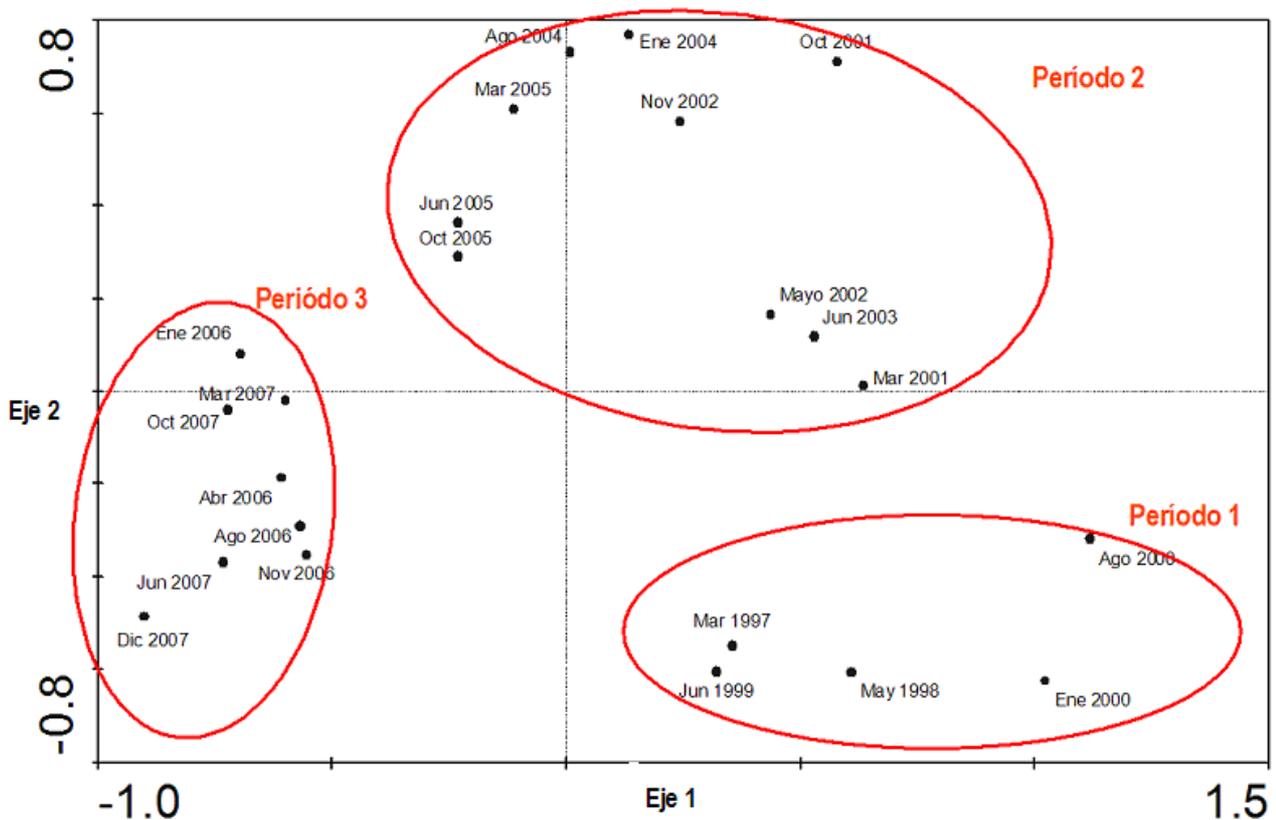


Figura 1. Análisis de Componentes Principales en base a la composición y abundancia de especies de diatomeas en el testigo. Para cada muestra (puntos negros) se presentan las fechas inferidas de la datación relativa. Los círculos rojos indican cada período.

El primer período (Figura 1), abarcaría desde marzo de 1997 hasta agosto del 2000. Las especies de diatomeas con mayor abundancia durante este período fueron *Synedra acus* y *Fragilaria crotonensis* (Figura 2), ambas pennadas y planctónicas (Tabla 1). El segundo período (Figura 1) abarcaría desde marzo del 2001 hasta octubre del 2005. Durante dicho período las especies más abundantes fueron *Aulacoseira granulata* y *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* (Figura 2), ambas correspondieron a formas céntricas y planctónicas (Tabla 1). Por último, el período 3 (Figura 1) iría desde enero de 2006 hasta diciembre de 2007. Las especies más abundantes fueron *Stephanodiscus hantzschii* y *Aulacoseira granulata* (Figura 2), ambas céntricas y planctónicas (Tabla 1) y *Achnantheidium minutissimum* (Figura 2), pennada y bentónica (Tabla 1).

Tabla 2. Medidas de manejo implementadas en el lago Rodó que corresponden con los tres periodos determinados en este estudio (ver Figura 1). Modificado de (Kruk 2001; Lacerot & Kruk 2002; Meerhoff 2002; Rodríguez-Gallego 2004; Aubriot 2008).

MEDIDAS DE MANEJO	Período 1	Período 2	Período 3
Vaciado y dragado de sedimento	X		
Agregado de agua subterránea rica en nutrientes	X		
Biomanipulación de peces	X		
Recirculación del agua del lago a través de piletas con macrófitas mediante bombeo	X		
Fin de las medidas de rehabilitación		X	X

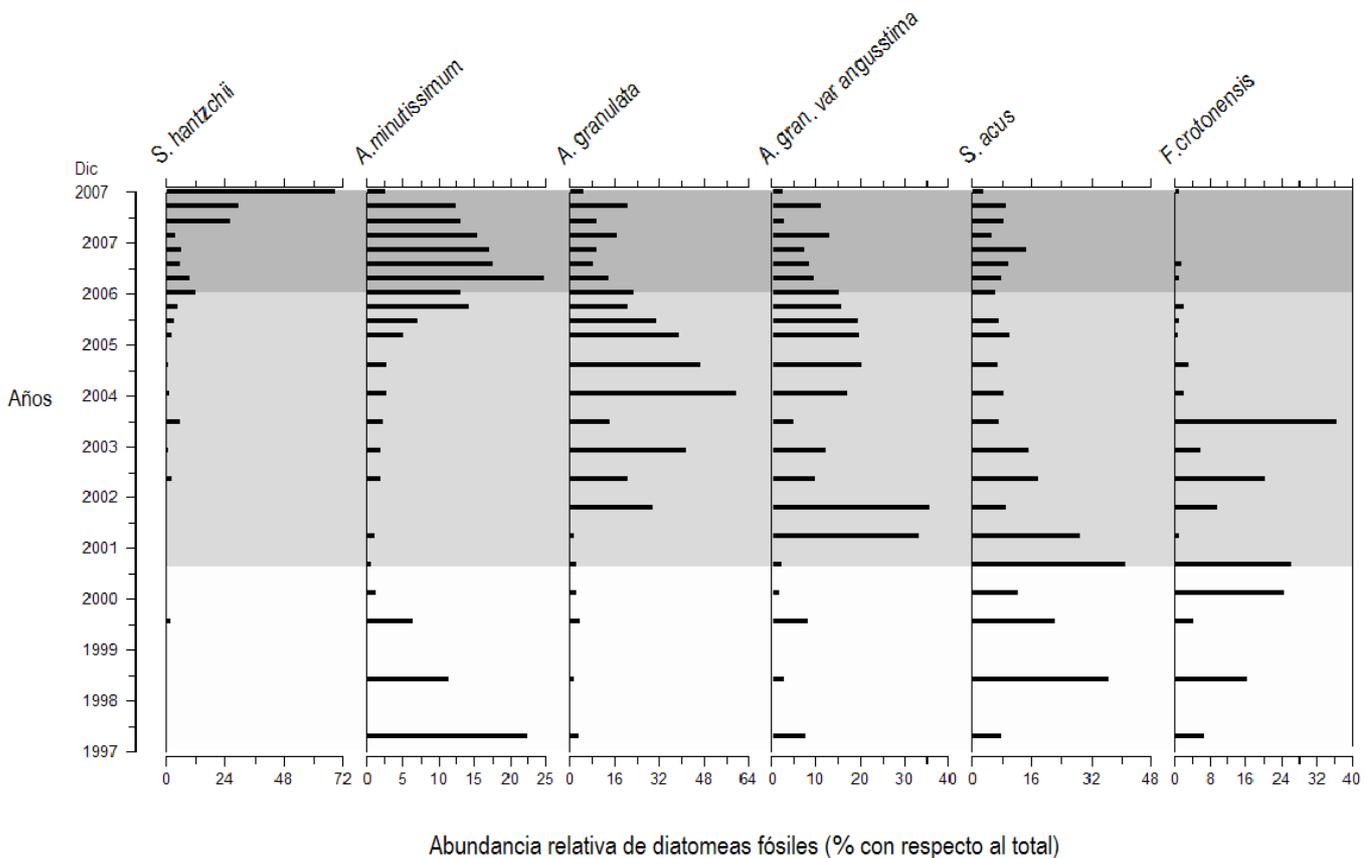


Figura 2. Abundancia relativa de las seis especies de diatomeas fósiles de mayor abundancia en cada período, *Stephanodiscus hantzschii*, *Achnanthisdium minutissimum*, *Aulacoseira granulata*, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, *Synedra acus* y *Fragilaria crotonensis*. Los diferentes colores representan los tres períodos descritos en la Figura 1. Blanco corresponde al período 1, gris claro al período 2 y gris oscuro al período 3.

Las diferentes especies variaron en su abundancia relativa a lo largo del tiempo. *S. acus* y *F. crotonensis* presentaron los valores más altos de abundancia el período 1 (Figura 2) *Aulacoseira granulata* y *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* presentaron los valores más altos de abundancia en el período 2 (Figura 2). Por otro lado *Stephanodiscus hantzschii* mostró alta abundancia durante todo el período 3, especialmente al final, al igual que *Achnanthisdium minutissimum* quién también presentó una abundancia mayor en el período 3 (Figura 2).

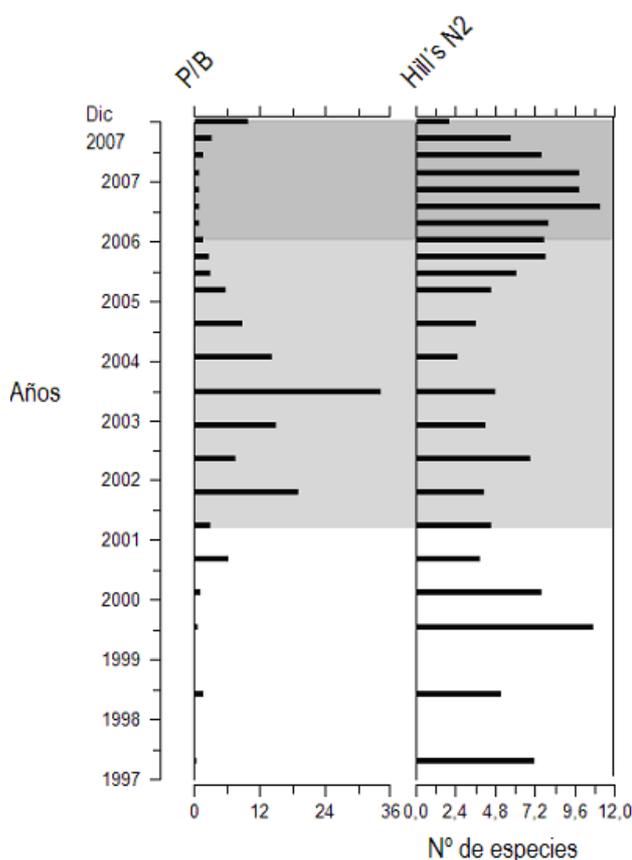


Figura 3. Índices calculados a partir de las abundancias relativas de diatomeas fósiles. P/B=Planctónicas/Bentónicas y el índice de diversidad N2 de Hill. Los diferentes colores representan los diferentes períodos descritos en la Figura 1. Blanco corresponde al período 1, gris claro al período 2 y gris oscuro al período 3.

Se observaron tendencias opuestas entre los índices P/B y la diversidad (índice de Hill) (coeficiente de correlación, $r^2 = -0.80$, significativa). El índice P/B presentó valores mínimos en el período 1 indicando una abundancia mayor de especies bentónicas o perifíticas mientras que por

el contrario, la diversidad presentó los valores más altos (Figura 3). En el período 2 el índice P/B mostró valores mayores con respecto al período 1, las formas planctónicas fueron más abundantes y la diversidad fue menor (Figura 3). Por último en el período 3, los valores del índice P/B fueron bajos indicando mayor abundancia de especies bentónicas o perifíticas, mientras que la diversidad fue alta (Figura 3). Sin embargo en diciembre del 2007, comparado con el resto del período 3, el índice P/B fue más alto, demostrando un aumento de formas planctónicas lo que coincidió con una disminución de la diversidad (Figura 3).

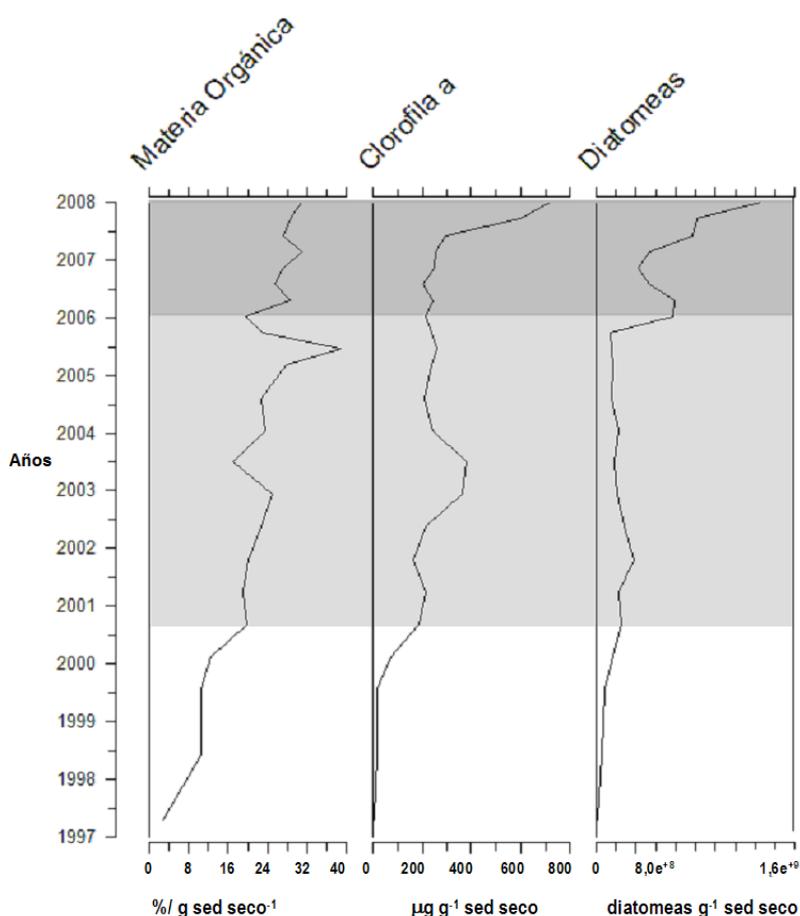


Figura 4: Porcentaje de materia orgánica, clorofila *a* y diatomeas fósiles en el testigo. Los diferentes colores representan los diferentes periodos descritos en la Figura 1. Blanco corresponde al período 1, gris claro al período 2 y gris oscuro al período 3.

El contenido de materia orgánica en el testigo tuvo los valores más bajos en el período 1 y siguió aumentando hacia el presente, mostrando un pico en su valor a mediados del 2005 (período 2) (Figura 4). Los valores de clorofila *a* fueron mínimos en el período 1, aumentaron en el período 2, mostrando un pico a mediados del 2003, (lo que coincide con una leve disminución en los valores de MO) y alcanza su valor máximo en el período 3 (Figura 4). La abundancia de las

diatomeas fósiles en los periodos 1 y 2 fue baja creciendo claramente en el periodo 3, llegando a su valor máximo a finales de dicho periodo (Figura 4). Los tres parámetros mostraron perfiles similares y se correlacionaron positivamente entre si (MO - Diatomeas $r^2 = 0.75$; Diatomeas - Clo $a r^2 = 0.79$; MO - Clo $a r^2 = 0.77$; $p < 0.0001$).

5.2. Análisis de diatomeas totales, clorofila a y fósforo total limológicos

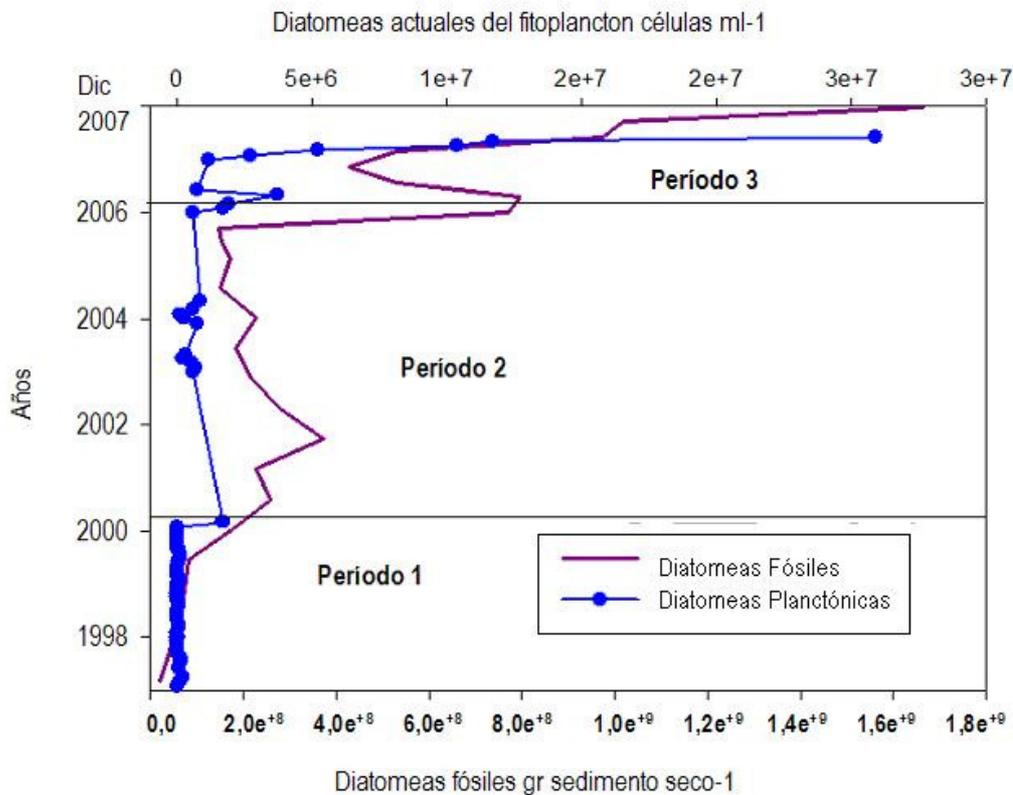


Figura 5. Abundancia de diatomeas planctónicas (línea y círculos azules) calculada a partir de datos limnológicos y diatomeas fósiles (línea violeta) en el testigo a lo largo del tiempo.

La abundancia total de diatomeas planctónicas estuvo altamente correlacionada con la abundancia de diatomeas fósiles encontrada en el testigo para las fechas correspondientes ($r^2 = 0.72$; $p < 0.001$) (Figura 5). En el periodo 1 tanto las abundancias de las diatomeas planctónicas como las fósiles, mostraron valores muy bajos que se mantuvieron hasta el comienzo del periodo 2 donde ambas aumentaron. A comienzos del periodo 3, en enero del 2006 la abundancia crece abruptamente hasta llegar a su valor máximo a fines de este periodo (diciembre del 2007) (Figura 5).

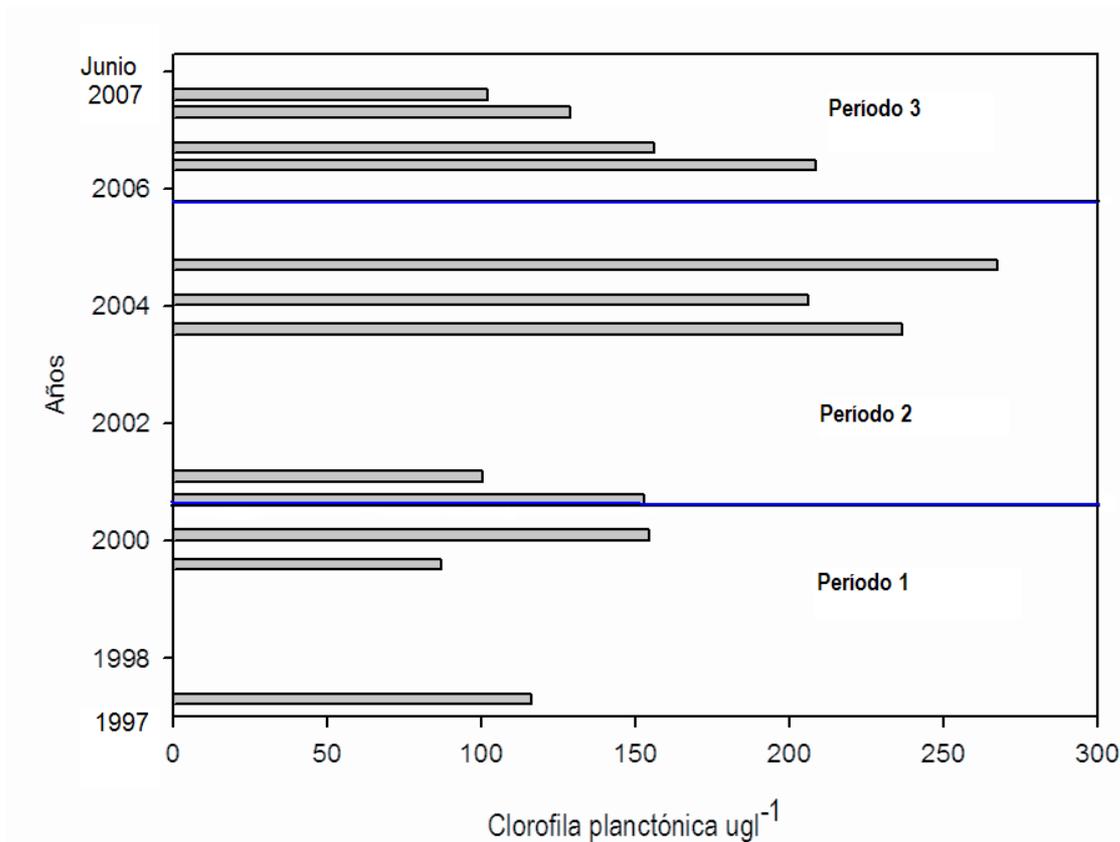


Figura 6. Datos actuales de clorofila a planctónica entre marzo de 1997 y junio de 2007 para los tres períodos descritos en la figura 1 (período 1 = marzo 1997- agosto 2000, período 2 = marzo 2001 – octubre 2005, período 3 = enero 2006 – diciembre 2007, separados por líneas).

En la época que coincide con el período 1 (entre marzo de 1997 y setiembre de 1999), los valores de Clo a planctónica siempre se mantuvieron por debajo de 150 $\mu\text{g l}^{-1}$ (Figura 6). Mientras que en la época que coincide con los períodos 2 y 3 los valores de Clo a fueron siempre mayores a 100 $\mu\text{g l}^{-1}$, alcanzando el valor más alto ($> 250 \mu\text{g l}^{-1}$) en el período 2 (Figura 6).

TABLA 3. Valores promedio y desvío estándar de fósforo total (PT) actuales en el agua para los tres períodos descritos en la figura 1 (período 1 = marzo 1997- agosto 2000, período 2 = marzo 2001 – octubre 2005, período 3 = enero 2006 – diciembre 2007).

PT ($\mu\text{g l}^{-1}$)	Período 1	Período 2	Período 3
Promedio	182.1	631.7	884.7
Desvío estándar	11.65	887.64	1263.19

El PT mostró los valores medios relativamente bajos (máximo 193.5 $\mu\text{g l}^{-1}$) en la época que coincide con el período 1 (Tabla 3). En la época que coincide con los períodos 2 y 3 los valores medios de PT son más altos y los desvíos más grandes (máximo 2147.89 $\mu\text{g l}^{-1}$ en el período 3) (Tabla 3).

6. DISCUSIÓN

Las diatomeas fósiles fueron buenos indicadores y sirvieron para inferir cambios en la comunidad fitoplanctónica y en el estado trófico del lago Rodó. La abundancia total de diatomeas fósiles fue baja durante la rehabilitación y aumentó luego de finalizada esta. Al mismo tiempo la composición y abundancia de las diatomeas fósiles definieron tres períodos diferentes que coincidieron con tres fases distintas en la historia del lago Rodó (Figuras 2 y 5). Por lo tanto los cambios en la estructura de la comunidad de diatomeas fósiles reflejaron cambios en el estado trófico del sistema, coincidiendo con nuestras predicciones número 1 y 3. Por otro lado, otros indicadores paleolimnológicos, como el índice P/B, la diversidad N2 de Hill, la Clo *a* y la MO fósiles, también presentaron diferencias en sus valores durante estos tres períodos coincidiendo con nuestra predicción número 3.

La Clo *a* fósil incluye a todo el fitoplancton y el perifiton del sistema y además probablemente haya sufrido procesos de degradación naturales (Leavitt 1993). Sin embargo, en nuestros resultados observamos que la Clo *a* del fitoplancton y la fósil (fitoplancton y perifiton) mostraron tendencias similares en las fechas comparables (Figuras 4 y 6) lo que nos estaría indicando que la Clo *a* se preservó muy bien. Además, este parámetro tuvo una alta correlación con la composición y abundancia de las diatomeas fósiles y con el resto de los indicadores paleolimnológicos. Esto reafirma que la Clo *a* es un buen indicador de los cambios en la biomasa del fitoplancton y del estado trófico del sistema coincidiendo con nuestra predicción número 2. Por otro lado la MO en los lagos someros proviene de diversas fuentes (Kalf 2002), en el caso particular del Rodó los aportes de las macrófitas comenzaron a ser importantes en las fechas que coincidieron con el del período 2 (Meerhoff 2002). Además la alta correlación entre la Clo *a* y la MO fósil nos indica que los productores primarios son los organismos que más aportan a la producción total del sistema y que por lo tanto la MO es un buen indicador de la producción total del sistema. Esto también coincide con nuestra predicción número 2.

Cambios en la composición y abundancia de diatomeas fósiles en los tres períodos

Durante el primer período determinado por las diatomeas fósiles, las especies más abundantes fueron *Synedra acus* (abundancia relativa de 41%) y *Fragilaria crotonensis* (abundancia relativa de 24%). Estas especies han sido citadas para ambientes templados del hemisferio norte que van desde oligotróficos hasta eutróficos (van Dam *et al.* 1994; NRC 2010), indicando que en estos sistemas la carga de nutrientes no es la variable más importante para explicar su dinámica.

Sin embargo, Wessles *et al* (1999) sugieren que *F. crotonensis* prefiere ambientes mesotróficos, mientras que para sistemas lóticos de Argentina *S. acus* también fue clasificada como especie que habita sistemas mesotróficos (Gómez & Licursi 2001). Por lo tanto, la dominancia de estas especies durante el período 1 podría indicar un estado mesotrófico en nuestro sistema. Esto coincide con el momento en el cual se iniciaron las medidas de rehabilitación que tuvieron como consecuencia el aumento de la transparencia, del oxígeno disuelto, la disminución de la carga de nutrientes y de la biomasa del fitoplancton (Kruk 2001).

En este período (1) el índice P/B tuvo valores bajos indicando que las formas bentónicas o perifíticas, como por ejemplo *A. minutissimum* (22%) y *Nitzschia intermedia* (16%), tuvieron abundancias altas. Además coincidió con valores altos de diversidad. Al aumentar la transparencia, como consecuencia de las medidas de rehabilitación, la luz puede llegar hasta niveles más profundos en el lago y por consiguiente puede haber mayor número de habitats disponibles para el crecimiento de diatomeas. El aumento observado en la diversidad estaría asociado a la presencia de diferentes formas de vida de diatomeas y a la disponibilidad de diferentes sustratos como las macrófitas y los sedimentos (Rodríguez-Gallego 2004). Además el descenso del índice P/B sirve como evidencia de esta hipótesis.

Por otro lado en este período (1), tanto los valores de Clo *a* como los de MO fósil fueron relativamente bajos, indicando menor biomasa de fitoplancton y un sistema con menor producción primaria, lo que coincidió con los datos actuales de fechas comparables. En este sentido, la biomasa del fitoplancton total y el estado trófico, indicados por la Clo *a* y el PT limnológicos, fue más baja comparado con los valores históricos para este sistema. En 1999 se registraron valores de Clo *a* fitoplanctónica de 62.4 $\mu\text{g l}^{-1}$ y PT en agua de 110 $\mu\text{g l}^{-1}$ (Kruk 2001) mientras que en 1992 dichos valores fueron de 335 $\mu\text{g l}^{-1}$ de Clo *a* fitoplanctónica y 1000 $\mu\text{g l}^{-1}$ de PT en agua (Sommaruga 1995). Este descenso ocurrió como consecuencia de la aplicación de las medidas de rehabilitación (Kruk 2001).

En el período 2 las especies de diatomeas fósiles que dominaron fueron *Aulacoseira granulata* (60%) y *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* (36%), ambas planctónicas, céntricas y características de ambientes eutróficos con altos niveles de nutrientes (van Dam *et al.* 1994; Wessels *et al.* 1999; Gong *et al.* 2009; NRC 2010). Esta época coincide con el cese de las medidas de rehabilitación en el lago (Kruk 2001) y con el aislamiento hídrico del sistema en el año 2001 (Lacerot & Kruk 2002). La dominancia de estas diatomeas fósiles en el período 2

estaría indicando un aumento en el nivel trófico del sistema. Esto concuerda con el aumento de la carga de nutrientes y la dominancia por cianobacterias ocurrida en esa época (Meerhoff 2002). Así mismo, en este período, tanto los valores de Clo *a* como de MO fósiles comenzaron a aumentar, indicando un incremento en la biomasa de fitoplancton total y un cambio en el estado trófico del sistema. Los cambios en Clo *a*, MO y diatomeas fósiles indicaron que en este período el sistema se volvió más eutrófico y la población de diatomeas fósiles menos diversa. La eutrofización conduce gradualmente al incremento de la productividad, a la disminución en la diversidad y un deterioro general de la calidad de agua (Kalf 2002).

Por otra parte, en este período (2) el índice P/B tuvo valores altos indicando que las formas planctónicas fueron más abundantes que las bentónicas y las perifíticas y la diversidad disminuyó. Al igual que en el período 1, vemos que la diversidad está asociada al uso de diferentes sustratos por parte de las especies perifíticas. Con el descenso de la transparencia asociado al deterioro de la calidad de agua, la luz no penetra, por lo cual disminuye el crecimiento de especies perifíticas y cuando estas disminuyen su abundancia la diversidad también disminuye. Tanto la abundancia y composición de diatomeas planctónicas y fósiles así como la Clo *a* y el PT limnológicos también aumentaron coincidiendo con la tendencia a la eutrofización, concordando con los resultados de otros autores (Kruk 2001; Meerhoff 2002; Rodríguez-Gallego 2004).

Finalmente en el período 3, la estructura de la comunidad de diatomeas volvió a mostrar cambios siendo las especies dominantes *Stephanodiscus hantzschii* (69%), *Aulacoseira granulata* (17%) y *Achnanthisidium minutissimum* (13%). Las dos primeras son características de ambientes eutróficos e hipereutróficos templados del hemisferio norte (van Dam *et al.* 1994; Wessels *et al.* 1999; NRC 2010) y subtropicales (Gong *et al.* 2009). *Achnanthisidium minutissimum* es una especie que ha sido citada para sistemas templados profundos, y que aparece en lagos desde los polos hasta los trópicos, muy variados desde el punto de vista trófico (NRC 2010). Por lo tanto, si bien es una de las especies que dominan en este período, no fue posible utilizarla como indicador de estado trófico en nuestro sistema. Seguramente, al ser una especie perifítica los cambios en su abundancia estarían más asociados a la penetración de luz y a la disponibilidad de sustratos como macrófitas, que a los cambios en el estado trófico. Esto coincidió con el aumento de la abundancia de *Potamogeton pectinatus* L, (macrófita) que durante los períodos 1 y 2 fue marginal y hacia el período 3 comenzó a ocupar progresivamente el espejo de agua del lago (Rodríguez-Gallego, *com. per.*) A través del cambio ocurrido en la composición y

abundancia de las diatomeas fósiles inferimos que hubo un incremento de nutrientes con respecto al período 2 y que las condiciones se volvieron hipereutróficas.

Por otro lado en este período (3), el índice P/B tuvo valores bajos indicando que las formas bentónicas y perifíticas fueron más abundantes que las planctónicas y la diversidad aumentó, volviendo a estar asociado el aumento en la abundancia de las formas perifíticas a su disponibilidad de sustrato y al aumento de la diversidad. Sin embargo, la dominancia de las especies planctónicas al final de este período explica el aumento del índice P/B y la disminución en la diversidad, coincidiendo con un crecimiento abrupto de la abundancia de *S. Hantzschii*. A su vez los valores de Clo *a* y MO fósiles siguieron creciendo indicando que la biomasa del fitoplancton y la producción total aumentaron y que las condiciones del sistema se volvieron aún más eutróficas. Esto coincidió con lo registrado en este período en el estudio limnológico de Aubriot (2008), quien también encontró un aumento en el estado trófico. A su vez la abundancia y composición de diatomeas planctónicas y fósiles así como la Clo *a* y el PT limnológicos también siguieron aumentando coincidiendo con el proceso de eutrofización. En el año 2007 tanto la abundancia de diatomeas fósiles como actuales llegaron a su valor máximo concordando con los resultados del estudio limnológico de Aubriot (2008). Este autor describió a partir del 2006 un incremento en los valores de fosfato y un reemplazo de cianobacterias por diatomeas, las cuales aumentaron significativamente su abundancia y pasaron a ser el grupo dominante de la comunidad fitoplanctónica, indicando condiciones eutróficas en el sistema, lo que coincide con nuestros resultados.

Tanto la composición y abundancia de las diatomeas, la Clo *a* y la MO fósiles, el índice P/B y la diversidad N2 de Hill variaron a lo largo de los tres períodos. Estos indicadores mostraron condiciones mesotróficas durante la rehabilitación (período 1) y condiciones eutróficas e hipereutróficas en los períodos 2 y 3, coincidiendo con un aumento en la biomasa fitoplanctónica y en el estado trófico del sistema luego de terminadas las medidas de rehabilitación. Por otro lado, los valores de Clo *a* y PT limnológicos también fueron más bajos durante la rehabilitación (período 1) y aumentaron durante los períodos 2 y 3. El perfil temporal de abundancia total de diatomeas fósiles se correlacionó significativamente con el de las diatomeas actuales. Otros autores también utilizaron diatomeas fósiles para evaluar los efectos de la rehabilitación obteniendo resultados positivos tanto en sistemas templados (Valero-Garcés *et al.* 2006) como en sistemas subtropicales (Engstrom *et al.* 2006) y también definieron diferentes períodos en el tiempo desde el punto de vista trófico (Wessels *et al.* 1999; Engstrom *et al.* 2006; Valero-Garcés

et al. 2006; Touvinen & Weckström 2010). En particular y al igual que en nuestro trabajo, Wessels (1999) encontró una alta correlación entre las diatomeas del fitoplancton y las fósiles en el lago Constance (Alemania) en una escala temporal de décadas.

Otros autores, utilizando MO fósil como indicador de estado trófico, obtuvieron resultados similares en sistemas templados. Por ejemplo, Valero-Garcés *et al.* (2006) en su reconstrucción paleolimnológica de miles de años en la laguna Zoñar (España) pudieron registrar cambios tróficos en el sistema. Por otro lado, Touvinen & Weckström (2010) encontraron en el Archipiélago Sea (Suecia - Finlandia) que la MO reflejó un aumento en la eutrofización en las últimas décadas, coincidiendo con las mayores abundancias de diatomeas fósiles. Finalmente, en sistemas subtropicales Engstrom (2006) pudo constatar que el lago Okeechobee (EEUU) experimentó una rápida eutrofización, reflejada en un aumento de la MO y en los pigmentos fósiles. Además, según nuestros resultados tanto la *Clo a* como la MO fósil se correlacionaron muy bien con las diatomeas fósiles. En este sentido Riedinger-Whitmore (2005) estudió una serie de lagos subtropicales dominados por cianobacterias en Florida (EEUU) y también encontró una alta relación entre la eutrofización, la clorofila y las diatomeas fósiles.

La eutrofización es un proceso que ocurre en escalas temporales cortas (años a décadas) como respuesta a las actividades humanas que impactan el régimen natural de ingreso de nutrientes a un sistema. Se puede destacar la alta resolución temporal de nuestro trabajo ya que correlacionamos datos fósiles y actuales en 3 períodos claramente diferenciados en un testigo de tan solo 10 años, lo cual hace que este método sea excelente para evaluar eutrofización (Engstrom *et al.* 2006; Touvinen & Weckström 2010).

Al igual que nosotros, otros autores también han combinado información limnológica con paleolimnológica para determinar aumentos en el estado trófico en relación con cambios en la comunidad de diatomeas fósiles, incremento del PT, biomasa de fitoplancton total (Wessels *et al.* 1999; Touvinen & Weckström 2010) y clorofila (Riedinger-Whitmore *et al.* 2005). Es importante combinar y comparar datos paleolimnológicos con datos limnológicos ya que ambos enfoques son complementarios. Los datos paleolimnológicos a gran escala pueden ser combinados con datos limnológicos más recientes y utilizados para reconstruir la historia de un sistema y generar predicciones a futuro (Battarbee *et al.* 2005). Si bien a nivel mundial se han realizado varias reconstrucciones paleolimnológicas para evaluar medidas de rehabilitación y condiciones tróficas pasadas, como ya mencionamos, la mayoría de estos trabajos fueron realizados en sistemas

templados del hemisferio Norte y no siempre se contó con datos limnológicos para contrastar con la información paleolimnológica obtenida. Por esto nuestros resultados demuestran el valor de usar la paleolimnología y las diatomeas fósiles como una herramienta de evaluación y monitoreo en lagos eutróficos subtropicales. Esta herramienta puede ser muy útil en lagos donde no haya antecedentes o estudios a largo plazo, para conocer el estado natural del sistema.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Antoniades D., Crawley C., Douglas M., Pienitz R., Andersen D., Doran P.T., Hawes I., Pollard W. & Vincent W. (2007). Abrupt environmental change in Canada's northernmost lake inferred from fossil diatom and pigment stratigraphy. *Geophysical Research Letters* **34**: L18708, doi:10.1029/2007GL030947
- Antoniades D., Hamilton P., Douglas M. & Smol J.P. (2008). *Diatoms of North America: The freshwater floras of Prince Patrick, Ellef Ringnes and northern Ellesmere Islands from the Canadian Arctic Archipelago. Iconographia Diatomologica*. v. 17, Koeltz, Königstein, 649 pp.
- Aubriot L. (2008). *Flexibilidad de la cinética de incorporación de fosfato por fitoplancton a las fluctuaciones en el suministro del nutriente*. Tesis de Doctorado. PEDECIBA Biología, opción Ecología, Universidad de la República. Montevideo, 130 pp.
- Battarbee R. (1986). Diatom analysis. In: *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology* (E. BB ed). John Wiley & Sons Ltd. Chichester, 527-570 pp.
- Battarbee R., Anderson N., Jeppensen E. & Leavitt P. (2005). Combining palaeolimnological and limnological approaches in assessing lake ecosystem response to nutrient reduction. *Freshwater Biology* **50**: 1772-1780
- Bonilla S. (ed.) (2009). *Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión*. Documento Técnico PHI-LAC N°16. Montevideo, 94 pp.
- Conde D. (2009). Capítulo 3: Eutrofización, cambio climático y cianobacterias. In: *Cianobacterias Planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión* (Bonilla S ed). Documento Técnico PHI-LAC, N°16. MONTEVIDEO, 12-15 pp.
- Dean W. (1974). Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Research* **44**: 242-248
- Engstrom D., Schottler S., Leavitt P. & Havens K. (2006). A re-evaluation of the cultural eutrophication of Lake Okeechobee using multiproxy sediment record. *Ecological Applications* **16**: 1194-1206
- García-Rodríguez F. (2006). Inferring paleosalinity trends using the chrysophyte cyst to diatom ratio in coastal shallow temperate/subtropical lagoons influenced by sea level changes. *Journal of Paleolimnology* **36**: 165-173
- García-Rodríguez F., Mazzeo N., Sprechmann P., Metzeltin D., Sosa F., Treutler H.C., Renom M., Scharf B. & Gaucher C. (2002). Paleolimnological assessment of human impacts in Lake Blanca, SE Uruguay. *Journal of Paleolimnology* **28**: 457-468
- García-Rodríguez F., Sprechmann P., Metzeltin D., Scafati L., Melendi D., Volkheimer W., Mazzeo N., Hiller A., von Tümpling Jr W. & Scasso F. (2004). Holocene trophic state changes in relation to sea level variation in Lake Blanca, SE Uruguay. *Journal of Paleolimnology* **31**: 99-115
- Gómez N. & Licursi M. (2001). The Pampean Diatom Index (IDP) for assessment of rivers and streams in Argentina. *Aquatic Ecology* **35**: 173-181
- Gong Z.-j., Li Y.-l., Shen J. & Xie P. (2009). Diatom community succession in the recent history of a eutrophic Yunnan Plateau lake, Lake Dianchi, in subtropical China. *Limnology* **10**: 247-253
- Hill M.O. (1973). Diversity and Evenness: A Unifying Notation and Its Consequences. *Ecology* **2**: 427-432
- Jeffrey S., Mantoura R. & Wright S. (1997). *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods*. Paris, 661 pp.
- Kalff J. (2002). *Limnology*. Prentice Hall. New Jersey, 592 pp.

- Krammer K. & Lange-Bertalot H. (1991). *Sübwasserflora von Mitteleuropa. Bacillariophyceae, Band 2/3, 3 Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae*. Stuttgart, 576 pp.
- Kruk C. (2001). *Sucesión fitoplanctónica en un lago hipereutrófico en proceso de restauración*. Tesis de Maestría. PEDECIBA Biología, opción Ecología, Universidad de la República. Montevideo, 107 pp.
- Lacerot G. & Kruk C. (2002) Estudio del control por predación de la comunidad fitoplanctónica en un lago somero hipereutrófico. Informe Final CSIC Iniciación. Montevideo, Facultad de Ciencias, Sección Limnología, Universidad de la República. 31 pp.
- Leavitt P.R. (1993). A review of factors that regulate carotenoid and chlorophyll deposition and fossil pigment abundance. *Journal of Paleolimnology* **9**: 109-127
- Meerhoff M. (2002). *Efecto de la presencia de hidrófitas en la estructura de las comunidades de zooplancton y peces un lago hipereutrófico somero*. Tesis de Maestría. PEDECIBA Biología, opción Ecología, Universidad de la República. Montevideo, 123 pp.
- Meerhoff M., Mazzeo N., Moss B. & Rodríguez-Gallego L. (2003). The structuring role of free-floating versus submerged plants in a subtropical shallow lake. *Aquatic Ecology* **37**: 377-391
- Metzelin D., Lange-Bertalot H. & García-Rodríguez F. (2005). *Iconographia Diatomologica. Diatoms of Uruguay*. v. 15, Königstein, 736 pp.
- NRC (2010). Natural Resources Canada - Canadian Diatom Database: www.nrcan.gc.ca.
- Riedinger-Whitmore M., Whitmore T., Smoak J., Brenner M., Moore A., Curtis J. & Schelske C. (2005). Cyanobacterial proliferation is a recent response to eutrophication in many Florida Lakes: a paleolimnological assessment. *Lake and Reservoirs Management* **21**: 423-435
- Rodríguez-Gallego L. (2004). *Estrategias para el control de la carga de nutrientes del Lago Rodó*. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Montevideo, 105 pp.
- Scasso F., Mazzeo N., Gorga J., Kruk C., Lacerot G., Clemente J. & Bonilla S. (2001). Limnological changes in a sub-tropical shallow hypertrophic lake during its restoration: two years of a whole-lake experiment. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* **11**: 31-44
- Schelske C. & Kenney W. (2001). Model erroneously predicts failure for restoration of Lake Apopka, a hypereutrophic, subtropical lake. *Hydrobiologia* **448**: 1-5
- Smol J.P. (2002). *Pollution of lakes and rivers: a paleoenvironmental perspective*. Blackwell Publishers. Londres, 280 pp.
- Sommaruga R. (1995). Microbial and classical food webs: a visit to a hypertrophic lake. *Microbiology Ecology* **17**: 257-270
- Stoermer E. & Smol J. (1999). *The Diatoms: applications for the Environmental and Earth Sciences*. Cambridge University Press. Cambridge, 469 pp.
- ter Braak C. (1986). Canonical correspondence analyses: a new eigenvector technique for multivariate ecology. *Ecology* **67**: 1167-1179
- Touvinen N. & Weckström K. (2010). Assessment of recent eutrophication and climate influence in the Archipelago Sea based on the subfossil diatom record. *Journal of Paleolimnology* **44**: 95-108
- Valero-Garcés B., González-Sampériz P., Navas A., Machín J., Mata P., Delgado-Huertas A., Bao R., Moreno A., Carrion J., Schwab A. & González-Barrios A. (2006). Human impact since medieval times and recent ecological restoration in a Mediterranean lake: Laguna Zoñar, southern Spain. *Journal of Paleolimnology* **35**: 441-465

- van Dam H., Mertens A. & Sinkeldam J. (1994). A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* **28**: 117-133
- Wessels M., Mohaupt K., Kümmerlin R. & Lenhard A. (1999). Reconstructing past eutrophication trends from diatoms and biogenic silica in the sediment and the pelagic zone of Lake Constance, Germany. *Journal of Paleolimnology* **21**: 171-192
- Wetzel R. (1983). *Limnology*. CBC College Publishing. Filadelfia, 755 pp.
- Whitton B. & Potts M. (2000). *The ecology of cyanobacteria*. 1 ed. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, 669 pp.

ANEXO I

Lámina con especies de diatomeas fósiles encontradas en el lago Rodó

Figura 1. *Cyclotella meneghiniana* Kützing 1844

Figura 2. *Cyclotella stelligera* Cleve & Grunow 1882

Figura 3. *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen 1979

Figura 4. *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* (O.F.Müller) Simonsen 1979

Figuras 5 y 6. *Stephanodiscus hantzschii* Grunow 1880

Figura 7. *Synedra acus* Kützing 1844

Figuras 8. y 9. *Achnantheidium minutissimum* (Kützing) Czarnecki 1994

Fig.8. Vista Valvar, **Fig. 9.** Vista Cingular

Figura 10. *Cocconeis placentula* Ehrenberg 1838

Figuras 11 y 12. *Amphora veneta* Kützing 1844

Fig.11. Vista Valvar, **Fig.12.** Vista Valvar

Figuras 13 y 14. *Epithemia adnata* (Kützing) Brébisson 1838

Fig.13. Vista Valvar, **Fig.14.** Vista Cingular

Figura 15. *Epithemia sorex* Kützing 1844

Figura 16. *Gomphonema parvulum* (Kützing) H.F.Van Heurck 1880

Figura 17. *Gomphonema* sp. Ehrenberg, 1832

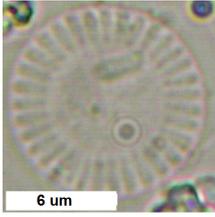
Figura 18. *Gomphonema batei* Metzeltin, Lange-Bertalot & García-Rodríguez 2005

Figura 19. *Navicula* sp. Bory de Saint-Vicent 1822

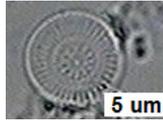
Figura 20. *Pinnularia* sp. Ehrenberg 1843

Figura 21. *Nitzschia intermedia* Hantzsch ex Cleve & Grunow 1880

Figura 22. *Surirella ovalis* Brébisson 1838



1



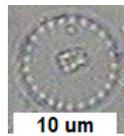
2



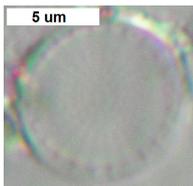
3



4



5



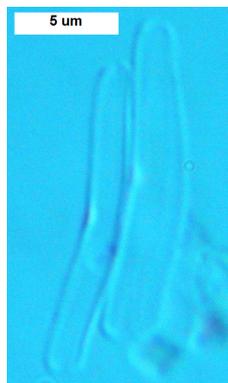
6



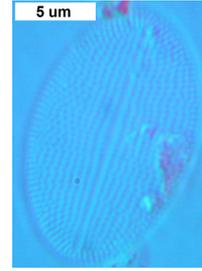
7



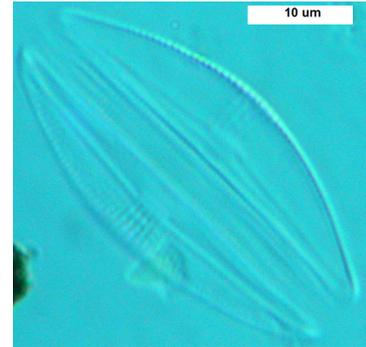
8



9



10



11



12



13



14



17



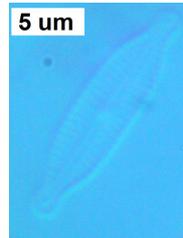
20



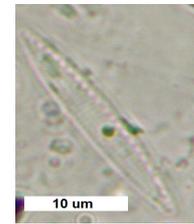
15



18



19



21



16



22