

Evolución trófica de Laguna Grande de San Pedro (VIII Región, Chile) durante el último siglo, mediante el análisis de registros sedimentarios

Trophic evolution of Laguna Grande de San Pedro (VIII Region, Chile) during the last century, by means of the analysis of sedimentary records

FABIOLA CRUCES¹, ROBERTO URRUTIA¹, ALBERTO ARANEDA¹, LAURA TORRES¹,
MARCO CISTERNAS¹ & WIM VYVERMAN²

¹Centro Universitario Internacional Europa-Latinoamérica de Investigación y Formación de Ciencias Ambientales (EULA), Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile,
e-mail: facruces5@yahoo.com

²Department of Biology, Section of Protistology & Aquatic Ecology, University of Gent, Belgium

RESUMEN

La presente investigación realizó una reconstrucción de la evolución trófica de Laguna Grande de San Pedro (VIII Región, Chile) durante el último siglo, a través del análisis estratigráfico de diatomeas y registros geoquímicos preservados en un núcleo de sedimento obtenido en el lago. Los resultados obtenidos señalan que la comunidad de diatomeas ha variado su composición a través del tiempo, reconociéndose cuatro períodos distintos, que representan cada uno de ellos una condición trófica diferente. Por otra parte, los registros geoquímicos aumentan sus tasas de acumulación hacia los estratos superficiales del perfil, evidenciando un aumento de la productividad hacia la actualidad. De acuerdo a lo anterior, es posible concluir que la productividad de Laguna Grande ha experimentado importantes cambios, evolucionando desde un sistema oligo-mesotrófico (período más antiguo) a uno eutrófico (período reciente). Los cambios más drásticos habrían sucedido en las últimas décadas, como respuesta al fuerte desarrollo de actividades forestales y de urbanización en la cuenca de este sistema.

Palabras clave: trofia, diatomeas, nutrientes, sedimento, paleolimnología.

ABSTRACT

This research reconstructs the trophic evolution of Laguna Grande de San Pedro (VIII Region, Chile) during the last century, through both the stratigraphic analyses of diatom remains and geochemical parameters preserved in a sediment core obtained in this lake. The results obtained show that the community of diatoms has changed its composition throughout time, showing four different periods, representing each one a distinctive trophic condition. On the other hand, the geochemical records increase their accumulation rates to the profile surface layers, making evident an increase of the productivity to the present time. In this context, it is possible to conclude that the productivity at Laguna Grande has experienced significant changes, evolving from an oligo-mesotrophic system (earlier period) to an eutrophic one (recent period). The most drastic changes would have happened during the last decades, as response to both the intense development of urbanization and forest activities in the basin of this lake.

Key words: trophy, diatoms, nutrients, sediment, paleolimnology.

INTRODUCCIÓN

En nuestro país existe una gran cantidad de sistemas lacustres con graves problemas de eutroficación, debido principalmente, al vertido de aguas residuales con una alta carga orgánica (Parra 1989, Parra et al. 1989¹). Este aporte de material orgánico, generado fundamentalmente

por actividades antrópicas, ha acelerado el proceso natural de enriquecimiento de nutrientes en los lagos (Boughey 1971, Hecky 1993). Frente a este problema, es necesario diferenciar los niveles de nutrientes en "condiciones naturales", de aquellos influenciados por el hombre, a fin de definir objetivos ante un eventual plan de recuperación de estos sistemas (Schindler 1987, Smol 1995).

Para ello es necesario contar con una serie de datos de largo término, muchas veces inexistente, que permita reconocer la evolución del lago. Ante esta falta de información, que no sólo afecta a los lagos de nuestro país, algunos investigadores han reconocido en los registros sedimentarios lacustres,

¹PARRA O, C JARA & L GUZMÁN (1989) Las lagunas interurbanas de Concepción: estado actual y perspectivas de recuperación y uso. CIPMA, tercer encuentro científico del medio ambiente. Concepción, Chile.

una fuente de valiosa información que permite inferir las características pasadas de estos ambientes (Smeltzer & Swain 1985, Smol 1992). Lo anterior es posible, debido a que los sedimentos almacenan entre sus capas indicadores químicos, geoquímicos y biológicos de los procesos que ocurren en la columna de agua y de los aportes que el lago recibe desde su cuenca (Smol & Glew 1992).

Las diatomeas son uno de los indicadores biológicos más utilizados en estudios paleolimnológicos, debido a su sensibilidad frente a variaciones en el contenido de nutrientes y pH en la columna de agua (Findlay et al. 1998, Joachim & Müller 1999). De esta forma, el análisis de la estructura de sus comunidades puede ser relacionado con las condiciones tróficas históricas experimentadas por el cuerpo de agua (Battarbee 1986, Yangdong & Brugam 1997).

No obstante la validez de la información aportada por las diatomeas respecto de la trofia del lago, es importante complementar dicha información con análisis geoquímicos del sedimento y con las tasas de sedimentación, a fin de estimar la acumulación de nutrientes y compuestos metálicos que se relacionan con la productividad del lago (Charles et al. 1994).

Laguna Grande de San Pedro es un lago urbano situado en la comuna de San Pedro de la Paz en la VIII región (Chile), cuya cuenca ha sido drásticamente modificada con la introducción de plantaciones forestales (pino y eucalipto) y la expansión urbana. Durante las últimas décadas este sistema ha experimentado una fuerte disminución en la calidad de sus aguas, siendo definido como un lago eutrófico, con crecimiento de macrófitas en la zona litoral, presencia de bolsones anóxicos en el fondo y aparición de malos olores (Parra 1989). Sin embargo, la información histórica sobre las condiciones limnológicas de este sistema es escasa y parcial, lo que hace difícil distinguir entre su evolución trófica natural y aquella provocada por el hombre.

De acuerdo a lo planteado anteriormente, la presente investigación pretende realizar una reconstrucción de la evolución trófica de Laguna Grande de San Pedro durante el último siglo, a través del análisis de las diatomeas y registros geoquímicos presentes en una columna sedimentaria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Laguna Grande de San Pedro es un lago urbano somero que se ubica en la parte noroccidental de

la cordillera de Nahuelbuta ($36^{\circ} 51' S$, $73^{\circ} 06' O$), al sur del río Biobío, y aproximadamente a 5 km de la ciudad de Concepción. En el lado oriental se encuentra rodeada por un cordón montañoso que alcanza los 350 m de altura, del cual se descuelgan pequeños valles y quebradas (Acencio 1994). El sector norte de la cuenca ha experimentado un fuerte desarrollo urbano y actualmente se encuentra ocupado por la villa San Pedro (Fig. 1).

Las principales características morfométricas de Laguna Grande se resumen en Tabla 1.

Obtención muestras de sedimento

A través de un ecosonda se determinó el punto más profundo de Laguna Grande de San Pedro,

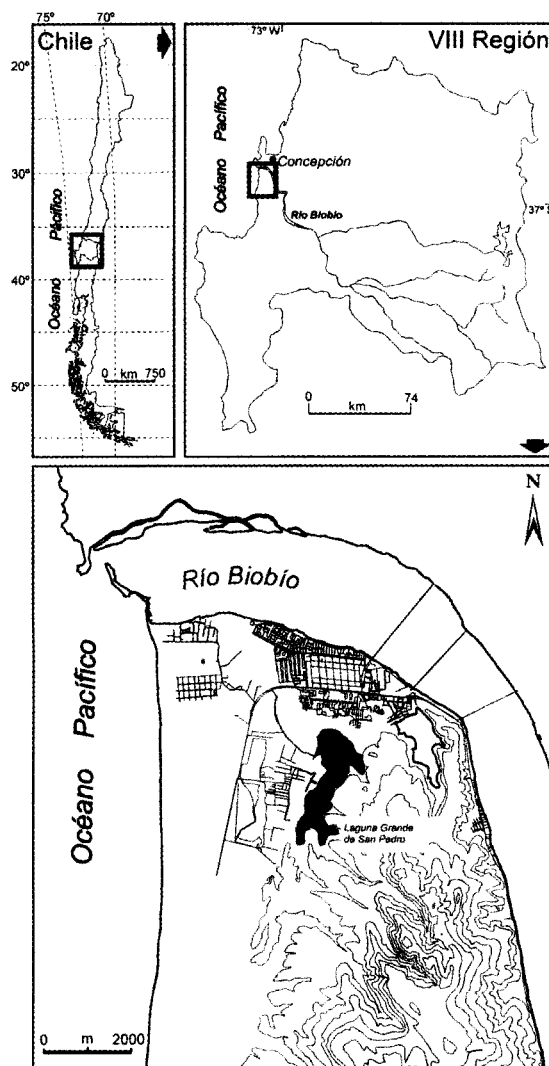


Fig. 1: Área de estudio.
Study area.

TABLA 1

Características morfométricas de Laguna Grande de San Pedro

Morphometric characteristics of Laguna Grande de San Pedro

Variables morfométricas	
Area de la cuenca (m ²)	12.670.000
Area del espejo de agua (m ²)	1.557.250
Largo máximo (m)	2.675
Ancho máximo (m)	1.375
Perímetro (m)	9.800
Profundidad máxima (m)	13,5
Profundidad media (m)	8,3
Area cuenca / área espejo de agua	8,1
Volumen (m ³)	12.902.877

alcanzando éste una profundidad de 13 m. En este punto se obtuvo un núcleo de sedimento de aproximadamente 70 cm, mediante la utilización de un Gravity Corer, modelo Kayak, provisto de un tubo de plexiglass de 5 cm de diámetro y 1 m de longitud. El material sedimentario obtenido fue sometido a rayos X para descartar evidencias de posibles perturbaciones biológicas o físicas en su depositación. Posteriormente, el núcleo de sedimento fue seccionado a intervalos de 1 cm.

Para el presente trabajo se analizaron los primeros 14 centímetros extraídos, debido a que según la geocronología utilizada, éstos representan un período de tiempo aproximado a los 100 años.

Preparación material biológico

Se tomó 0,1 g de sedimento seco de cada estrato y se sometió a una oxidación con ácidos fuertes, de acuerdo a la metodología descrita por Hasle & Fryxell (1970). Posteriormente, se procedió a la realización de muestras permanentes, para lo cual se dejó sedimentar una gota de muestra sobre un portaobjetos, el que finalmente fue fijado con resina Hyrax (IRM = 1,7).

Se identificaron y contaron entre 500-600 valvas de diatomeas por muestra a lo largo de transectas determinadas arbitrariamente. Para ello se utilizó un microscopio fotónico Carl Zeiss con aumento de inmersión de 1000X. La nomenclatura sigue a Rivera (1970, 1974) y Rivera et al. (1973, 1982) para diatomeas.

Para determinar el número total de diatomeas en cada muestra, se utilizó un hematocitómetro Neubauer (0,100 mm x 0,0025 mm²). Se conta-

ron entre 300 a 350 células y se aplicó un factor 10⁴ para estimar la abundancia total de la muestra.

Especies dominantes

Se estableció un porcentaje mayor o igual a 1 %, en al menos una de las muestras, para determinar una especie como dominante. Se excluyó en el análisis de la evolución trófica las abundancias alcanzadas por *A. granulata*, debido a su dominancia absoluta respecto al resto de las especies de diatomeas presentes en los sedimentos. Tampoco se considera esta especie como indicadora de una condición trófica determinada, debido a que por algunos autores es definida para ambientes de alta productividad (Gaillard et al. 1991), en tanto que Campos et al. (1990, 1992) la identifican como dominantes en lagos oligotróficos del sur de Chile.

Análisis químico

Materia orgánica (MO): Esta fracción de la muestra se determina por diferencia de peso, una vez que las muestras son incineradas a 550 °C por 4 h (Byers et al. 1978).

Fósforo total (P): Para la preparación de la muestra se utilizó ácido sulfúrico y peroxodisulfato de potasio, y en su determinación se midió PO₄, mediante el método colorimétrico del azul de molibdeno (Jackson 1964).

Sílice biogénica (Sib): El método utilizado para la determinación de sílice involucró dos procesos; primero se realizó una extracción del compuesto desde la matriz de sedimento con ácido clorhídrico y peróxido de hidrógeno. Luego, se realizó la medición de la sílice disuelta por espectrofotometría, según el método del azul de molibdeno modificado de Mortlock & Froelich (1989).

Aluminio (Al), fierro (Fe) y manganeso (Mn): Para su determinación, las muestras fueron sometidas a una digestión con ácidos, de acuerdo a la metodología de Fusco (1972) y fueron analizadas mediante un espectrofotómetro de absorción atómica.

Tasas de acumulación

Las tasas de acumulación (valvas, o mg cm⁻² año⁻¹) de diatomeas, nutrientes y metales fueron obtenidas multiplicando la concentración (valvas g⁻¹, o mg g⁻¹) por la tasa de sedimentación (g cm⁻² año⁻¹) del estrato correspondiente, según la metodología de Anderson (1994).

Geocronología y tasas de sedimentación

Se utilizaron los datos cronológicos y las tasas de sedimentación obtenidos por Cisternas (resultados no publicados), mediante la utilización del radioisótopo natural ^{210}Pb (Tabla 2).

Análisis de datos

Para la interpretación de los datos se realizó un análisis de Cluster con el programa Tilia Graph (Grimm 1991), obteniéndose de este modo los agrupamientos de los estratos en la columna sedimentaria. La diversidad de diatomeas se determinó mediante el índice de Shannon (Odum 1985).

RESULTADOS

Comunidad de diatomeas

El análisis taxonómico de las diatomeas presentes en los sedimentos de Laguna Grande de San Pedro, permitió identificar un total de 74 taxa, distribuidos en 28 géneros, siendo *Fragilaria* (10 especies), *Navicula* (nueve especies), *Gomphonema* (seis especies) y *Cymbella* (cinco especies), los géneros con mayor número de especies. De los taxa identificados, solamente un 19 % presentó abundancias mayores a 1 % en al menos

TABLA 2

Geocronología y tasas de sedimentación para Laguna Grande de San Pedro

Geochronology and sedimentation rates for Laguna Grande de San Pedro		
Profundidad del sedimento (cm)	Cronología (años)	Tasa de sedimentación ($\text{mg cm}^{-2} \text{año}^{-1}$)
1	1995	56,26
2	1994	52,05
3	1992	46,64
4	1988	31,28
5	1984	28,83
6	1980	26,57
7	1975	27,03
8	1968	16,10
9	1962	23,58
10	1957	26,06
11	1943	9,19
12	1936	20,60
13	1918	6,90
14	1892	4,58

una de las muestras, siendo éstas definidas como "dominantes", y el 81 % restante presentó abundancias menores al 1 %.

La riqueza de especies fluctuó a través del tiempo desde un mínimo de 12 especies en el estrato 11, a un máximo de 28 en el centímetro superficial de la columna sedimentaria. Los mayores cambios se observaron entre los estratos 6 y 16 con oscilaciones permanentes en el número de especies. Por su parte, el índice de diversidad de Shannon también presentó variaciones en todo el perfil, presentando una leve tendencia a disminuir sus valores hacia los estratos superficiales (Fig. 2).

De acuerdo al análisis de cluster, las asociaciones de diatomeas identificadas en el perfil sedimentario, pueden ser divididas en cuatro períodos o zonas; el primero (zona I), constituido por los centímetros 20 a 16; el segundo (zona II), que comprende los estratos 15 a 10; el tercero (zona III), que abarca los centímetros del 9 al 5; y finalmente el cuarto período, constituido por los 4 centímetros superficiales (Fig. 3).

ZONA I: PERÍODO PRE-CA.1890 (20-16 CM)

Diatomeas

Esta zona, de acuerdo a su ubicación en la columna sedimentaria y la geocronología utilizada, podemos considerarla como la condición ambiental de base que presentaba Laguna Grande antes de 1890. Por ello, se considera este período como aquel que refleja las condiciones limnológicas del cuerpo de agua en su estado natural, previo a la fuerte intervención del hombre en el área.

La comunidad de diatomeas en este período se caracterizó por la dominancia de *A. granulata*, *C. stelligera*, *F. pinnata* y *F. construens*. De éstas, *A. granulata* presentó las mayores abundancias, alcanzando un máximo de 76 % en el estrato 20, y mantuvo un alto porcentaje en el resto de los estratos con un promedio de 51 %. Destaca también el 29 % de abundancia que presenta *C. stelligera* en el centímetro 19, después de lo cual disminuye hacia los estratos superiores de esta zona. Por su parte, *F. pinnata* y *F. construens* alcanzaron abundancias inferiores a las anteriores, con un promedio de 11,3 y 3 %, respectivamente, no obstante, ambas especies presentaron una leve tendencia a aumentar sus abundancias hacia los estratos superiores. También fue posible apreciar la aparición de *C. distinguenda* en el centímetro 19, desapareciendo posteriormente y

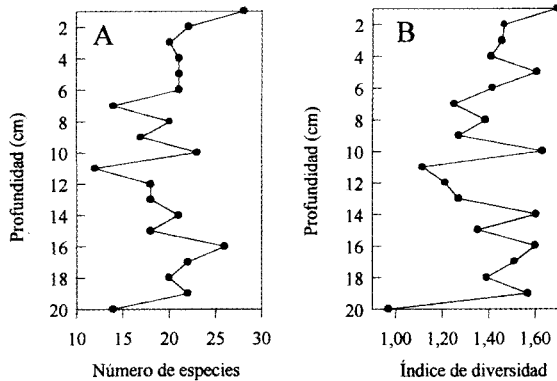


Fig. 2: Riqueza de especies (A) e índice de diversidad en el perfil (B) sedimentario de Laguna Grande de San Pedro.

Species richness (A) and diversity index (B) in the sedimentary profile of Laguna Grande de San Pedro.

reapareciendo en el centímetro 16 de este período.

Las poblaciones de diatomeas dominantes durante este período, representan por una parte a especies características de ambientes con bajos niveles de nutrientes, y por otra, a especies que se encuentran en todo el gradiente trófico. En el primer caso están las especies del género *Fragilaria* (Rivera 1974, Gaillard et al. 1991), y en el segundo *A. granulata* y *C. stelligera*.

Geoquímica

Esta zona se caracterizó por presentar las mayores concentraciones de P y Sib en todo el perfil (Fig. 3). La concentración de P varió entre 0,745 mg g⁻¹ y 0,667 mg g⁻¹, con un valor medio de 0,710 mg g⁻¹. Por su parte, la Sib varió entre 63,026 mg g⁻¹ y 14,546 mg g⁻¹, con una concentración promedio de 52,069 mg g⁻¹. Las concentraciones de Fe, Mn y Al en tanto, se mantuvieron sin grandes variaciones, presentando valores medios de 48 mg g⁻¹, 545 mg g⁻¹ y 38 mg g⁻¹, respectivamente (Fig. 4).

Además, este período muestra un aumento en el contenido de materia orgánica hacia los estratos superiores y una alta acumulación de valvas de diatomeas en los sedimentos.

ZONA II: PERÍODO CA. 1890-1957 (15-10 CM)

Diatomeas

De acuerdo a la geocronología, este período representa las asociaciones de diatomeas predomi-

nantes en Laguna Grande durante la primera mitad de este siglo.

La comunidad de diatomeas se caracterizó por la dominancia de *A. granulata*, *A. lanceolata*, *C. stelligera*, *C. distinguenda*, *F. pinnata* y *F. construens*. Al igual que en el período pre-1890, *A. granulata* domina ampliamente con una abundancia promedio de 61 %. *C. stelligera*, en tanto, continúa con una tendencia a disminuir sus abundancias, alcanzando un mínimo de 5,9 % al final de este período. *C. distinguenda* mantiene bajas abundancias, con un promedio de 1,9 %, alcanzando un máximo de 6,5 % en la parte superior de esta zona. Por su parte, *A. lanceolata* y *F. pinnata* mantienen sus abundancias sin grandes variaciones con un 1,3 y 11,1 %, respectivamente. Finalmente, *F. construens* presentó una abundancia de 4,8 %, alcanzando un máximo de 7,2 % en el estrato 15 del perfil y uno de 6,9 % en el 11. También destacó al final del período, la aparición de *A. formosa* con una abundancia de 10 % en el estrato 10.

Se mantienen en la comunidad aquellas especies de amplia distribución trófica, y aquellas determinadas sólo para ambientes de baja productividad. Se incorporan además, las especies *C. distinguenda* y *A. formosa*, las que han sido definidas para ambientes de mayor productividad (Lami et al. 1986, Anderson 1990, Findlay et al. 1998).

Geoquímica

En esta zona las concentraciones de P se mantienen sin grandes variaciones en relación a las registradas en el período anterior, presentando en promedio de 0,714. La acumulación de este elemento en tanto, no presentó una tendencia clara, observándose un máximo en el estrato 12 y otro en el 10 (Fig. 5).

Al igual que los elementos anteriores, Al, Mn y Fe mantienen sus concentraciones en esta zona, con valores medios de 38,24 mg g⁻¹, 0,537 mg g⁻¹ y 45,417 mg g⁻¹, respectivamente. No obstante, sus tasas de acumulación aumentaron durante este período, alcanzando un nivel máximo en el estrato 12 y uno mínimo en el 11, siendo ambos puntos coincidentes en la estratigrafía de los tres elementos.

El contenido de materia orgánica, al igual que en la zona I, continúa aumentando hacia los estratos superiores, indicando un incremento continuo de la producción biológica o el aumento de la llegada de aportes alóctonos al lago.

La Sib disminuyó drásticamente en esta zona, con una concentración mínima en los estratos 12

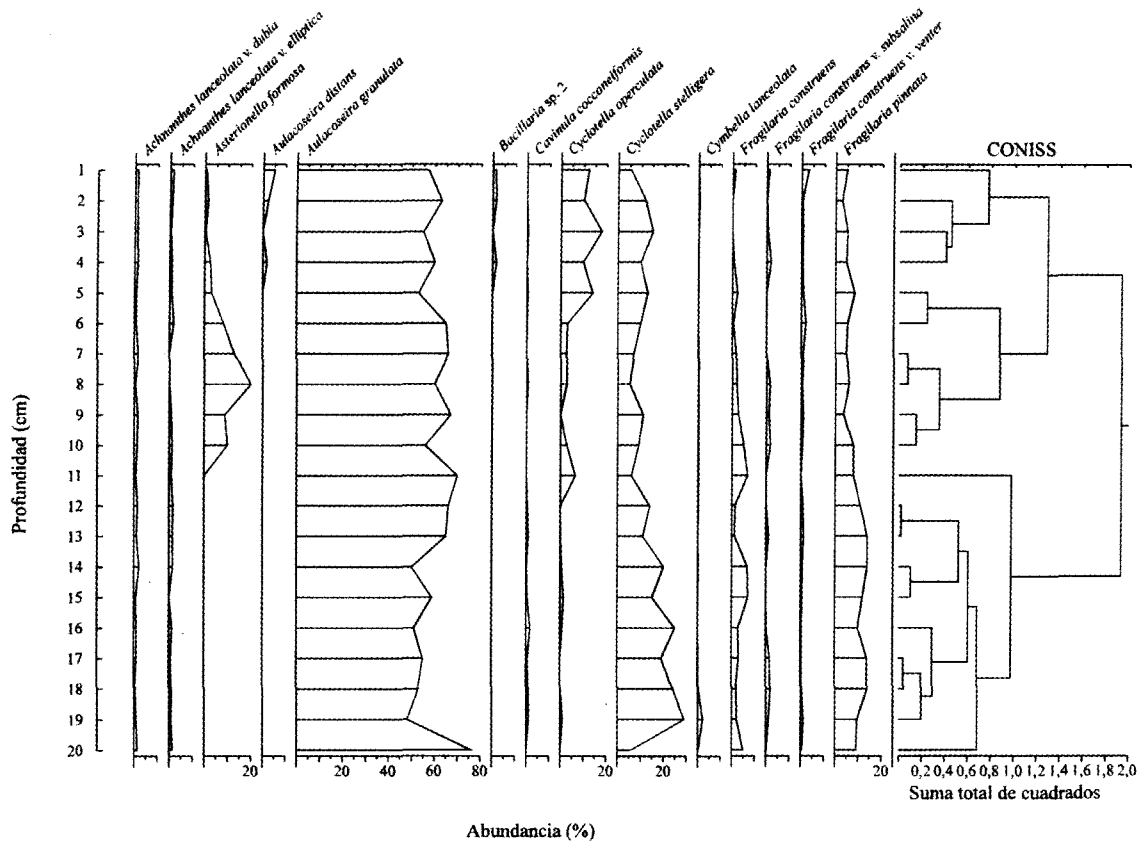


Fig. 3: Abundancia (%) de diatomeas dominantes en el perfil sedimentario de Laguna Grande de San Pedro, y agrupamiento de estratos establecidos por análisis de cluster.

Abundance (%) of dominant diatoms in the sedimentary profile of Laguna Grande de San Pedro, and grouping of layers established by cluster analyses.

y 10. Del mismo modo, se registró una disminución en la tasa de acumulación de este elemento (niveles mas bajos de todo el perfil), lo que estaría reflejando una escasa producción de diatomeas durante este período.

ZONA III: PERÍODO CA. 1958–1980 (9–5 CM)

Diatomeas

Esta zona, representa las comunidades de diatomeas dominantes en el lago durante las décadas del sesenta y setenta. Este corresponde a uno de los períodos de mayor transformación en la cuenca, debido fundamentalmente, a los cambios en el uso del suelo en el área.

Permanecen como especies dominantes en la comunidad: *A. granulata*, *F. pinnata*, *F. construens*, *C. stelligera*, *C. distinguenda* y *A. formosa*. *A. granulata* mantiene una abundancia de 64 %, continuando con la tendencia que presenta desde los estratos inferiores del perfil. *C.*

stelligera y *C. distinguenda* mantienen sus poblaciones sin grandes variaciones, con abundancias de 8,3 y 2 %, respectivamente. Por el contrario, *F. pinnata* y *F. construens* muestran una clara disminución de sus abundancias a medida que se avanza hacia el límite superior de este período, alcanzando *F. pinnata* una abundancia de 4,8 % y *F. construens* 1,7 %, presentando esta última una abundancia mínima de 0,4 % en el estrato 9. Por su parte, *A. formosa* aumenta su abundancia durante este período, presentando un promedio de 12,5 %, con un máximo de 20 % en el estrato 8 del perfil, luego de lo cual comienza a disminuir su abundancia.

La comunidad de diatomeas que representa esta zona, se caracteriza por el aumento de *A. formosa*, que es una especie considerada por diversos autores como típica de ambientes con altos niveles de nutrientes (Anderson 1994), y la disminución de las especies del género *Fragilaria*, que han sido registradas en ambientes de baja productividad y libres de contaminación. Esta tendencia de las especies dominantes en la comunidad, podría estar

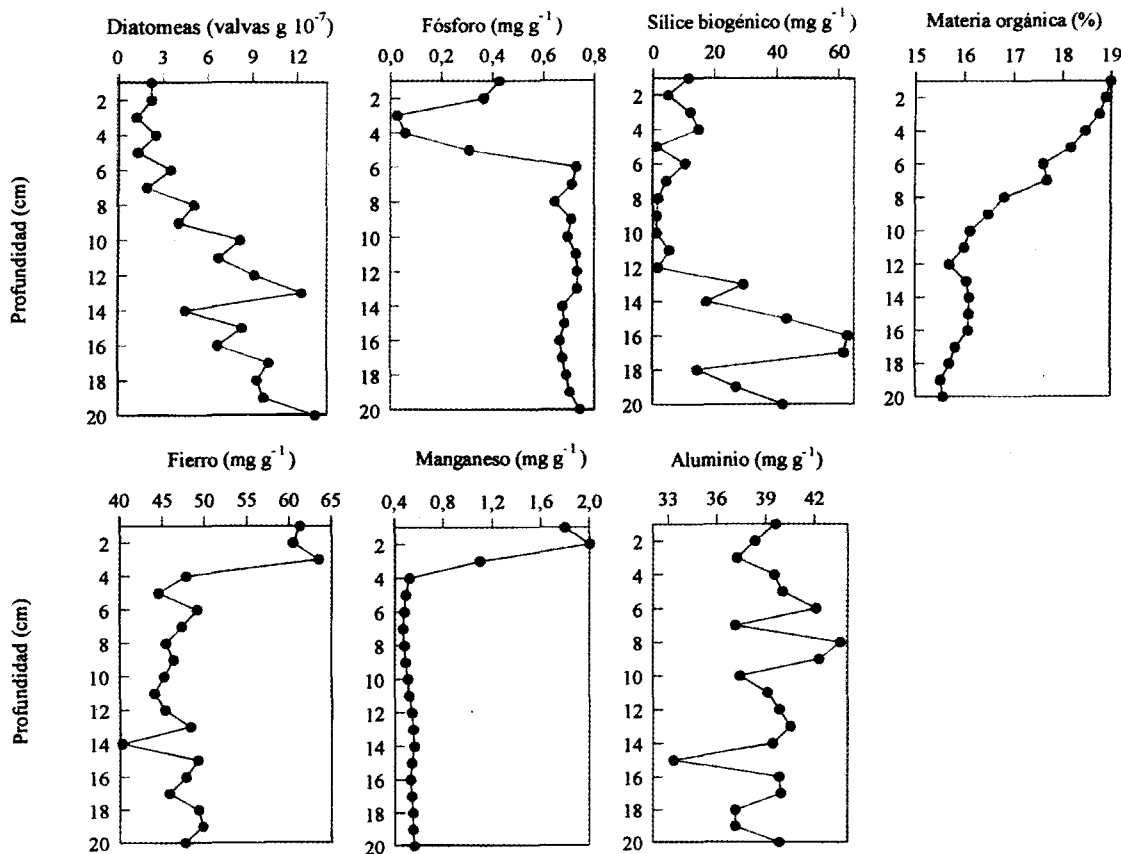


Fig. 4: Concentración de diatomeas y parámetros geoquímicos en el perfil sedimentario de Laguna Grande de San Pedro.

Concentration of diatoms and geochemical parameters in the sedimentary profile of Laguna Grande de San Pedro.

indicando un aumento en el nivel de nutrientes en el lago, principalmente en los estratos correspondientes a la década del setenta.

en este período fueron menores que en las observadas en las zonas I y II, fluctuando entre 10,670 y 1,320 mg g^{-1} .

Geoquímica

Durante este período, las concentraciones de Al, Fe, Mn y P registraron niveles similares a la zona anterior. Sin embargo, la acumulación de éstos aumentó hacia los estratos superiores, alcanzando su máxima acumulación en el estrato 6 del perfil.

Al igual que en las zonas anteriores, el contenido de materia orgánica continúa incrementando hacia los estratos superiores, en tanto que la Sib después de presentar sus mínimas concentraciones al término de la zona anterior, comienza a aumentar paulatinamente. Lo anterior, evidencia un aumento de la producción de diatomeas en el lago, probablemente como una señal del incremento en el aporte externo de nutrientes. No obstante esto último, las concentraciones de Sib

ZONA IV: PERÍODO CA. 1981-1995 (4-1 CM)

Diatomeas

Considerando la profundidad y geocronología de los estratos que abarca esta zona, este período representa las condiciones limnológicas de los últimos 10 años en la historia de Laguna Grande de San Pedro.

Las especies que dominaron las comunidades de diatomeas durante este período fueron: *A. granulata* (58,8%), *C. distinguenda* (12,5%), *C. stelligera* (10,6%), *F. pinnata* (4,4%) y *A. formosa* (1,2%). *A. granulata* mantuvo una abundancia de 59%, continuando con la dominancia que presenta en las asociaciones de diatomeas a lo largo de todo el perfil. Las especies *C. stelligera* y *C. distinguenda* aumentan sus abundancias en rela-

ción al período anterior, alcanzando esta última sus máximas abundancias de todo el perfil, con un promedio de 12,5 % y un máximo de 18 % en el estrato 3. *Fragilaria construens* continúa con la disminución observada en las zonas I y II, presentando durante este período sus menores abundancias en la columna sedimentaria, con ausencia de individuos en los estratos 2 y 3. Por su parte, *F. pinnata* continúa con las bajas abundancias de la zona anterior, en tanto, *A. formosa* disminuyó notablemente sus abundancias, alcanzando un promedio de 1,2 %. Finalmente, destaca la aparición de los taxa *A. distans* y *Bacillaria* sp., con abundancias de 2,3 % y 1,2 %, respectivamente.

Según las diatomeas dominantes en la comunidad, durante este período continúa la disminución de las especies definidas para ambientes con un bajo nivel de nutrientes. Por otra parte, se aprecia un aumento de *C. distinguenda*, que es un taxón que ha sido determinado para ambientes de baja profundidad y ricos en nutrientes (Rivera 1974). De acuerdo a lo anterior, esta comunidad podría

ser considerada como indicadora de la condición eutrófica de Laguna Grande durante la década del ochenta y mediados de los noventa.

Geoquímica

Durante este período se produjo un claro incremento de las concentraciones de Fe y Mn, principalmente en los estratos superficiales. El Fe registró la máxima concentración de todo el perfil en el estrato 3, donde alcanzó un valor de 63,524 mg g⁻¹. Por su parte, el Mn presentó su mayor concentración en el estrato superficial, con un valor de 1,819 mg g⁻¹, casi cuatro veces al observado en las zonas más profundas (zonas I y II). Las tasas de acumulación de ambos elementos presentaron la misma tendencia anterior, alcanzándose la máxima acumulación de todo el perfil en los estratos superficiales.

El P presentó una drástica disminución de su concentración, alcanzando los niveles más bajos en los estratos 3 y 4. Por su parte, la acumulación de este

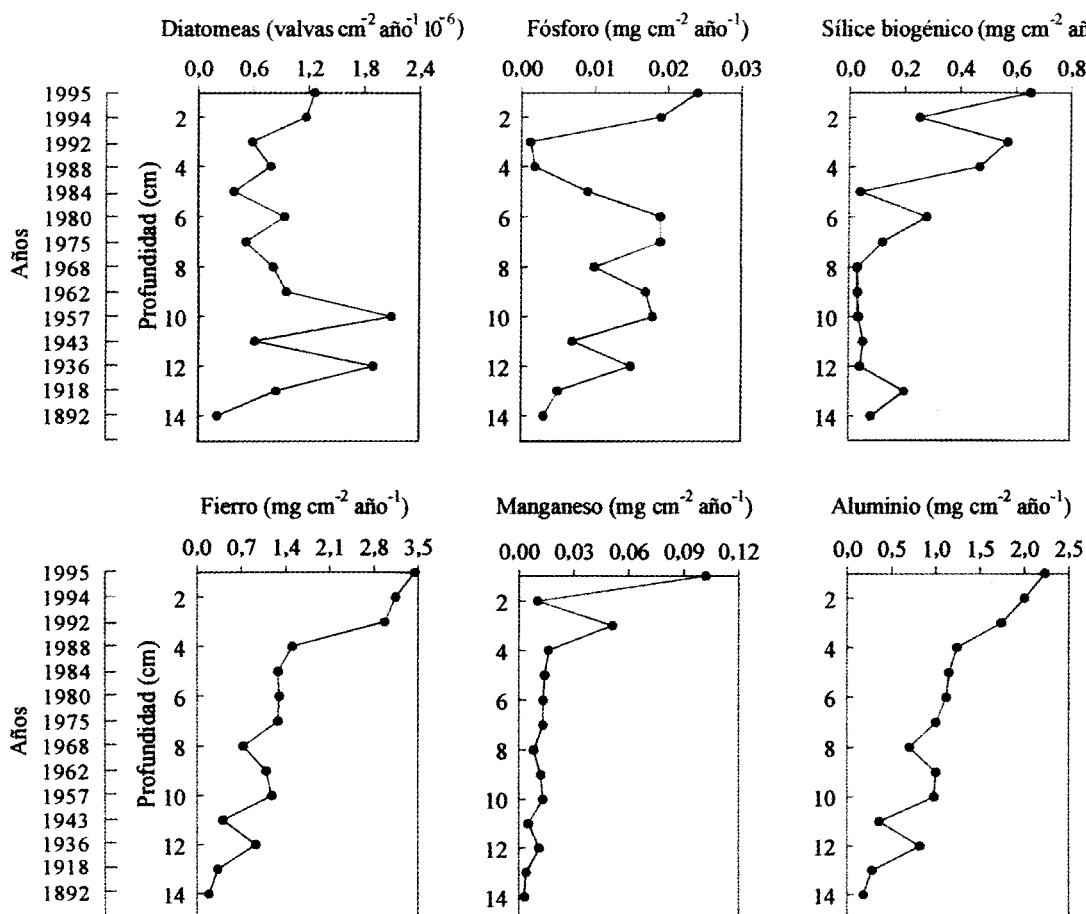


Fig. 5: Acumulación de diatomeas y parámetros geoquímicos en el perfil sedimentario de Laguna Grande de San Pedro.

Accumulation of diatoms and geochemical parameters in the sedimentary profile of Laguna Grande de San Pedro.

elemento en la matriz sedimentaria disminuyó al inicio de este período, después de lo cual se observan las máximas acumulaciones en los estratos 2 y 1.

La Sib evidenció un aumento en su concentración con variaciones permanentes de ella. Por su parte, la tasa de acumulación aumentó hacia los estratos superficiales, con valores, en algunos casos, 10 veces superior a la acumulación de las zonas II y III.

DISCUSIÓN

El análisis estratigráfico de los restos de diatomeas en los sedimentos de Laguna Grande de San Pedro, reveló una composición taxonómica constituida en su mayor parte por muchos taxa con abundancias inferiores a 1 %, y pocas especies con abundancias superiores a este valor, a las que se les llamó "dominantes". Esto refleja una estructura comunitaria típica, donde prevalece claramente un grupo de especies que se mantienen a lo largo de todo el perfil, y cambian sus abundancias fundamentalmente, como respuesta a alteraciones en el medio.

El análisis de la composición taxonómica de las comunidades de diatomeas, permitió establecer un cambio gradual en las especies dominantes a través del tiempo (desde los estratos inferiores a los superiores). Se determinó que el sistema evolucionó de una comunidad dominada por *A. granulata* - *F. pinnata* - *F. construens*, en los estratos más profundos, hasta llegar a un sistema dominado por *A. granulata* - *C. stelligera* - *C. distinguenda* - *A. formosa* - *A. distans* - *Bacillaria* sp. en los estratos superficiales del perfil.

Este reemplazo de especies puede ser interpretado como un cambio en el estado trófico, debido a que en el primer caso predominan especies que, de acuerdo a la bibliografía, son características de ambientes con bajos niveles de nutrientes, y en el segundo, especies propias de ambientes con altos contenidos de P y N, entre otros.

De acuerdo a lo anterior, la zona I representa una condición oligo-mesotrófica del lago, determinada por las especies *F. pinnata*, *F. construens* y *C. stelligera*. Este estado trófico posteriormente cambió, hasta alcanzar un estado de mayor productividad en la zona IV, representado por *C. distinguenda* y *C. stelligera*, especies características de ambientes eutróficos. Los estratos intermedios (zonas II y III) representan la condición intermedia de mesotrofia, caracterizada por la disminución de *F. pinnata* y *F. construens*, y el aumento de *C. distinguenda*, junto con la aparición de *A. formosa*.

Es importante destacar que en el último período (zona IV), que anteriormente fue descrito como eutrófico, se produjo una disminución de *A. formosa* que es un taxón indicador de ambientes eutróficos (Anderson 1990). Lo anterior, posiblemente fue consecuencia de un reemplazo de especies durante este período, en el cual *A. formosa* es sustituida por *A. distans*, *Bacillaria* sp., y *Eunotia* sp. Se descarta el proceso de disolución de los frústulos, debido a que este proceso ocurre en aguas con pH ácidos, y los datos existentes para Laguna Grande durante los últimos años indican valores superiores a siete.

De acuerdo a los cambios determinados en la comunidad de diatomeas de Laguna Grande, es posible inferir que se ha producido un acelerado aumento del estado trófico de este lago durante el último siglo. Lo anterior es corroborado por el aumento en la acumulación de P, Sib y materia orgánica hacia los estratos más actuales, reflejando con ello una mayor productividad del sistema. La disminución de la concentración de estos elementos hacia los estratos superficiales es atribuido a un fenómeno de dilución de los registros hacia la superficie del perfil, como resultado de un aumento en la entrada de material desde la cuenca.

Por su parte, el reemplazo de las especies dominantes se relaciona positivamente con las variaciones del P en los sedimentos, y concuerda con Schindler (1974), quien establece que un adicionamiento continuo y excesivo de P puede afectar negativamente las comunidades de diatomeas oligotróficas, las que son reemplazadas por especies tolerantes a ambientes con un elevado nivel de nutrientes.

Sin embargo, las variaciones del P sedimentario deben ser interpretadas con precaución, puesto que el Fe tiene una gran influencia en la retención de este nutriente a los sedimentos, por lo cual las variaciones de P podrían reflejar cambios en el contenido del Fe en la matriz sedimentaria, más que cambios en su sedimentación, debido a los cambios en la trofia del lago (Engstrom & Wright 1984).

En Laguna Grande, las variaciones de P en la columna de sedimento son interpretadas como un aumento de este nutriente en el cuerpo de agua a través del tiempo, como consecuencia de un mayor contenido de éste en el lago, y no como cambios resultantes de variaciones en el contenido de Fe en los sedimentos. Lo anterior se desprende de la baja correlación ($r = 0,53$, $n = 14$, $P < 0,001$) existente entre las concentraciones de estos elementos, siendo posible inferir que los cambios en el P sedimentario de Laguna Grande podrían ser atribuibles a cambios en la productividad del lago a través del tiempo.

Los cambios en el contenido del P reflejarían un aumento de los nutrientes en el lago hacia los estratos actuales, lo que permitió el aumento de la productividad del sistema durante este período. Lo anterior concuerda con el aumento de las diatomeas sedimentarias y contenido de materia orgánica en el perfil, que alcanzaron sus mayores niveles en la zona IV, respaldando el aumento de la productividad en el lago, como consecuencia fundamentalmente de aportes de P al cuerpo de agua.

Por su parte, el contenido de Fe y Mn muestra un claro aumento en la zona IV del perfil, presentando una tendencia opuesta al modelo de Mackereth (1966), quien establece que en medios con anoxia temporal o permanente, la concentración y acumulación de estos metales es menor que en aquellos que no la presentan. De acuerdo a Parra (1989), Laguna Grande presenta bolsones anóxicos en el fondo, situación que debería favorecer tanto la liberación de estos metales desde los sedimentos a la columna de agua, como el tiempo que permanecen en ella, debido a su mayor solubilidad en medios reductores. Según Engstrom et al. (1985), una posible explicación de este comportamiento es la existencia de un reciclaje de estos elementos a través de la interfase agua-sedimento, que aumenta el transporte de Fe y Mn hacia regiones más profundas del lago, favoreciendo la depositación de los metales en esta área.

En Laguna Grande el aumento en la concentración de Fe y Mn observado en la zona IV, es atribuido al aumento en las tasas de erosión en la cuenca, como consecuencia de los cambios en el uso del suelo durante este período. Lo anterior se debe al aumento en la acumulación de Al en dichos estratos, lo cual evidencia un aporte exclusivamente externo al lago. Además, el aumento en la erosión, y con ello el mayor ingreso de material al lago, respalda la hipótesis planteada anteriormente, en relación a que la mayor entrada de material orgánico e inorgánico provocó una dilución de los registros en la matriz sedimentaria.

Probablemente, los principales impactos antrópicos que han tenido incidencia sobre el estado trófico de Laguna Grande son el reemplazo de la vegetación nativa existente en la cuenca y la llegada de aguas servidas provenientes del sistema de alcantarillado de la ciudad.

Cabe señalar que durante el siglo XIX, la ocupación del área de San Pedro estaba dada fundamentalmente por el Fuerte San Pedro, que cumplía funciones militares y permitía el intercambio productivo entre grupos mapuches de la zona (Azócar & Sanhueza 1999). Bajo estas condiciones, el impacto que tuvo el hombre sobre el siste-

ma, probablemente fue de poca relevancia en las condiciones tróficas de éste. Sin embargo, a comienzos del siglo XX el área de San Pedro comienza a presentar un mayor desarrollo poblacional, que se intensificó a partir de 1960 con la construcción de la Villa San Pedro con más de 2000 viviendas, y alcanzó su mayor desarrollo entre los años 1965 y 1980 (Cisternas et al. 2000). Durante este último período, el crecimiento urbano en los alrededores de Laguna Grande, indudablemente provocó una fuerte presión sobre el sistema, debido a que se dejó escurrir las aguas lluvias directamente al lago y llegaron las aguas servidas de la ciudad, provocando una mayor entrada de nutrientes al cuerpo de agua.

Por su parte, el cambio en la composición de la cobertura vegetal habría contribuido a la exportación de nutrientes desde la cuenca, debido a que las especies latifoliadas presentes en un bosque nativo son más eficientes en la retención de nutrientes al suelo, evitando que éstos lleguen a los cuerpos de agua (Soto & Campos 1995). Además, según Heathwait et al. (1990), la remoción de la vegetación en las actividades forestales, generalmente provoca un incremento de los sedimentos en suspensión y de los nutrientes en el escurrimiento superficial hacia los cuerpos de agua.

Además, la utilización de maquinaria pesada y la aplicación de técnicas convencionales de raleo y arrastre de troncos en estas actividades, pudo haber provocado el arrastre de una gran cantidad de material terrígeno al lago, transportando nutrientes y minerales al cuerpo de agua. Por otra parte, las actividades forestales y de urbanización han dejado las riberas de Laguna Grande sin ninguna protección, contribuyendo con ello al deslizamiento de suelo y facilitando la llegada de nutrientes al cuerpo de agua.

Los impactos anteriores sobre el estado trófico de los lagos, pueden ser minimizados con barreras vegetales en los bordes de los cuerpos de agua, debido a que éstas han demostrado ser un mecanismo eficiente en la retención de P y N transportado por el escurrimiento desde las laderas (Barling & Moore 1994, Vought et al. 1994). Además, estas franjas estabilizan las riberas, reduciendo el riesgo de erosión y sirven como hábitat para peces e insectos (Vought et al. 1994).

Los resultados obtenidos evidencian el aumento del estado trófico que experimentó Laguna Grande a través del tiempo, y permiten establecer una relación entre las variaciones en las comunidades de diatomeas y los cambios en la concentración y acumulación de los registros geoquímicos en los sedimentos de dicho sistema. De acuerdo con esto, es posible inferir que el lago evolucionó

desde un sistema con un bajo contenido de nutrientes, correspondiente a la zona I, caracterizado por especies típicas de ambientes oligomesotróficos, hasta un sistema eutrófico, zona IV, con altos niveles de nutrientes y una alta producción de diatomeas en el lago.

Los cambios más drásticos habrían ocurrido en la zona IV, que de acuerdo a la datación geocronológica, correspondería a las últimas décadas de la historia de Laguna Grande. Los registros sedimentarios indican que en este período se habrían producido grandes cambios ecológicos, principalmente, por el fuerte desarrollo forestal y urbano en la cuenca a finales de la década del setenta. Como consecuencia de estas actividades habría aumentado la erosión del suelo, lo que produjo el arrastre de una gran cantidad de material alóctono al cuerpo de agua, provocando el aumento de nutrientes y otros compuestos, que modificaron las condiciones limnológicas del lago.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue financiada por los proyectos FONDECYT 1980529 y 7980067 (Incentivo a la Cooperación Internacional), y el proyecto DIUC 93.310.022-1.1D, Dirección de Investigación de la Universidad de Concepción. Cooperación Bilateral Científica y Tecnológica de la Comunidad Flamenca, Bélgica.

LITERATURA CITADA

- ACENCIO E (1994) Análisis integrado de los sistemas naturales Laguna Grande y Laguna Chica de San Pedro. Tesis de Licenciatura, Facultad de Humanidades y Arte, Universidad de Concepción, Concepción, Chile. 34 pp.
- ANDERSON N (1990) Variability of diatom concentrations an accumulation rates in sediments of a small lake basin. *Limnology and Oceanography* 35: 497-508.
- ANDERSON N (1994) Inferring diatom palaeoproduction and lake trophic status from fossil diatom assemblages. *Academy of Sciences* 17: 539-547.
- AZÓCAR G & R SANHUEZA (1999) Evolución del uso del suelo en las cuencas hidrográficas de las lagunas de la comuna de San Pedro de la Paz, región del Biobío: análisis histórico y tendencias. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis* (Chile) 44: 63-78.
- BARLING R & I MOORE (1994) Role of buffer strips in management of waterway pollution: a review. *Environmental Management* 18: 543-558.
- BATTARBEE R (1986) The eutrophication of Lough Erne inferred from changes in the diatom assemblages of ^{210}Pb and ^{137}Cs - dated sediment cores. *Proceedings of the Royal Irish Academy B* 86: 141-168.
- BOUGHEY A (1971) *Man and the environment: an introduction to human ecology and evolution*. Macmillan Company Press, New York, New York. 472 pp.
- BYERS S, E MILLS & P STEWART (1978) A comparison of methods of determining organic carbon in marine sediments, with suggestions for a standard method. *Hydrobiologia* 58: 43-47.
- CAMPOS H, W STEFFEN, G AGÜERO, O PARRA & L ZÚÑIGA (1990) Limnological study of lake Todos Los Santos (Chile), morphometry, physics, chemistry, plankton and primary productivity. *Archiv für Hydrobiologie (Supplement)* 17: 453-484.
- CAMPOS H, W STEFFEN, G AGÜERO, O PARRA & L ZÚÑIGA (1992) Limnological studies of lake Rupanco (Chile), morphometry, physics, chemistry, plankton and primary productivity. *Archiv für Hydrobiologie (Supplement)* 90: 85-113.
- CISTERNAS M, L TORRES, R URRUTIA, A ARANEDA & O PARRA (2000) Comparación ambiental, mediante registros sedimentarios, entre las condiciones prehispánicas y actuales de un sistema lacustre. *Revista Chilena de Historia Natural* 73: 151-162.
- CHARLES D, J SMOL & D ENGSTROM (1994) Paleolimnological approaches to biomonitoring. En: Loeb S & A Spacie (eds) *Biological monitoring of aquatic systems*: 233-293. Lewis press, Ann Harbor, Kansas.
- ENGSTROM D & H WRIGHT (1984) Chemical stratigraphy of lake sediments as a record of environmental change. En: Haworth E & J Lund (eds) *Lake sediments and environmental history*: 11-67. Leicester University Press, Leicester, England.
- ENGSTROM D, E SWAIN & J KINGSTON (1985) A paleolimnological record of human disturbance from Harvey's Lake, Vermont: geochemistry, pigments and diatoms. *Freshwater Biology* 15: 261-288.
- FINDLAY D, H KLING, H RÖNICKE & W FINDLAY (1998) A paleolimnology study of eutrophied Lake Arendsee (Germany). *Journal of Paleolimnology* 19: 41-54.
- FUSCO P (1972) *Metodi analitici per le acque*. En: Istituto di Ricerca sulle Acque di Roma (eds) *Metodi analitici*. Volume Secondo: 92-112. La Pergamena Press, Roma, Italia.
- GAILLARD M, A DEARING, F DAOUSHY, MENELL & H HAKANSSON (1991) A late Holocene record of land-use history, soil erosion, lake trophy and lake-level fluctuations at Bjäresjösjön (South Sweden). *Journal of Paleolimnology* 6: 51-81.
- GRIMM E (1991-2) *Tilia version 1.12*. Illinois State Museum, Research & Collections Centre.
- HASLE G & G FRYXELL (1970) Diatoms: Cleaning and mounting for light and electron microscopy. *Transactions of the American Microscopy Society* 89: 469-474.
- HEATHWAIT A, T BURT & S TRUDGILL (1990) The effect of land use on nitrogen, phosphorus and suspended sediment delivery to streams in a small catchment in southwest England. En: Thormes JW (ed) *Vegetation and erosion. Processes and environments*: 161-177. John Wiley & Sons Ltd. Press, New York, New York.

- HECKY R (1993) Eutrophication of Lake Victoria. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Limnologie* 25: 39-48.
- JACKSON M (1964) Análisis químico de suelos. Volumen 1. Ediciones Omega S.A., Barcelona, España. 367 pp.
- JOACHIM A & J MÜLLER (1999) Differences in the eutrophication dynamics of Ammersee and Starnberger See (Southern Germany), reflected by the diatoms succession in varve-dated sediments. *Journal of Paleolimnology* 21: 395-407.
- LAMI A, D RUGGIU, P GUILIZZONI & P PANZANI (1986) Paleolimnology of the eutrophic lake Varese (northern Italy). 1. Subfossil diatom remains in a short sediment core. *Memorie dell' Istituto Italiano di Idrobiologia* 44: 1-14.
- MACKERETH F (1966) Some chemical observations on post-glacial lake sediments. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 250: 165-213.
- MORTLOCK R & P FROELICH (1989) A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep Sea Research* 36: 1415-1426.
- ODUM E (1985) Fundamentos de ecología. Nueva Editorial Interamericana S.A., México. 365 pp.
- PARRA O (1989) La eutroficación de la Laguna Grande de San Pedro, Concepción, Chile. Un caso de estudio. *Ambiente y Desarrollo (Chile)* 1: 117-136.
- RIVERA P (1970) Diatomeas de los lagos Ranco, Laja y Laguna Chica de San Pedro, Chile. *Gayana Botánica (Chile)* 20: 1-25.
- RIVERA P (1974) Diatomeas de agua dulce de Concepción y alrededores, Chile. *Gayana Botánica (Chile)* 28: 1-134.
- RIVERA P, O PARRA & M GONZÁLEZ (1973) Fitoplancton del estero Lengua, Chile. *Gayana Botánica (Chile)* 23: 1-93.
- RIVERA P, O PARRA, M GONZÁLEZ, V DELLAROSSA & M ORELLANA (1982) Manual taxonómico del fitoplancton de aguas continentales. Editorial Universidad de Concepción, Concepción, Chile. 97 pp.
- SCHINDLER D (1974) Eutrophication and recovery in experimental lakes: implications for lake management. *Science* 184: 897-899.
- SCHINDLER D (1987) Detecting ecosystem response to anthropogenic stress. *Canadian Journal Fisheries Aquatic Science* 44 (Supplement) 1: 6-25.
- SMELTZER E & B SWAIN (1985) Answering lake management questions with paleolimnology. *Lake Reservory Management* 1: 268-274.
- SMOL J (1992) Paleolimnology: an important tool for effective ecosystem management. *Journal of Aquatic Ecosystem Health* 1: 49-58.
- SMOL J (1995) Paleolimnological approaches to the evaluation and monitoring of ecosystem health: providing a history for environmental damage and recovery. En: Rapport D, L Gaudet & P Calow (eds) *Evaluating and monitoring the health of large-scale ecosystems: 301-318*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- SMOL J & J GLEW (1992) Paleolimnology. En: Nierenberg WA (ed) *Encyclopedia of Earth System Science. Volume 3: 551-564*. Academic Press, Inc., San Diego, California.
- SOTO D & H CAMPOS (1995) Los lagos oligotróficos del bosque templado húmedo del sur de Chile. En: Armesto J, C Villagrán & MK Arrollo (eds) *Ecología de los bosques nativos de Chile: 317-334*. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.
- VOUGHT L, J DAHL, C LAUGE PEDERSEN & J LACOURSIERE (1994) Nutrient retention in riparian ecotones. *Ambio* 23: 342-348.
- YANGDONG P & R BRUGAM (1997) Human disturbance and trophic status changes in Crystal Lake, Mc Henry County, Illinois, USA. *Journal of Paleolimnology* 17: 369-376.

Editor Asociado: V. Montecino

Recibido el 9 de diciembre de 1999; aceptado el 31 de agosto de 2000