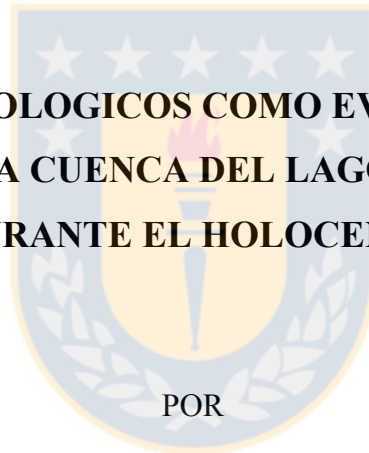


UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y OCEANOGRAFICAS
DEPARTAMENTO DE BOTANICA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS BIOLÓGICAS, ÁREA BOTÁNICA

**ENSAMBLES DIATOMOLÓGICOS COMO EVIDENCIA DE CAMBIOS
AMBIENTALES EN LA CUENCA DEL LAGO LAJA (VIII REGIÓN,
CHILE) DURANTE EL HOLOCENO TARDÍO**



POR

FABIOLA J. CRUCES LOPEZ

TUTOR: DR. OSCAR PARRA B.

NOVIEMBRE 2006



*“A
MIS PADRES”*

Indice	Página
Agradecimientos	6
Resumen	8
Capítulo 1. Formulación general	10
1.1. Introducción	10
1.2. Hipótesis	15
1.3. Objetivos generales	16
1.4. Objetivos específicos	16
Capítulo 2. Metodologías generales	17
2.1. Area de estudio	17
2.1.1. Ubicación	17
2.1.2. Caracterización limnológica actual del Lago Laja	18
2.1.2.1. Composición algal	18
2.1.2.2. Caracterización fisico-química	19
2.1.3. Fisiografía de la cuenca	19
2.1.4. Características estratigráficas de la cuenca	20
2.1.5. Clima de la zona	20
2.1.6. Actividad volcánica en la cuenca	21
2.1.7. Principales usos del suelo en la cuenca del Lago Laja	22
2.2. Obtención de muestras sedimentarias	23
2.3. Datación perfil sedimentario	25
2.4. Análisis de diatomeas	26
2.5. Análisis estadísticos	28
Capítulo 3. Influencia de la actividad volcánica sobre los ensamblajes diatomológicos	
Paper 1: Changes in diatom assemblages in an Andean lake in response to a recent volcanic event. <i>Archiv für Hydrobiologie</i> 165 (1): 23-35. 2006.	29
3.1. Resumen	30
3.2. Introducción	31
3.3. Metodologías	33
3.3.1. Area de estudio	33
3.3.2. Obtención de muestras y datación	34
3.3.3. Características químicas del material volcánico	34
3.3.4. Tamaño de partículas y contenido de materia orgánica del material sedimentario	34
3.3.5. Análisis de diatomeas	35
3.3.6. Métodos estadísticos	35
3.4. Resultados	35
3.4.1. Datación perfil sedimentario Lago Galletué	35
3.4.2. Tamaño de partículas y contenido de materia orgánica del material sedimentario	36

3.4.3. Características químicas del material volcánico	36
3.4.4. Composición ensambles diatomológicos sedimentarios presentes en el Lago Galletué	38
3.5. Discusión	40
3.6. Referencias	43
Capítulo 4. Efecto de la intervención antrópica sobre los ensambles diatomológicos del Lago Laja.	
Paper 2: Diatom response to anthropic water regulation in Laja lake (Andes Mountain) over the last 60 years. <i>Submitted</i>	46
4.1. Resumen	47
4.2. Introducción	48
4.3. Metodologías	50
4.3.1. Area de estudio	50
4.3.2. Obtención de muestras y datación	51
4.3.3. Análisis químicos del material sedimentario	51
4.3.4. Registro de los niveles del agua en el Lago Laja	51
4.3.5. Análisis de diatomeas	51
4.3.6. Análisis de datos	52
4.4. Resultados	52
4.4.1. Registros históricos de las cotas del Lago Laja y precipitaciones	52
4.4.2. Contenido de materia orgánica y concentración de sílice biogénica en los estratos sedimentarios del Lago Laja	53
4.4.3. Composición de los ensambles diatomológicos sedimentarios del Lago Laja	54
4.5. Discusión	57
4.6. Bibliografía	61
Capítulo 5. Cambios ambientales registrados en la cuenca del Lago Laja durante los últimos 2000 años	
Paper 3: Late Holocene environmental changes in Laja Lake: diatom and geochemical sedimentary records	64
5.1. Resumen	65
5.2. Introducción	66
5.3. Metodologías	68
5.3.1. Area de estudio	68
5.3.2. Obtención muestras sedimentarias y datación	69
5.3.3. Composición química tefra	69
5.3.4. Análisis de diatomeas	70
5.3.4.1. Preparación de muestras	70
5.3.4.2. Identificación y conteo de los ensambles de diatomeas	70
5.3.5. Análisis químicos (materia orgánica, sílice biogénica, fósforo, carbonatos, fierro, aluminio, calcio y sodio)	71
5.3.6. Análisis de datos	72
5.4. Resultados	73
5.4.1. Geocronología con ^{210}Pb y ^{14}C	73

5.4.2. Características granulométricas del perfil sedimentario	75
5.4.3. Composición química tefra	75
5.4.4. Composición de los ensambles de diatomeas presentes en el perfil sedimentario del Lago Laja	76
5.4.5. Análisis químicos	81
5.4.6. Relación entre los ensambles diatomológicos y las variables ambientales	85
5.5. Discusión	86
5.6. Bibliografía	91
Capítulo 6. Trabajo Taxonómico	
Paper 4: Observations and comments on the diatom <i>Stephanodiscus parvus</i> Stoermer & Håkansson (Bacillariophyceae) found in bottom sediments of an Andean lake in Central Chile	95
6.1. Resumen	96
6.2. Introducción	97
6.3. Materiales y métodos	98
6.4. Resultados	99
6.5. Discusión	99
6.6. Bibliografía	102
Discusión general	104
Conclusiones	107
Bibliografía general	109



AGRADECIMIENTOS

Generalmente al finalizar una etapa en nuestras vidas, no podemos dejar de pensar en todos aquellos que de una u otra forma hicieron que el camino recorrido fuera más fácil. Por eso, en primer lugar quiero agradecer a Dios por darme la fuerza en los momentos difíciles y a mis padres y hermanos por su amor, apoyo incondicional y por darme siempre los mejores momentos de mi vida.

También expreso mis agradecimientos al Dr. Oscar Parra y al Dr. Roberto Urrutia por todas las facilidades prestadas para desarrollar la presente investigación en el Centro EULA, así como también por su guía, apoyo, y por supuesto por sus valiosos comentarios y sugerencias durante cada etapa del trabajo realizado.

En estos momentos tampoco puedo dejar de mencionar y agradecer a todos mis amigos por su apoyo, comprensión y alegría durante cada momento compartido. Especialmente deseo agradecer a Alberto Araneda, Laura Torres, Fernando Torrejón y Luis Chirinos, por sus consejos y comentarios durante nuestras discusiones académicas.

De forma muy especial deseo agradecer al Dr. Patricio Rivera, por confiar en mí y entregarme sus conocimientos, por su paciencia y comprensión durante estos años en que hemos trabajado juntos, y sobre todo por su amistad y los valiosos consejos que me dio tanto en el plano académico como personal.

También agradezco a CONICYT por el apoyo entregado a través del Programa Nacional de Becas de Doctorado, y al Convenio de Cooperación entre Flanders (Comunidad Flamenca-Bélgica) y Chile que me permitió realizar las estadias de investigación en el laboratorio Protistology & Aquatic Ecology de la Universidad de Ghent-Bélgica.

Finalmente, pero no por eso menos importante, deseo expresar mis agradecimientos a todas aquellas personas que de una u otra forma hicieron posible este trabajo de investigación, y contribuyeron con sus conocimientos, o simplemente con sus palabras de aliento, a lograr los objetivos planteados.



RESUMEN

Las comunidades algales presentes en los lagos se encuentran en estrecha relación con las características limnológicas de los ecosistemas donde se encuentran. Por ello, cualquier variación en parámetros tales como temperatura, salinidad, contenido de nutrientes y condiciones hidrológicas, entre otros, tendrán un efecto directo sobre la abundancia y composición de especies de sus comunidades. En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue establecer las variaciones ambientales que ha experimentado el Lago Laja durante el Holoceno tardío (~ últimos 2000 años), a través de la reconstrucción de los ensamblajes diatomológicos y su relación con algunos parámetros químicos determinados en la matriz sedimentaria de este cuerpo de agua. Dada la influencia volcánica que presenta este lago, primero se realizó un estudio para determinar los efectos que tiene la entrada de material volcánico sobre las comunidades de diatomeas, el que se llevó a cabo en el Lago Galletué debido a que este sistema presenta un registro de tefras en sus sedimentos que puede ser utilizado posteriormente como referencia al evaluar las consecuencias de este fenómeno natural en el Lago Laja. Posteriormente se estableció los efectos que ha tenido la intervención antrópica en este cuerpo de agua, para lo cual se reconstruyó los ensamblajes diatomológicos representativos del período en el cual el Lago Laja ha estado sometido a la regulación de sus aguas para generación de hidroelectricidad, y se le relacionaron con los niveles de agua, precipitaciones y productividad durante dicho período. Finalmente, se procedió a integrar toda la información anterior para establecer cuáles son las condiciones ambientales que ha presentado el Lago Laja durante los últimos 2000 años, utilizando como indicador fundamental de estas condiciones los cambios en la composición de los ensamblajes de diatomeas. Los resultados obtenidos permiten indicar que en el período estudiado, la historia del Lago Laja puede ser dividido principalmente en cuatro períodos, que reflejan las variaciones ambientales que ha experimentado este sistema y que se registraron en la

matriz sedimentaria. Estos cambios indican que durante los períodos más antiguos el lago se caracterizaba por su baja productividad y por la dominancia de diatomeas pioneras y oportunistas, que reflejarían las alteraciones producidas como consecuencia de la fuerte influencia volcánica registrada durante este tiempo. Por el contrario, durante los dos épocas más recientes la productividad en el lago se incrementó y se produjo un cambio importante en la composición y abundancia de los ensambles de diatomeas presentes en el cuerpo de agua. Además, los cambios registrados por los ensambles de diatomeas en los estratos más actuales, dan cuenta de las importantes variaciones en el nivel del agua que ha experimentado el Lago Laja durante las últimas décadas como consecuencia de la regulación hidrológica a la cual ha estado sometido.

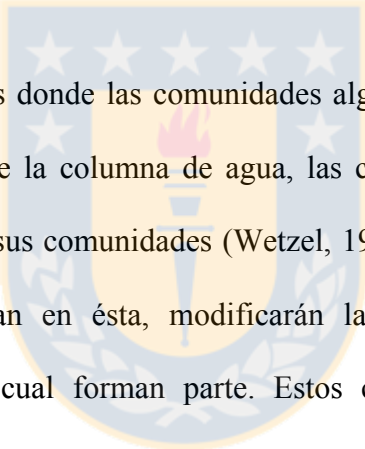


CAPITULO 1

FORMULACION GENERAL

1.1. INTRODUCCION

A través de su evolución, los sistemas lacustres están sometidos a una serie de procesos naturales (geológicos, climáticos, interacciones bióticas) y artificiales (intervención humana) que generan cambios en sus condiciones ambientales a través del tiempo. Estos cambios pueden ser observados a escalas de tiempo geológicas (miles de años), o a escalas temporales menores (siglos, décadas o menos), dependiendo de los factores que los originan.



Los lagos constituyen ecosistemas donde las comunidades algales están en directa relación con las condiciones físico-químicas de la columna de agua, las cuales influyen sus patrones de distribución y la composición de sus comunidades (Wetzel, 1981; Rodríguez, 1999), por lo cual las variaciones que se produzcan en ésta, modificarán la composición de los ensamblajes diatomológicos del sistema del cual forman parte. Estos cambios son el resultado de las modificaciones del hábitat (especialmente en zonas litorales) y de las respuestas ecológicas de los individuos y sus comunidades, como consecuencia de los cambios en la composición iónica del agua, nivel del agua, concentración de nutrientes y cambios en el clima, entre otros (Smol et al., 1991; McKnight et al., 1996; Lotter et al., 1999).

Durante los últimos siglos se ha producido un gran aumento de las actividades humanas en todo el mundo, lo que ha generado una fuerte presión sobre los sistemas acuáticos, que en muchos casos han experimentado cambios en la calidad de sus aguas. Esto ha llevado a un intento por establecer cuáles son los procesos de cambio resultantes de la variabilidad natural de los

ecosistemas, de aquellos que han sido consecuencia de la intervención antrópica sobre ellos. Sin embargo, lo anterior requiere información histórica que para muchas áreas geográficas no está disponible, y en las que cuentan con ella, ésta generalmente no abarca el período de tiempo necesario cuando se requiere una escala temporal mayor.

Para obtener esta data histórica, los sedimentos lacustres se han transformado en un valiosa fuente de información, no sólo para obtener la información de línea de base requerida, sino que también para proporcionar el registro de perturbaciones ambientales que han ocurrido en los lagos y sus cuencas. Lo anterior es posible debido a que los procesos de depositación y acumulación de sedimento autóctono y alóctono que se produce en el fondo de los lagos, permiten almacenar registros físicos, químicos y biológicos que dan cuenta de las condiciones ambientales presentes a través del tiempo. De esta forma, los cambios en la concentración de ciertos metales (Fe, Mn, Al, Pb Cd, V), concentración iónica (sodio, calcio, cloruros), características granulométricas del sedimento y composición de ciertos grupos biológicos (microalgas, cladóceros, quironómidos) registrados en la matriz sedimentaria, pueden ser utilizados para inferir las condiciones pasadas de los lagos y sus cuencas.

Entre los registros sedimentarios biológicos, las diatomeas han sido el grupo más ampliamente utilizado para inferir condiciones limnológicas pasadas. El uso de las diatomeas en estudio paleolimnológicos ha sido posible en parte, debido a la naturaleza silíceas de su pared celular, lo cual les permite preservarse en los sedimentos de los lagos sin sufrir alteraciones en su estructura (Charles et al., 1994; Douglas & Smol, 1999; Smith, 2002), pudiendo ser identificadas hasta nivel específico. Además, las características autoecológicas de las especies, a veces con rangos de tolerancia ambiental muy estrechos, permite que las diatomeas puedan ser utilizadas para

reconstruir directamente las condiciones limnológicas de los sistemas lacustres (Zeeb et al., 1994; Battarbee et al., 1999; Hall & Smol, 1999; Lotter, 2001), e inferir indirectamente las condiciones ambientales predominantes fuera del cuerpo de agua, como por ejemplo variaciones de temperatura, precipitación, cambios de uso de suelo y procesos de erosión (Charles & Smol, 1994; Gell, 1997; Wilson et al., 1997; Fritz et al., 1999; Lamb et al., 1999; Bennett et al., 2000; Moser et al., 2000; Smol & Cumming, 2000; Michelutti et al., 2001) (Figura 1).

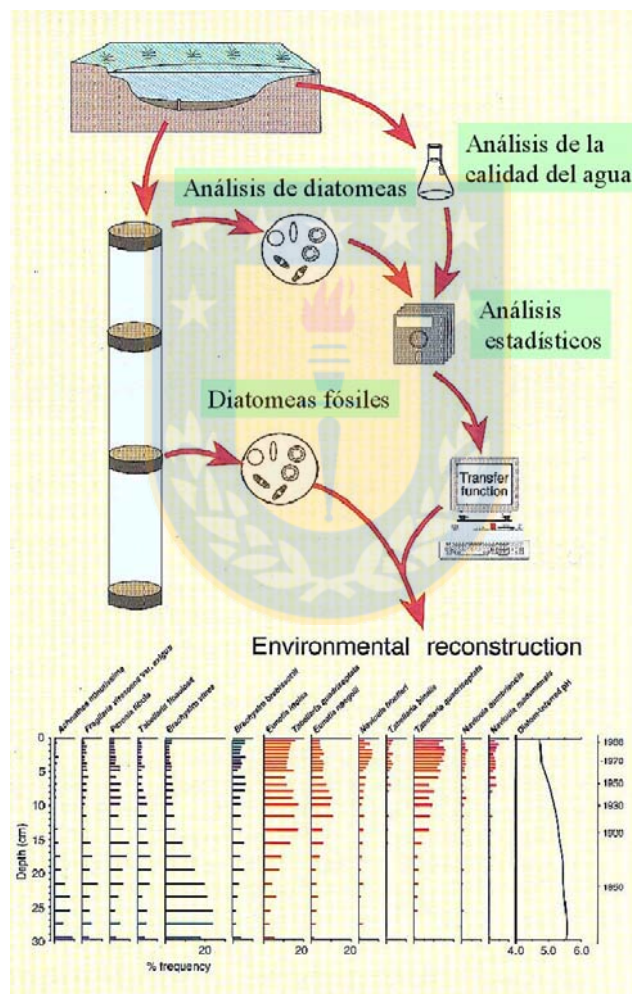


Figura 1. Esquema conceptual de la reconstrucción de condiciones limnológicas a través de registros sedimentarios.

De esta forma, el análisis de las diatomeas sedimentarias para inferir condiciones ambientales pasadas, se ha transformado en una herramienta de gran importancia en las investigaciones

paleoecológicas y paleoclimáticas llevadas a cabo principalmente en Norteamérica y Europa, donde se ha podido establecer cómo han variado las condiciones ambientales a través del tiempo (Bradbury & Van Metre, 1997; Sorvary & Korhola, 1998; Stoermer & Smol, 1999; Prather & Hickman, 2000; Dixit et al., 2002; Michelutti et al., 2002; Moser et al., 2002; Bradbury et al., 2004; Gaiser et al., 2004; Solovieva et al., 2005; Karst-Riddoch et al., 2005; Leira, 2005; Davis et al., 2006; Finsinger et al., 2006). En Sudamérica son más escasas las investigaciones que han utilizado las diatomeas u otros grupos algales para inferir condiciones ambientales (Bujalesky et al., 1997; González & Maidana, 1998; Sylvestre et al., 2001; Sylvestre, 2002; Markgraf et al., 2003; Rigsby et al., 2005; Mayr et al., 2005).

En Chile, las investigaciones paleoambientales que han aportado antecedentes sobre las condiciones pasadas se han basado principalmente en la utilización de registros geoquímicos, sedimentológicos y restos microfósiles de plantas o polen (Valero-Garcés et al., 1996; Moreno, 1997; Bennett et al., 2000; Benn & Clapperton, 2000; Moreno et al., 2001; Maldonado & Villagrán, 2002; Moreno, 2004; Maldonado et al., 2005; Valero-Garcés et al., 2005; Latorre et al., 2006; Maldonado & Villagrán, 2006). A través de ellos se ha establecido fundamentalmente la variabilidad climática que caracterizó el período del Holoceno.

Por otra parte, al contrario de lo que ha sucedido en el Hemisferio Norte, en Chile son muy escasos los trabajos que han incorporado grupos microalgales que permitan complementar la información inferida en las reconstrucciones ambientales llevadas a cabo. En este sentido, los trabajos realizados en Laguna Aculeo por Jenny et al. (2002 a b, 2003) y Villa-Martínez et al. (2004), que incluyeron respectivamente como uno de sus proxies las diatomeas y clorófitas, junto con Urrutia et al. (2000) y Cruces et al. (2001, 2006), son las únicas reconstrucciones ambientales

realizadas en el país que han usado las microalgas como evidencia de las condiciones pasadas. No obstante, cabe destacar que los trabajos de los dos últimos autores abarcan una escala temporal mucho menor, restringiéndose principalmente a los últimos 200 años.

Todo lo anterior, evidencia la carencia en Chile de estudios que incorporen las comunidades diatomológicas dentro de los proxies para inferir condiciones ambientales, considerando que este grupo algal constituye el componente fitoplanctónico más importante y responsable de la productividad en la mayoría de los lagos en el país (Parra et al., 1999; Parra et al., 2003). Esto los convierte en un importante indicador de los cambios transcurridos en las condiciones ambientales de estos sistemas y sus cuencas. Además, los antecedentes mencionados previamente reflejan la necesidad de obtener data pasada en una escala temporal menor que abarque fundamentalmente el período del Holoceno tardío (~ 2000 años). Esto permitirá obtener la información sobre las condiciones y variaciones naturales de los sistemas, de tal forma de establecer las consecuencias de la intervención antrópica sobre los lagos en nuestro país.

El Lago Laja es un sistema lacustre altoandino ($36^{\circ}54'S$; $71^{\circ}05'O$) situado a 1360 metros sobre el nivel del mar, que se caracteriza porque en su cuenca existe un complejo volcánico conformado por los volcanes Antuco y Sierra Velluda. Por otra parte, durante las últimas décadas este lago ha estado sometido a una importante influencia antrópica, debido a la regulación de su régimen hidrológico para la generación de energía eléctrica. Todas estas condiciones le confieren al Lago Laja y su cuenca características muy particulares, que permiten realizar un estudio de larga data para reconstruir las condiciones ambientales que ha presentado este sistema durante los últimos 2000 mil años. Además, dada la interacción tanto de procesos naturales como antrópicos sobre el lago, proporciona una excelente área de estudio para establecer y diferenciar los cambios que ha

experimentado el lago como consecuencia de fenómenos naturales, de aquellos han sido resultantes de la intervención antrópica.

1.2. HIPÓTESIS

A través del desarrollo de la presente investigación se busca probar las siguientes hipótesis:

- H1. La productividad de diatomeas en el Lago Laja ha presentado variaciones durante el Holoceno tardío, como consecuencia de la entrada de material volcánico proveniente de la actividad eruptiva ocurrida en su cuenca.
- H2. La intervención antrópica en la cuenca del Lago Laja durante el último siglo ha generado cambios en la flora diatomológica de este sistema lacustre, principalmente como consecuencia de la regulación de su régimen hídrico que ha experimentado el lago.
- H3. Si los cambios climáticos que han sido reportados para la zona centro y sur de Chile a finales del Holoceno respondieron a un proceso de variabilidad climática global, la flora de diatomeas del Lago Laja reflejaría estos cambios a través de modificaciones en la estructura de los ensambles diatomológicos sedimentarios que representan dicho período.

1.3. OBJETIVOS GENERALES

- 1 Establecer a través de la reconstrucción de los ensambles diatomológicos sedimentarios, las condiciones ambientales presentes en el Lago Laja durante el Holoceno tardío (~ últimos 2000 años).
- 2 Establecer la influencia de los eventos volcánicos y de la intervención antrópica, sobre la composición de los ensambles de diatomeas del Lago Laja.

1.4. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Conocimiento y reconstrucción de la flora diatomológica actual y sedimentaria del Lago Laja.
- Reconocimiento de cambios en el nivel del agua y en la composición iónica del Lago Laja durante el período de estudio.
- Establecer la historia trófica del Lago Laja durante el período de estudio.
- Establecer si la composición de los ensambles diatomológicos durante el período de mayor influencia antrópica (último siglo), se ha mantenido sin variaciones respecto al período anterior a dicha intervención.
- Establecer si la productividad diatomológica en el Lago Laja presenta variaciones como consecuencia de la reciente intervención antrópica sobre el sistema y por los eventos volcánicos ocurridos durante el período de estudio.

CAPITULO 2

METODOLOGÍAS GENERALES

2.1. Área de estudio

2.1.1. Ubicación

El Lago Laja está situado a 1.360 metros sobre el nivel del mar en la cordillera de Los Andes (36°54'S; 71°05'O). Su formación geológica data de la época glacial. Hace unos 200 mil años se habría excavado el gran cajón andino del Río Laja, dando origen posteriormente al lago, como consecuencia de erupciones volcánicas que bloquearon el valle, permitiendo la formación de éste (Lohmar, 2000). El Lago Laja es el mayor embalse natural con que cuenta el país, y de él nace el Río Laja que es el principal tributario del Río Biobío. Tiene una longitud aproximada de 35 Kms desde norte (Punta Chillán) a sur (Babia El Pino) y un ancho máximo de 7 Kms en la zona del volcán Antuco. Tiene una profundidad máxima de 135 metros, una superficie de aproximadamente 87 km², y un volumen de 6000 millones de metros cúbicos aproximadamente. Sus aguas son heladas y de fuerte oleaje en invierno.

El volumen de agua del lago lo utilizan desde 1958 las centrales Antuco, Abanico y El Toro para la generación de energía hidroeléctrica (Parra, 1996; Mardones & Vargas, 2005). Además, el agua de este sistema lacustre es utilizada para regadío, para fines recreacionales y pesca de especies salmonídeas.

2.1.2. Caracterización limnológica actual del Lago Laja

Composición algal

El Lago Laja se caracteriza por presentar una comunidad algológica dominada durante el año por el grupo de las diatomeas (Bacillariophyceae), al que le siguen en abundancia las algas verdes (Chlorophyceae). También se encuentran representantes de los grupos Chrysophyceae, Cyanophyceae, Dinophyceae y Cryptophyceae, no obstante las abundancia que alcanzan las especies pertenecientes a estos grupos son muy bajas si se les compara con los dos grupos dominantes.

Aún cuando es posible evidenciar algunas variaciones en las especies que constituyen la comunidad algológica del lago a través del año, las especies dominantes se mantienen durante todo el período. Entre las especies de diatomeas dominantes se encuentran *Aulacoseira granulata*, *Asterionella formosa*, *Fragilaria crotonensis*, *Achananthes saxonica*, *Achnanthes exigua*, *Urosolenia eriensis*, *Cyclotella stelligera* y *Stephanodiscus* sp. Entre las algas verdes destacan las especies *Sphaerocystis Schroeteri*, *Scenedesmus* sp., y de los restantes grupos algales se presentan especies de los géneros *Dinobryon*, *Ceratium*, *Rhodomonas* y *Cryptomonas*.

Respecto a la densidad celular fitoplanctónica del Lago Laja es posible evidenciar variaciones a lo largo del año, observándose la mayor densidad celular durante el período de primavera.

Caracterización físico-química

Este sistema se caracteriza por presentar un pH que fluctúa entre valores de 7 y 7.5, una conductividad de 35 a 46 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una concentración de oxígeno disuelto de 9.6 a 10.3 mg/l. Respecto a los niveles de nutrientes en el lago se ha establecido que éstos presentan valores muy bajos, con una concentración media anual de nitrógeno total y fósforo total de 78 y 9.3 $\mu\text{g}/\text{l}$, respectivamente.

La productividad del Lago Laja, evaluada a través de la concentración de clorofila *a*, presenta valores que fluctúan entre 0.09 y 1.15 $\mu\text{g}/\text{l}$, lo que indica una baja productividad del sistema, que es concordante con los bajos niveles de nutrientes en el lago que estarían limitando mayores niveles de productividad para este cuerpo de agua.

De acuerdo a la concentración de nutrientes y el contenido de clorofila *a* presente en la columna de agua, el Lago Laja ha sido catalogado como un sistema oligotrófico.

2.1.3. Fisiografía

El relieve de la cuenca del Lago Laja es suave, la mayoría de las cumbres no sobrepasan los 2500 m. Sólo dos cumbres se ubican sobre los 3000 m, y corresponden a los edificios volcánicos de Sierra Velluda (3385 m) y Volcán Callaqui (3080 m).

Más del 60% del área se encuentra cubierta por bosques, que en las partes más bajas de los valles están formadas principalmente por coigues, lengas, olivillos, y en las partes altas, por ñirres.

2.1.4. *Estratigrafía*

Aproximadamente el 95% de la superficie de la cuenca está ocupada por rocas estratificadas, volcánicas y sedimentarias, con edades comprendidas entre el Terciario Inferior y el Holoceno. Se han diferenciado 5 unidades litoestratigráficas: Formación Cura-Mallín, Formación Trapa-Trapa, Formación Cola de Zorro, Volcanes y Flujos Lávicos y Depósitos No Consolidados (Niemeyer & Muñoz, 1983).

La Formación Cura-Mallín, de origen continental, está constituida por piroclastitas y sedimentitas terrígenas, con intercalaciones calcáreas y carbonosas en su parte inferior. La Formación Trapa-Trapa, de origen continental, está compuesta por lavas andesíticas, aglomerados volcánicos y escasos conglomerados. La Formación Cola de Zorro es de origen volcánico-continental y está integrada por andesitas, aglomerados andesíticos y basaltos. Los Volcanes y Flujos Lávicos poseen composición basáltica y andesítico-basáltica. Los Depósitos No Consolidados están compuestos por arenas, gravas, ripios y depósitos morrénicos de origen glacial, glaciofluvial, fluvial y depósitos originados por deslizamientos gravitacionales.

2.1.5. *Clima*

El clima del área corresponde a un clima mediterráneo, con 6 meses templado-secos y 6 meses frío-húmedos, degradando a clima frío sobre los 1500 m de altitud (Mardones, 2002). La precipitación ocurre principalmente a la forma de nieve, alcanzando los 525 mm de nieve caída (D.G.A., 1989). Respecto a las temperaturas, se observa una notable disminución de ésta con la altitud, siendo la temperatura media anual inferior a 10°C, en tanto que la media mensual de julio es de 6°C y en enero alcanza los 15°C.

2.1.6. *Actividad volcánica en el área de estudio*

Al sur oeste del Lago Laja se ubica el Volcán Antuco, que corresponde a un estrato volcán mixto y compuesto, de composición fundamentalmente basáltica y andesítico-basáltica, cuya actividad de formación se inició a comienzos del Pleistoceno superior, hace aproximadamente 130000 años, y culminó con una violenta erupción a comienzos del Holoceno (hace 9700 años) (Niemeyer & Muñoz, 1983; Mardones, 2002). Posteriormente continuaron sucediéndose coladas de lavas, flujos de detritos, lahares y depósitos de flujos piroclásticos, lo que demuestra la ocurrencia de erupciones explosivas del Antuco durante el Holoceno (Niemeyer & Muñoz, 1983).

Por otra parte, durante su corto registro de erupciones históricas que data del siglo XVII, el volcán ha presentado 19 erupciones, siendo la primera en 1624 y la última en 1911, con un período de silencio mínimo entre una erupción y otra de aproximadamente 2 años. El peor escenario documentado para una erupción del Antuco corresponde a la ocurrida el 1 de febrero de 1820 (Thiele et al., 1998).

La Tabla 1 detalla la secuencia histórica de todos los eventos eruptivos registrados para el Volcán Antuco a partir de 1624.

Tabla 1. Eventos eruptivos registrados para el Volcán Antuco.

CRONOLOGÍA ERUPTIVA HISTÓRICA DEL VOLCÁN ANTUCO													
No.	Fecha de inicio	Fecha de término	Características principales de la actividad eruptiva										IEV
	Año / Mes / Día	Año / Mes / Día	RS	SV	EX	CG	EF	FL	LH	EcF	DR	AC (metros)	
1	1624, por 20 días	1624	X	X	X	X	X	X	-	-	?	+ de 3000	2
2	1713		X	X	X	X	-	-	-	?	-	+ de 1000	1-2
3	1739		-	-	X	X	-	?	-	-	-	+ de 1.000	2
4	1750, fines	1751	-	-	X	X	X	-	-	-	-	+ de 1000	2
5	1752 - 01 - 31	1752 - 11	X	X	X	X	X	X	?	-	-	+ de 2000	2
6	1757, fines	1758 - 01 - 20	X	X	X	X	X	X	?	X	-	+ de 1000	2
7	1759		-	-	X	X	X	-	-	-	-	- de 1000	1
8	1786 - 02 - 23		-	-	X	X	-	-	-	-	-	1000	1
9	1806 - 04	1806 - 05	X	X	X	X	X	X	?	X	-	+ de 1000	2
10	1820 - 02 - 01		X	?	X	X	-	?	X	X	X	+ de 1000	2
11	1828 - 11	1829 - 02	X	X	X	X	?	X	?	X	X	+ de 1.000	2
12	1839 - 03 - 01		-	-	X	X	-	-	-	-	-	300 - 500	1
13	1845 - 02 - 10	1845 - 03, inicio	X	X	X	X	-	X	-	X	-	+ de 2.000	2
14	1848 - 02 - 03	1848	-	-	X	X	-	-	-	-	-	- de 1000	1
15	1851, fines	1853 - 01	X	X	X	X	X	X	?	-	-	+ de 2000	2
16	1859 - 11	1863 - 02 - 15	X	X	X	X	-	X	-	X	-	+ de 1000	2
17	1869		-	-	X	X	-	-	-	-	-	- de 800	1
18	1884		-	-	X	X	-	-	-	X	-	- de 800	1
19	1911 - 01, inicio de	1911 - 01	X	X	X	X	?	-	-	X	X	- de 800	1

Simbología

RS : Ruidos subterráneos

SV : Sismos volcánicos

EX : Explosiones

CG : Columna de gases y cenizas

EF : Erupción fisural

FL : Flujo de lava

LH : Lahares

EcF : Erupción con componente freática

DR : Derrumbes

AC (metros) : Altura de la columna eruptiva

IEV : Índice de explosividad volcánica

2.1.7. Usos del suelo en la cuenca del Lago Laja

La cuenca del Lago Laja cubre una superficie de 75.699,65 ha, compuesta por subcuencas de mediano a pequeño tamaño, todas ellas de alimentación nival o glacial. Se estima que los aportes hídricos más importantes proceden desde la Sierra Velluda a través de los valles río El Pino, río Petronquines y estero Las Cuevas.

Las subcuencas que drenan el área este y oeste del lago presentan grandes diferencias en lo relativo al tamaño y dinámica de éstas, y respecto a los usos del suelo que ellas presentan.

Las laderas occidentales se caracterizan por ser nivosas, boscosas, cobertura de bosque nativo dominante (más del 50%), con presencia también de cobertura herbácea (estepa y praderas). Las laderas orientales del lago se emplazan entre 1700 y 2200 m, y en ellas es posible encontrar amplios sectores desprovistos de vegetación y el predominio de la estepa en dichas subcuencas. En los valles situados al norte del lago, la cubierta vegetal dominante es el matorral nativo. Finalmente, en el área sur se desarrolla una actividad de veranadas en las praderas y humedales altoandinos

Por otra parte, el uso hidroeléctrico del lago también ha modificado la cobertura vegetal en el sector norte y en el margen oeste de la cuenca del lago.

2.2. Obtención muestras sedimentarias

Previo a la obtención del núcleo de sedimento, se realizó un sondeo sísmico en el Lago Laja para establecer el mejor punto de muestreo, de tal forma de evitar zonas con derrumbes de material o con presencia de gases que pudiesen alterar el registro sedimentario. Estos sondeos y análisis sísmicos fueron realizados en conjunto con un grupo de investigadores del Proyecto ENSO-Chile (<http://vwww.rug.ac.be/Onderzoeksbeleid>).

Una vez que se dispuso de la información anterior, se procedió a la extracción del núcleo sedimentario desde el fondo del lago a una profundidad de 120 m, para lo cual se instaló una

plataforma UWITEC sobre la superficie del agua, en el punto de muestreo que había sido preestablecido por la sismica (Fig. 1).

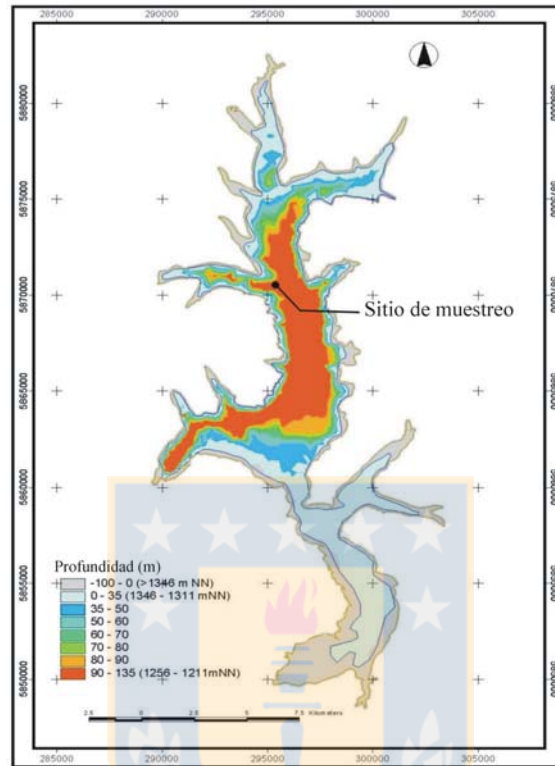


Figura 1. Ubicación del punto de muestreo en el Lago Laja

La longitud total del perfil obtenido fue de 5,27 metros, con núcleos obtenidos cada 2 metros. Una vez que se extrajo el material sedimentario, éste fue trasladado al laboratorio y almacenado en frío para su conservación hasta el momento de proceder a su seccionamiento. Para la presente investigación se utilizaron los 4,21 metros superficiales del perfil, puesto que como se verá más adelante con la geocronología, esta longitud representa aproximadamente los últimos 2000 años.

Una vez extraído el perfil sedimentario, éste fue analizado para descartar procesos de alteración de la secuencia estratigráfica. Para ello, después de realizada la inspección visual, se tomaron

placas de rayos X al perfil, las que no evidenciaron ningún tipo de alteración de las capas sedimentarias.

Los intervalos a los cuales se seccionó el núcleo de sedimento fueron definidos de acuerdo a los objetivos de la presente investigación: 1) Para evaluar los cambios recientes en el Lago Laja se procedió a cortar el perfil a intervalos de 1 centímetro, y 2) Para establecer los cambios ambientales durante los últimos 2000 años, el seccionamiento fue definido por los cambios estratigráficos y granulométricos evidenciados en el material sedimentario.

2.3. Datación

Uno de los requerimientos esenciales en los estudios paleoecológicos o paleolimnológicos es contar con una cronología del sedimento lo más precisa posible, de tal forma que se pueda establecer el tiempo en el que ocurrieron los cambios ambientales inferidos, y estimar el flujo de entrada de materiales al lago. En el primer caso la cronología nos permite determinar la fecha a la cual los cambios estratigráficos sucedieron y compararlos con eventos históricos conocidos, siendo especialmente útil para establecer relaciones causa-efecto. En el segundo caso, permite estimar las tasas de sedimentación y calcular la acumulación de material en el lago.

Los métodos de datación pueden ser clasificados en dos categorías: a) Aquellos que son marcadores estratigráficos (ej. análisis de polen, determinación de radioisótopos y análisis geoquímicos) y, b) Aquellos que asignan fechas a todos o algunos estratos de un perfil sedimentario (ej. radiocarbono- ^{14}C , ^{210}Pb).

Para datar los diferentes estratos del perfil de sedimento del Lago Laja se utilizaron las técnicas del ^{14}C y ^{210}Pb , la primera se usó para obtener la cronología de los estratos más antiguos del

perfil, y la segunda para obtener la fecha de los estratos más recientes. Además, se midió la actividad de ^{137}Cs en los estratos más superficiales, de tal forma de establecer un marcador temporal que le diera mayor precisión y confiabilidad a la geocronología con ^{210}Pb .

La determinación de la geocronología con ^{14}C se realizó en los laboratorios Institute of Physics Radiocarbon Laboratory de Polonia y en el Eidgenössische Technische Hochschule Zürich de Suiza. Para ambos casos se enviaron muestras de sedimento seco de los estratos más profundos del perfil, a las cuales se le midió la actividad del radioisótopo. Por su parte, la geocronología con ^{210}Pb y la determinación de la actividad de ^{137}Cs se realizaron en el Centre for Environmental Research Leipzig-Halle (UFZ) de Alemania, para lo cual se enviaron muestras de sedimento seco de los estratos más superficiales del perfil, midiéndose en éstos la actividad de los dos radioisótopos en el material sedimentario.

2.4. *Análisis de diatomeas*

La taxonomía y sistemática de las diatomeas se basa en las características y ornamentaciones que posee la pared silíceo de estas algas. Por ello, para realizar una adecuada identificación y clasificación de los taxa, es necesario conseguir una clara visualización de estas estructuras, lo que se consigue a través de la oxidación de la materia orgánica presente en las muestras. Para ello, 0.1 gramo de sedimento seco de cada estrato fueron sometidos a un tratamiento de oxidación con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y calor, de acuerdo a la metodología descrita por Battarbee (1986).

Una vez eliminada la materia orgánica se procedió a realizar preparaciones permanentes de las muestras, con las cuales se realizó la identificación de los taxa en microscopía fotónica. También

se trabajó en microscopía electrónica, de tal forma que la identificación de los taxa encontrados en cada estrato sedimentario se realizó de la forma más precisa posible, llegando a nivel de especies en la mayoría de los casos. Las preparaciones permanentes se montaron con resina Hyrax (Índice de Refracción= 1.7).

En cada estrato de la columna de sedimento se contaron e identificaron en transectas aleatorias un mínimo de 500 valvas de diatomeas. El análisis cuantitativo de las muestras se realizó a través de la incorporación de microesferas de poliestireno a la solución de diatomeas, una vez que éstas fueron oxidadas y antes de proceder a su montaje en resina. El procedimiento anterior siguió el protocolo descrito por Battarbee & Kneen (1982), que contempla la adición de una alícuota de una solución que contiene una concentración conocida de microesferas (generalmente se utiliza una solución de $4,92 \times 10^6$ microesferas/ml de solución) de $6.4 \mu\text{m}$ de diámetro medio, por medio de la cual se determinó el número de diatomeas total y específico presente en cada muestra, a través de la fórmula:

$$\text{N}^\circ \text{ total de diatomeas} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de microesferas adicionadas} \times \text{N}^\circ \text{ diatomeas contadas}}{\text{N}^\circ \text{ de microesferas contadas}}$$

La identificación taxonómica se llevó a cabo utilizando literatura especializada de este grupo de algas.

2.5. Análisis Estadísticos

Los resultados obtenidos sobre la composición de los ensambles diatomológicos sedimentarios del Lago Laja fueron ingresados al Software Tilia y Tilia Graph (Grim, 1987, 1991), donde se sometieron a un análisis de agrupamiento cluster para establecer estratos del perfil con una composición de diatomeas similar.

Para establecer la relación entre los ensambles diatomológicos y los parámetros físico-químicos en el perfil sedimentario se realizó un análisis multivariado con ambos set de datos. Este análisis se llevó a cabo con el programa CANOCO versión 4.5 (Ter Braak, 2002).



CAPITULO 3

INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA SOBRE LOS ENSAMBLES DIATOMOLÓGICOS



*CHANGES IN DIATOM ASSEMBLAGES IN AN ANDEAN LAKE (38°41'S; 71°17'W, IX
REGION-CHILE) IN RESPONSE TO A RECENT VOLCANIC EVENT*

Referencia:

F. Cruces, R. Urrutia, O. Parra, A. Araneda, H. Treutler, S. Bertrand, N. Fagel, L. Torres, R. Barra and L. Chirinos. *Archiv für Hydrobiologie* 165(1): 23-35. 2006.

3.1. Abstract

Galletué Lake (38°41'S; 71°17'W, IX Region-Chile) is located in an area that is highly influenced by eruptive activity of Lonquimay and Llaima volcanoes. As consequence, during the last century was deposited tephra into the lake. Sedimentary diatom assemblages were reconstructed in order to establish the tephra effect on their composition and productivity. This was done by taking a sediment core from Galletué Lake at 40 m depth and sectioning it in 1 cm intervals. The core age was obtained with ^{210}Pb and ^{137}Cs activities and the mineral composition of the tephra was determined with mineralogical analyses. Furthermore, sedimentological analyses were performed and total organic matter was determined in the profile. The diatom assemblages were analysed using light and electronic microscopy. The results showed that the diatom stratigraphy can be separated in three zones recognizing the periods before and after tephra input. *Aulacoseira granulata* decreased during the tephra influx and was replaced by *Cyclotella* aff. *glomerata*. When the tephra disappeared from the sedimentary record, *A. granulata* returned to pre-volcanic event levels. At the same time, *Cyclotella* aff. *glomerata* decreased within the assemblages. *Asterionella formosa* and *Urosolenia eriensis* increased after the tephra input, with values surpassing earlier ones. These results indicate that, after the tephra input, the lake recovered its previous nutrient levels, which agrees with the organic matter content in the sedimentary matrix. Finally, the results reveal that the volcanic disturbance changed the structure and productivity of diatom assemblages in Galletué Lake.

Key words: diatoms, tephra, sediment, species composition, Andean lake.

3.2. Introduction

The limnological characteristics of central and southern Andean lakes of Chile are unique since these lakes are located in geographic zones where climatic conditions fluctuate strongly with the seasons (PARRA et al. 1993). The lakes are heavily modified by the processes that supply them with nutrients and allochthonous materials due to local geomorphology and low anthropic intervention in their catchment (HABERLE et al. 2000).

Large quantities of tephra are deposited in these lakes by continuous strong volcanic activity in the Andes Mountains and, as a consequence, the physicochemical conditions of the lakes are modified. The influx of tephra has important effects on terrestrial and aquatic organisms, changing the composition and structure of their communities (EASTWOOD et al. 2002).

The impact of tephra on terrestrial and aquatic ecosystems has been evaluated in many parts of the world and on different time scales. Tephra deposits have been found to cause vegetational changes in the catchment and chemical variations in the water of lacustrine systems in Europe, North America, and Africa (LOTTER et al. 1995, BARKER et al. 2000, EASTWOOD et al. 2002, TELFORD et al. 2004).

Diatoms are an important component of the phytoplankton and total algal biomass of lakes (STEVENSON et al. 1996). Considering their autoecological characteristics, these algae are considered to be very sensitive to environmental changes (BATTARBEE 1986, ZEEB et al. 1994, BATTARBEE et al. 1999, HALL & SMOL 1999, LOTTER 2001). However, there is no clear response of the lacustrine diatom communities to tephra input. Some investigations have only shown changes in diatom productivity, with increased diatom concentrations due to increased silica and nutrient content following tephra input (HICKMAN & REASONER 1994, LOTTER et al. 1995); other authors have established indirect effects, such as community structure changes, principally as

result of changes in the pH and habitat availability (ABELLA 1988, BRANT & BAHLS 1995, BARKER et al. 2003).

In Chile, although some research has focused on the impact of volcanic eruptions on vegetation (VEBLEN et al. 1977, VEBLEN & ASHTON 1978), the consequences of volcanic activity on aquatic ecosystems are not understood. Therefore the tephra deposition in Galletué Lake (MORENO & GARDEWEG 1989), provides the opportunity to study the influence of volcanic activity on an aquatic Andean ecosystem, focusing on the effect of tephra on diatom assemblages.

According to the above mentioned, the objective of the present study was to determine the changes in the sedimentary diatom assemblages of Galletué Lake resulting from tephra input from a recent volcanic eruption recorded in the sedimentary profile of the lake. This research included physical, chemical, and sedimentological analyses of the material obtained from the lake.



3.3. Materials and methods

3.3.1. Study area

Galletué Lake is an oligotrophic lake located at 1150 m.a.s.l. ($38^{\circ}41'S$; $71^{\circ}17.5'W$) in the upper part of the Biobio River catchment (IX Region, Andes Mountain) (Fig. 1). Principal morphometric characteristics of Galletué Lake are presented in Table 1.

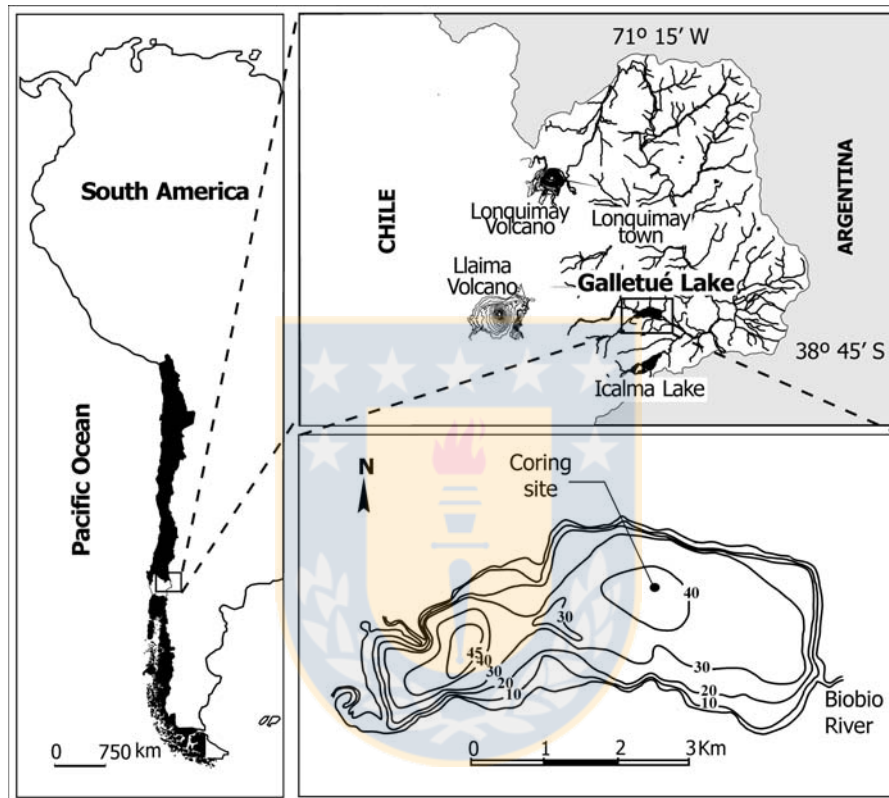


Fig. 1. Location of Galletué Lake and the coring site.

Table 1. Principal morphometric characteristics of Galletué Lake.

Morphometric parameters	
Max. length (km)	6.7
Max. width (km)	3.3
Surface area (km ²)	12.5
Max. depth (m)	45
Mean depth (m)	27
Volume (m ³)	338 X 10 ⁶

3.3.2. *Coring and dating*

Using a gravity corer (Uwitec), a 17-cm-long sediment core was obtained from Galletué Lake at 40 m water depth in February 2002. Subsequently, the core was sectioned at 1 cm intervals and the sediment was stored in plastic bags.

The core age was determined by applying two independent dating methods: ^{210}Pb and ^{137}Cs . Both results were correlated in order to establish an accurate chronology. CIC and CRS age models (APPLEBY & OLDFIELD 1978) were applied to find the best model to be used in the Galletué Lake.

3.3.3. *Tephra geochemistry*

The thickness of the tephra was identified through X-ray analysis and geochemistry and granulometry was determined for all samples. The chemical composition (major elements) of glass shards was determined using an electron microprobe (Cameca SX50) at the Centre d'Analyse par Microsonde pour les Sciences de la Terre, Louvain-la-Neuve University (CAMST), Belgium. The accelerating voltage was 15 kV and the beam current was 20 nA. Counting times were 20 sec for all elements.

3.3.4. *Grain size and total organic matter*

Grain size was analysed with an Elzone 282 PC Coulter particle analyzer. For this analysis, the samples were sieved at 4.0 and 1.0 phi units in order to separate the fine and coarse fractions.

The total organic matter was determined by the loss-on-ignition technique, following the method described by BOYLE (2002).

3.3.5. *Diatom analysis*

To eliminate the organic matter and facilitate the observation of diatom valve structure, 0.1g of dry sediment was oxidized with H₂O₂ (BATTARBEE 1986). For the taxonomic identification and quantification of diatom assemblages, permanent slices were mounted with Hyrax resin (I.R=1.7). The diatom concentration was estimated by adding a suspension of known concentration of polystyrene microspheres before mounting (BATTARBEE 1982). About 500 and 600 diatom valves were counted and identified per sample. The identification was carried out in a photomicroscope (Zeiss) with a phase-contrast condenser and an ETEC Autoscan U-1 (scanning microscope).

3.3.6. *Statistical methods*

The diatom assemblage-zone boundaries were defined on the basis of stratigraphically constrained incremental sum-of-squares cluster analysis (GRIMM 1987), using a square-root transformation and chord-distance dissimilarity measure for diatom species abundance. Summary diatom diagrams were constructed using Tilia and Tilia-graph (GRIMM1991).

Results

3.4.1. *Dating*

The ²¹⁰Pb activity decreased toward the older sediments of the profile, but fell quickly in the tephra layer; this was probably the result of a dilution of ²¹⁰Pb as consequence of the large quantity of allochthonous material that was deposited into the lake from the volcanic activity (Fig. 2a). Despite some layers the ²¹⁰Pb activity did not fit the exponential curve, the ²¹⁰Pb profile from Galletue Lake decayed according to theoretical trend. The samples that do not fit the curve,

are probably due to reworking of the material or may be the result of isotope migration into the sediment in these layers.

Once the ^{210}Pb and ^{137}Cs activity were obtained, CIC and CRS age models were applied. The correlation between both age models and the ^{137}Cs peak, which according to LONGMORE et al. (1983) corresponds to 1963 (Fig. 2b), showed CIC to be the best model for Galletué Lake. The age-depth profile is shown in Fig. 2c.

3.4.2. Grain size and total organic matter

The grain size analysis (phi scale) showed that the sediments were mostly silt before and after the volcanic event; when the tephra appeared in the sediment, the particle size increased to coarse sand (Fig. 2d).

The organic matter in Galletué Lake showed important variations during the study period, averaging 10.7% before the tephra input and dropping to between 2% and 5% at the time of tephra deposition into the water column (Fig. 2e). When the volcanic material disappeared from the system, organic matter returned to the values found prior to the volcanic input, reaching a maximum of 17% in the surface layer.

3.4.3. Tephra chemistry

The tephra layers showed basaltic-andesitic activity, with a composition of SiO_2 fluctuating between 53.01 and 55.38 % and low content of $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (3.98 to 4.67 %) (Fig. 3). The mineralogical analysis indicated that the principal mineral was plagioclase, with lower percentages of olivine and pyroxenes. This composition is similar to tephra found in the sedimentary profile of Laja Lake, another Andean lake of Chile influenced by volcanic activity.

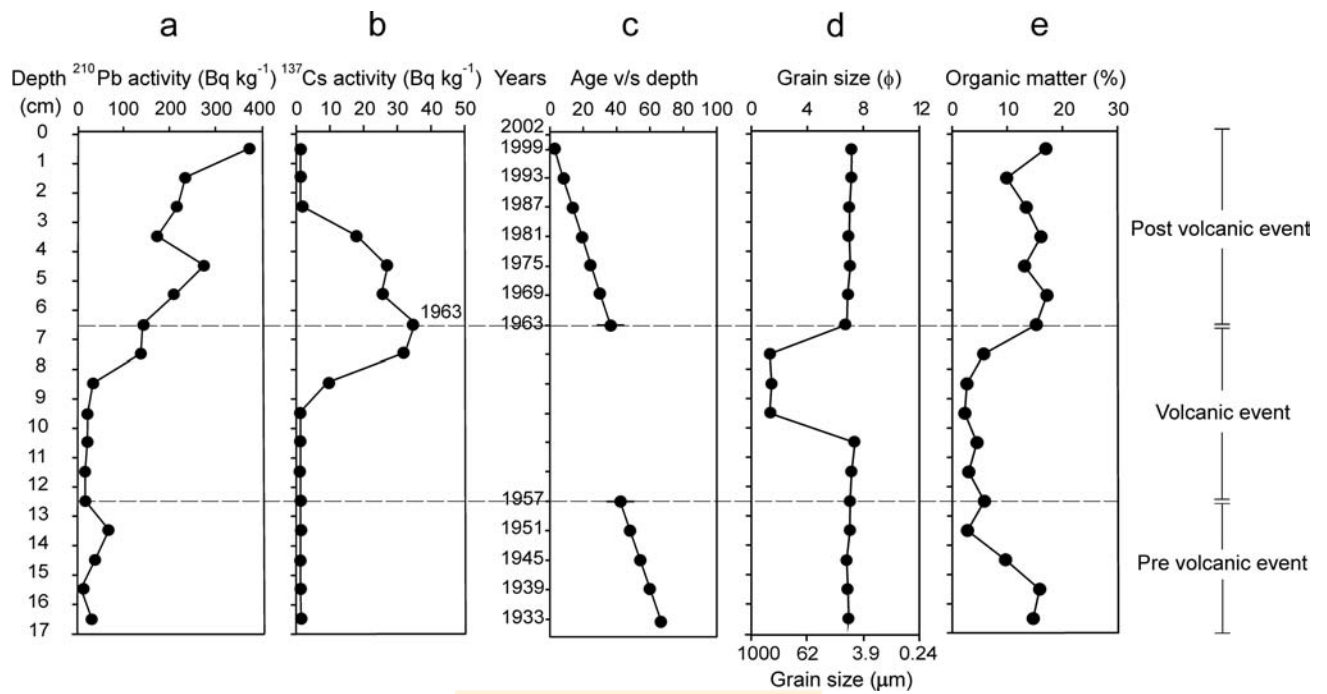


Fig. 2. Dating and sedimentology of the core from Galletué Lake, the volcanic event represents the tephra layers. a) ^{210}Pb activity, b) ^{137}Cs activity, c) age-depth curve, d) grain size, and e) organic matter content.

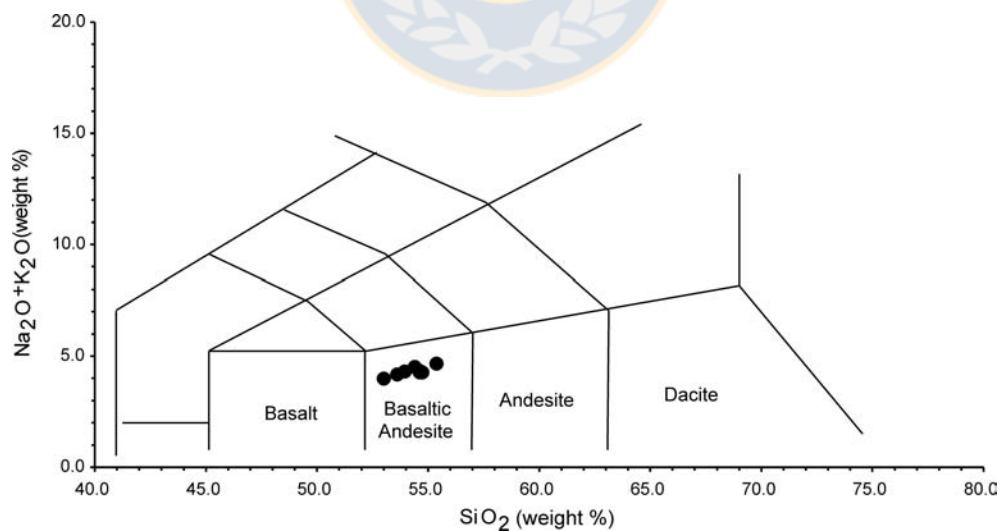


Fig. 3. Summary of tephra chemistry. The black circles in the graph show the composition of tephra samples from the core of Galletué Lake.

3.4.4. *Diatom assemblages stratigraphy*

Diatom valves were well-preserved in all the sedimentary samples analysed from Galletué Lake, allowing the identification of all the taxa. The most abundant species are summarized in Fig. 4. The principal biostratigraphical changes occurred between 7 and 13 cm of the profile, the sedimentary layers in which tephra is present. This period shows the most important changes in diatom assemblages composition, where the replacement of dominant species was observed.

Using cluster analysis, the diatom stratigraphy of Galletué Lake was grouped in three zones, clearly separating the period of tephra influx in the profile (Fig. 4).

Zone I (pre-volcanic event period)

This zone was dominated by *Aulacoseira granulata* (Ehr.) Simons., *Cyclotella stelligera* Cleve & Grunow, *Cyclotella* aff. *glomerata*, *Fragilaria construens* (Ehr.) Grunow, and *Fragilaria pinnata* Ehrenberg; *A. granulata* was the most abundant species, fluctuating between 52% and 64%. These results reveal a dominance of planktonic diatoms in the system and a low percentage of benthic diatoms during this period, the latter principally represented by *F. pinnata*.

Zone II (the volcanic event period)

The diatom assemblages structure showed a change in the dominant species, with *A. granulata* being replaced by *Cyclotella* aff. *glomerata* and increases in the abundance of *A. distans* and *A. formosa* Hassall. *Cyclotella* aff. *glomerata* peaked at 51% at 11 cm. On the other hand, diatom concentrations were lower, only beginning to increase at the end of Zone II (Fig. 4). However, the diatom influx showed an increase between 12 and 6 cm, indicating the diatom accumulation was stimulated when tephra arrived into the lake. Subsequently, at the end of this period decreased diatom accumulations were determined.

Zone III (post-volcanic event period)

This period suggests the recovery of the initial conditions, with *A. granulata* returning to the abundance found before the tephra input, whereas *Cyclotella* aff. *glomerata* decreased drastically. *Urosolenia eriensis* (H.L.Smith) Round, Crawford & Mann and *C. meneghiniana* Kützing appeared in the sedimentary record, being most abundant in the upper profile layers. Furthermore, *A. formosa* increased to a maximum of 33% at 5 cm. This period showed an increase of concentration and accumulation of sedimentary diatoms into the lake, principally at the end of Zone III (Fig. 4).

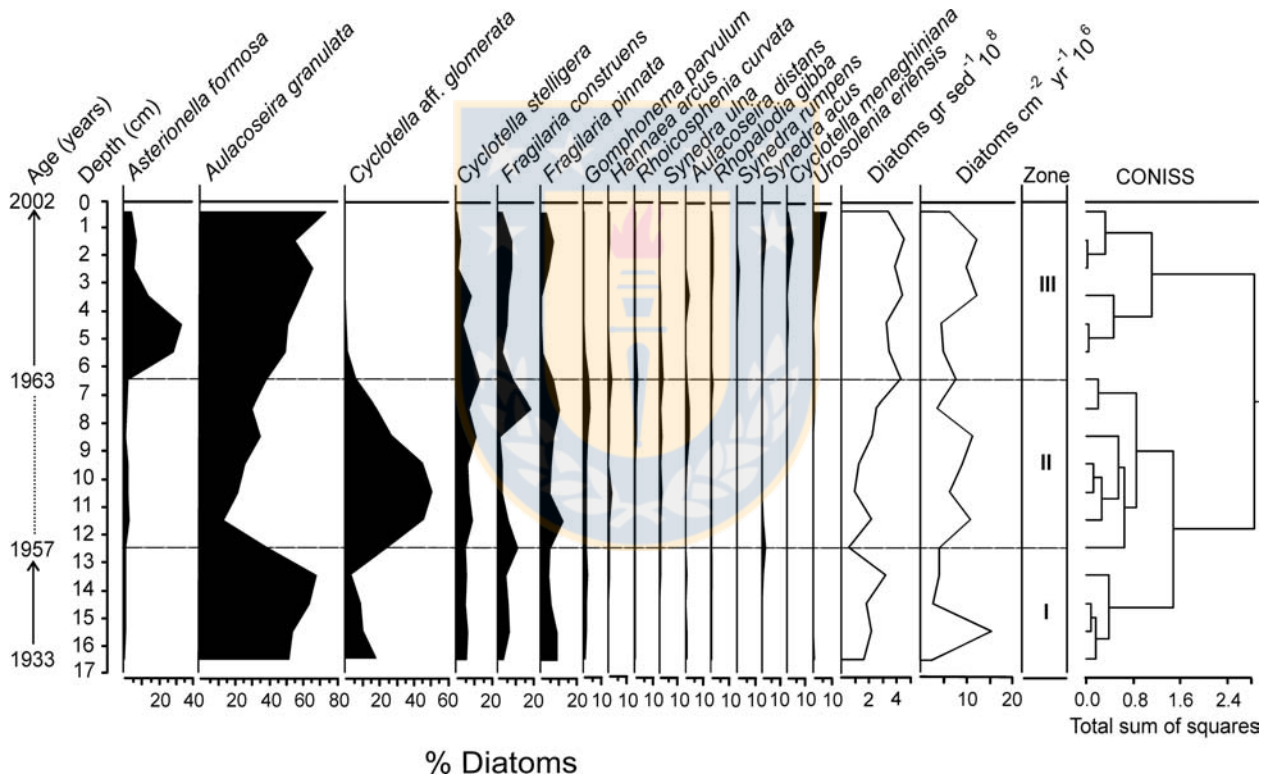


Fig. 4. Summary of sedimentary diatom assemblages in Galletué Lake. The graph shows the stratigraphy of dominant diatoms in the profile, diatom concentration, the influx of diatoms in the lake, and the principal zones identified.

3.5. Discussion

The tephra deposited in lakes through direct discharge into the water column or by dragging material stored in the catchment, can produce important changes in diatom communities due principally to the silica contribution (HARPER et al. 1986, ABELLA 1988, TELFORD et al. 2004).

The tephra found in a segment of sedimentary profile from Galletué Lake showed the influence of a recent volcanic event. This input probably generated changes in the limnological conditions, especially the chemical composition and water turbidity, as reported for other lakes experiencing this kind of environmental disturbance (BIRKS & LOTTER 1994, BRANT & BAHLS 1995, LOTTER et al. 1995).

These changes are reflected by modifications of diatom assemblages in the lake, specially in the dominant species. According to BARKER et al. (2000), the tephra supply principally increase the silica content in the water, increasing the population of diatoms with higher silica incorporation rate.

This situation would explain the increase of *Cyclotella* aff. *glomerata* at the time of tephra input into the lake. According to HAWORTH & HURLEY (1984), *Cyclotella glomerata* Bachmann grows in habitats with high silica availability and, in many cases, the distribution of this species is related to volcanic horizon with high silica content.

The processes of tephra dissolution in the water would have released silica into the system, burying phosphorus in the sediments. These conditions may have disturbed the release of this nutrient from the sediments, modifying phosphorus cycling and the Si/P ratio in the lake. The limited phosphorus negatively affected *A. granulata*, since this species is not a good competitor and is displaced by other taxa in habitats with nutrient and light limitations (KILHAM et al. 1986, BARKER et al. 2000, BARKER et al. 2003).

The increased abundances of *A. formosa* and *U. eriensis* seen after the volcanic event suggest increased lake nutrients, since these species are typical of high-nutrient environments (ALEFS & MÜLLER 1999, CLERK et al. 2000, MERILÄINEN et al. 2000). This result also agrees with the increase of *A. granulata* in the upper layer of the core, probably indicating the recovery of phosphorus levels in the water.

These nutrient levels would have been enough to increase the abundance of *A. granulata*, allowing this species to reach the abundance observed prior to the tephra input. At the same time, the decrease of *Cyclotella* aff. *glomerata* in the most recent period would be the result of a lower silica content in the system, being replaced by *A. granulata* since it is a better competitor when the Si/P ratio decreases.

The higher diatom productivity and increased organic matter at the top of the core showed increased nutrient levels in Galletué Lake after the tephra input. The low diatom concentration and low organic matter found with tephra input were probably due to the dilution of both parameters in the sediment, as consequence of the influx of large quantity of inorganic material. This situation was confirmed by increased diatom influx at the beginning of tephra input, showing the stimulation of diatom productivity resulting from Si input. Subsequently, the decrease of diatom influx at the end of Zone II and at the beginning of Zone III would reflect the Si consumption and low nutrient content into the lake.

When the influence of tephra disappeared from the system, productivity levels were similar to those observed before the volcanic event. However, the diatom concentration showed higher values than those estimated before the volcanic input. This fact indicates that the productivity of the Galletué Lake recovered to the levels found before the tephra input, increasing diatom productivity.

The effects of the tephra deposited into the lake probably lasted for less than 5 years, until the nutrient levels of the system returned to previous levels, especially phosphorus cycling from the sediment. This response agrees with other authors, who indicate that lakes are able to return to conditions prior to tephra input when they are under its influence for a short period of time (TELFORD et al. 2004, BARKER et al. 2000).

Therefore, the recovery of limnological conditions of Galletue Lake, once the tephra effects disappeared, should be short-term, as reflected by the reestablishment of *A. granulata* abundance and the concentration of organic matter and diatoms at the top of the core.

According to the above results, the changes in organic matter and the dominant species in the sedimentary diatom assemblages of Galletué Lake indicate that the supply of tephra to the lake principally produced changes in the silica content, modifying the nutrient availability in the water. However, once the tephra input was finished, the system reestablished its conditions to pre-disturbance values.

Acknowledgements

Fabiola Cruces acknowledges financial support (doctoral fellowship) from the National Commission of Scientific Research and Technology (CONICYT, Chile) and the Graduate School of the University of Concepción, Chile. Part of this research was financially supported by DIUC projects No. 203.310.35-1 and No. 204.310.039-1.0 and FONDECYT No.1050647. The project “Impacts of volcanic activity, climate and land cover changes on the ecology and watershed hydrology of Andean lakes in Southern Central Chile”, funded by the “Bilateral Scientific and Technological Cooperation between Flanders and Chile” is also gratefully acknowledged. We also would like to thank Emmanuel Chapron for his help in the fieldwork.

3.6. References

- ABELLA, S. E. B. (1988): The effect of the Mt Mazama ashfall on the planktonic community of Lake Washington. - *Limnol. Oceanogr.* **33**: 1376-1385.
- ALEFS, J. & MÜLLER, J. (1999): Differences in the eutrophication dynamics of Ammersee and Starnberger See (Southern Germany), reflected by the diatom succession in varve-dated sediments. - *J. Paleolimnol.* **21**: 395-407.
- APPLEBY, P. G. & OLDFIELD, F. (1978): The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. - *Catena* **5**: 1-8.
- BARKER, P., TELFORD, R., MERDADI, O., WILLIAMSON, D., TAIEB, M., VINCENS, A. & GIBERT, E. (2000): The sensitivity of a Tanzanian crater lake to catastrophic tephra input and four millennia of climate change. - *The Holocene* **10**: 303-310.
- BARKER, P. A., WILLIAMSON, D., GASSE, F. & GIBERT, E. (2003): Climatic and volcanic forcing revealed in a 50000-year diatom record from Lake Massoko, Tanzania. - *Quaternary Res.* **60**: 368-376.
- BATTARBEE, R., CHARLES, D., DIXIT, S. & RENBERG, I. (1999): Diatoms as indicators of surface water acidity. - In: STOERMER, E. F. and SMOL, J. P. (eds.): *The Diatoms: Applications to the Environmental and Earth Sciences*. - Cambridge University Press, Cambridge. pp. 85-127.
- BATTARBEE, R. W. & KNEEN, M. J. (1982). The use of electronically counted microspheres in absolute diatom analysis. *Limnol. Oceanogr.* **27**: 184-188.
- BATTARBEE, R. W. (1986): Diatom analysis. - In: BERGLUND, B. E. (ed.): *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. - John Wiley & Sons, Chichester. pp. 527-570.
- BIRKS, H. J. B. & LOTTER, A. F. (1994): The impact of the Laacher See Volcano (11000 yr B.P.) on terrestrial vegetation and diatoms. - *J. Paleolimnol.* **11**: 313-322.
- BOYLE, J. (2002): Inorganic geochemical methods in paleolimnology. - In: LAST, W. and SMOL, J. (eds.): *Tracking environmental change using lake sediments, Vol. 2; Physical and geochemical methods*. - Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. pp. 83-141.
- BRANT, L. & BAHLS, L. (1995): Paleoenvironmental impacts of volcanic eruptions upon a diatom community. - In: KOCIOLEK, J. P. and SULLIVAN, M. J. (eds.): *A century of diatom research in North America: a tribute to the distinguished careers of Charles W. Reimer and Ruth Patrick*. - Stuttgart: Koeltz Scientific.

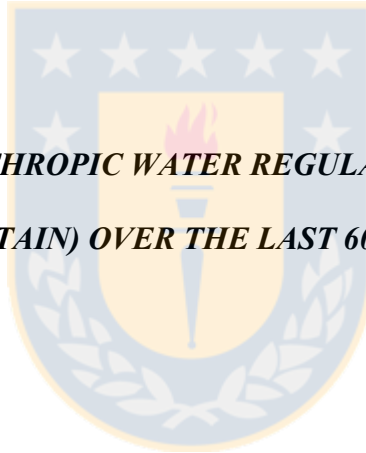
- CLERK, S., HALL, R., QUINLAN, R. & SMOL, J. (2000): Quantitative inferences of past hypolimnetic anoxia and nutrient levels from a Canadian Precambrian Shield lake. - *J. Paleolimnol.* **23**: 319–336.
- EASTWOOD, W. J., TIBBY, J., ROBERTS, N., BIRKS, H. J. B. & LAMB, H. F. (2002): The environmental impact of the Minoan eruption of Santorini (Thera): statistical analysis of palaeoecological data from Gölhisar, southwest Turkey. – *The Holocene* **12**: 431-444.
- GRIMM, E. C. (1987): CONISS: A FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. - *Computers and Geosciences* **13**: 13-35.
- GRIMM, E. C. (1991) TILIA and TILIA GRAPH. Springfield: Illinois State Museum.
- HABERLE, S. G., SZEICZ, J. M. & BENNETT, K. D. (2000): Late Holocene vegetation dynamics and lake geochemistry at Laguna Miranda, XI Region, Chile. - *Rev. Chil. Hist. Nat.* **73**: 655-669.
- HALL, R. & SMOL, J. (1999). Diatoms as indicators of lake eutrophication. - In: STOERMER, E. F. and SMOL, J. P (eds.): *The Diatoms: Applications to the Environmental and Earth Sciences.* - Cambridge University Press, Cambridge. pp. 128-168.
- HARPER, M. A., HOWORTH, R. & MCLEOD, M. (1986): Late Holocene diatoms in Lake Poukawa: effects of airfall tephra and changes in depth. - *New Zeal. J. Mar. Fresh.* **20**: 107-118.
- HAWORTH, E. & HURLEY, M. (1984): Comparison of the Stelligeroid Taxa of the Centric Diatom Genus *Cyclotella*. 8th Diatom Symposium: 43-57.
- HICKMAN, M. & REASONER, M. A. (1994): Diatom responses to late Quaternary vegetation and climate change, and to deposition of two tephras in an alpine and sub-alpine lake in Yoho National Park, British Columbia. - *J. Paleolimnol.* **11**: 173-188.
- KILHAM, P., KILHAM, S. S. & HECKY, R. E. (1986): Hypothesized resource relationships among African planktonic diatoms. - *Limnol. Oceanogr.* **31**: 1169-1181.
- LONGMORE, M. E., O'LEARY, B. M. & ROSE, C. W. (1983): Cesium-137 profiles in the sediment of a partial-meromitic lake on Great Sandy Island, Queensland, Australia. *Hydrobiologia* **103**: 21-27.
- LOTTER, A. F. (2001): The paleolimnology of Soppensee (Central Switzerland), as evidenced by diatom, pollen, and fossil pigment analyses. - *J. Paleolimnol.* **25**: 65-79.
- LOTTER, A. F., BIRKS, H. J. B. & ZOLITSCHKA, B. (1995): Late-glacial pollen and diatom changes in response to two different environmental perturbations: volcanic eruption and Younger Dryas cooling. - *J. Paleolimnol.* **14**: 23-47.

- MERILÄINEN, J. J., HYNYNEN, J., TEPPONEN, A., PALOMÄKI, A., GRANBERG, K. & REINIKAINEN, P. (2000): Importance of diffuse nutrient loading and lake level changes to the eutrophication of an originally oligotrophic boreal lake: a palaeolimnological diatom and chironomid analysis. - *J. Paleolimnol.* **24**: 251–270.
- MORENO, H. & GARDEWEG, M. (1989): La erupción reciente del complejo volcánico Lonquimay (Diciembre de 1988), Andes del Sur. - *Rev. Geol. Chile* **16**: 93-117.
- PARRA, O., CAMPOS, H., STEFFEN, W., AGUERO, G., BASUALTO, S., AVILES, D. & VIGHI, M. (1993): Estudios limnológicos de los Lagos Icalma y Galletue: Lagos de origen del Río BioBio (Chile Central). - In: FARANDA, F. and PARRA, O. (eds.): Evaluación de la calidad del agua y ecología del sistema limnético y fluvial del Río BioBio. - Serie Monografías Científicas Vol. 12. pp. 161-187.
- STEVENSON, R., BOTHWELL, M. & LOWEET, R. (1996): *Algal ecology: Freshwater benthic ecosystems*. - Academic Press, San Diego, 753 p.
- TELFORD, R. J., BARKER, P., METCALFE, S. & NEWTON, A. (2004): Lacustrine responses to tephra deposition: examples from Mexico. - *Quaternary Sci. Rev.* **23**: 2337–2353.
- VEBLEN, T. T. & ASHTON, D. H. (1978): Catastrophic influences on the vegetation of the Valdivian Andes, Chile. - *Vegetatio* **36**: 149-167.
- VEBLEN, T. T., ASHTON, D. H., SCHLEGEL, F. M. & VELEN, A. T. (1977): Plant succession in a timberline depressed by vulcanism in south-central Chile. - *J. Biogeogr.* **4**: 275-294.
- ZEEB, B., CHRISTIE, C., SMOL, J., FINDLAY, D., KLING, H. & BIRKS, H. (1994): Responses of diatom and chrysophyte assemblages in Lake 227 sediments to experimental eutrophication. - *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **51**: 2300-2311.

CAPITULO 4

EFECTO DE LA INTERVENCIÓN ANTRÓPICA SOBRE LOS ENSAMBLES DIATOMOLÓGICOS DEL LAGO LAJA

*DIATOM RESPONSE TO ANTHROPIC WATER REGULATION IN LAJA LAKE (ANDES
MOUNTAIN) OVER THE LAST 60 YEARS*



Referencia:

Fabiola Cruces, Roberto Urrutia, Oscar Parra, María Mardones, Alberto Araneda, Laura Torres
Koen Sabbe & Wim Vyverman. Submitted.

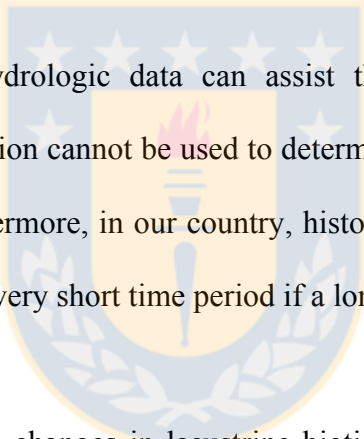
4.1. Abstract

Laja Lake (central Chile, 36°54'S; 71°05'W) has been under anthropic influence since the 1950s, when the water in the system started to be regulated in order to generate hydroelectricity and irrigate land. The available historical water table records have shown strong fluctuations in the water level over the last 40 years, with a declining trend in the most recent period. Using the sedimentary record, diatom assemblages were reconstructed in order to establish the consequences of these water level variations on diatom community structures in the lake. Qualitative and quantitative changes in diatom assemblages were observed, expressed as changes in species abundance and diatom productivity. The principal modifications in the diatom assemblage composition are related to the period of greatest water level fluctuations, in which littoral and planktonic facultative diatoms in the uppermost portion of the profile increased and planktonic diatoms decreased. This response would have been a consequence of the decreased lake level resulting principally from water regulation in the system. Moreover, these changes would indicate that the sedimentary diatom assemblages of Laja Lake can be used as an indicator of water level fluctuations, providing an excellent proxy for long-term environmental reconstructions to be developed in the future.

KEY WORDS: diatoms; lake level; Laja Lake; human influence; sedimentary records; water regulation

4.2. Introduction

Knowledge of natural limnological characteristics prior to human influence, can provides a base line for achieving suitable management of water resources making possible to avoid and minimize negative effects on aquatic organisms and people that use these resources (Legesse et al., 2002; Bradbury et al., 2004); however, it is very difficult to obtain information for extensive time periods, since base line research has not been done in many countries or monitoring programs of aquatic ecosystems have not been implemented or have been interrupted. Consequently, information is not available for distinguishing between natural changes and those resulting from human intervention.

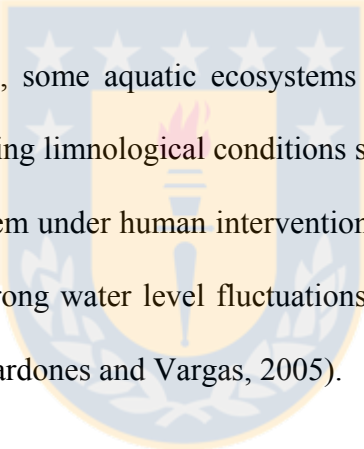


Although meteorological and hydrologic data can assist the understanding of water level fluctuations in lakes, this information cannot be used to determine the effects these modifications have on aquatic organisms. Furthermore, in our country, historical data is generally restricted to the last 50 or 60 years, which is a very short time period if a longer scale is required.

Different research has established changes in lacustrine biotic communities when variations in the water level are produced. These hydrological fluctuations are very important to algae communities, modifying habitat availability, light intensity, chemical conditions, and the stratification regime in the water body (Wolin and Duthie, 1999).

Lacustrine sedimentary records offer long-term information about limnological changes, which can be inferred through different elements preserved in the sedimentary matrix that “report” past conditions (Chalié and Gasse, 2002), and sedimentary diatoms are one of the most important bioindicators in environmental reconstructions due to their sensitivity to variations in

limnological conditions. Many investigations have demonstrated the validity of sedimentary diatoms as indicators of changes in the trophic status (Hall and Smol, 1999; Bradbury et al., 2004), pH (Battarbee et al., 1999; Dixit et al., 2002), salinity (Gasse et al., 1997; Bloom et al., 2003), and water level (Caballero and Ortega, 1998; Fritz et al., 1999; Telford et al., 1999). Trophic status, pH, and salinity are principally expressed by the change of some indicator species, and water level is generally inferred from increased planktonic diatoms with increased water levels. However, that information cannot be applied directly to systems located around the world, since the autoecological characteristics of some diatom species can exhibit differences that modify their tolerance ranges for environmental conditions.



In Chile, during the last decades, some aquatic ecosystems have been severely perturbed by different human activities, modifying limnological conditions such as hydrological balances. Laja Lake is an Andean lacustrine system under human intervention since the 1950s and, according to historical records, has suffered strong water level fluctuations, with levels lower than the mean value under natural conditions (Mardones and Vargas, 2005).

As diatoms are the most important species component in Laja Lake in number and biomass of the phytoplankton community, our goal was to determine whether the sedimentary diatom communities have registered the water level changes during the period of human intervention. This research will allow to determine if diatoms can be used as an indicator of water level variations in future long-term environmental reconstructions in Laja Lake and/or other Chilean lakes with similar environmental conditions.

4.3. **Methods**

4.3.1. Study area

Laja Lake is located at 1360 m.a.s.l. in the Andes Mountains (36°54'S, 71°05'W) and is the most important natural reservoir in Chile (Figure 1). The geological information indicates that the lake was originated by a series of volcanic eruptions 9600 years ago (Lohmar, 2000). The current water uses of Laja Lake are hydropower, irrigation, and recreation (Mardones and Vargas, 2005). Table 1 shows the principal morphometric characteristics of the lake.

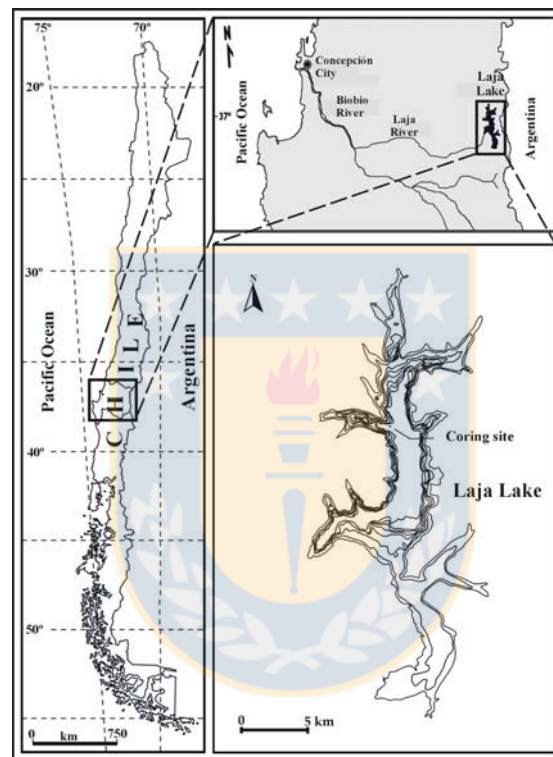


Figure 1. Location of Laja Lake and coring site.

Morphometric parameters	
Max. length (km)	37
Max. width (km)	7
Surface area (km ²)	87
Max. depth (m)	135
Volume (m ³)	6000 X 10 ⁶

Table 1. Principal morphometric characteristics of Laja Lake.

4.3.2. Coring and dating

Using a gravity corer (Uwitec) in December 2001, a 30 cm sediment core was obtained from Laja Lake at a water depth of 120 m. Subsequently, the core was sectioned at 1 cm intervals and the sediment was stored in plastic bags. The core age was obtained by applying ^{210}Pb and ^{137}Cs dating methods; both results were correlated in order to establish an accurate chronology (see Quiroz et al., 2005).

4.3.3. *Chemical analysis*

The total organic matter was determined by loss-on-ignition technique, after 24 hours at 105°C, following the method described by Boyle (2002). The biogenic silica was extracted from the sedimentary matrix with Na_2CO_3 , and quantified following the method of Mortlock and Froelich (1989).

4.3.4. *Water level*

Historical water level and precipitation fluctuation records for Laja Lake were obtained from the monthly records of Endesa S.A, which include the lake levels and precipitations under natural conditions and those under anthropic influence (1942-2001). The measures are given as meters above sea level (m.a.s.l.), considering 1300 m.a.s.l. as the reference level.

4.3.5. *Diatoms*

Diatom analysis was performed at 1 cm intervals. Diatom samples were cleaned by chemical oxidation of 0.1g dry samples, organic matter was eliminated with H_2O_2 , and carbonates were removed with HCl (Battarbee, 1986). A suspension of a known concentration of polystyrene microspheres was added before mounting, enabling the calculation of the diatom concentration per gram of dry sediment (Battarbee and Kneen, 1982). The slides were mounted in a high

refractive index resin (Hyrax: I.R=1.7) and observed with a Zeiss photo-microscope with oil immersion objectives and differential interference contrast illumination. Furthermore, scanning electron microscopy was used when necessary. At least five hundred valves were counted in each stratigraphical layer in order to establish relative percentages of the dominant diatom species and absolute valve numbers of diatoms in the core.

4.3.6. *Data analyses*

Zoning of the diatom stratigraphy was achieved on the basis of stratigraphically constrained incremental sum-of-squares cluster analysis (CONISS; Grimm, 1987) using a square-root transformation and chord-distance dissimilarity measure for diatom species abundance. The diatom assemblage-zone boundaries were delimited by cutting the dendrogram at different heights with pre-specified cut-off criteria in terms of the sums of squares in each cluster. Summary diatom diagrams were constructed using Tilia and Tilia-graph (Grimm, 1991). Diatom diversity was estimated with the Shannon index in each sample.

4.4. **Results**

Water level and precipitation

The hydrologic records of Laja Lake have shown strong fluctuations in the water level between 1960 and 2001. During this period, the lake level fell many times, with the lowest levels in 1970, 1990, and 1999; the latter was the lowest level recorded in Laja Lake over the last 60 years (Figure 2). Moreover, the balance between the variations in the water level records indicates that,

in 2000, the lake level decreased a total of 52 m with respect to the level shown in 1942. It is important to take into account that, before 1960, the lake levels did not show significant changes.

On the other hand, the records of precipitation in the study area showed the lowest value before 1960, increasing after this period; the lower value was recorded during 1955 (891 mm/year) and the higher in 1972 (3219 mm/year) (Figure 2).

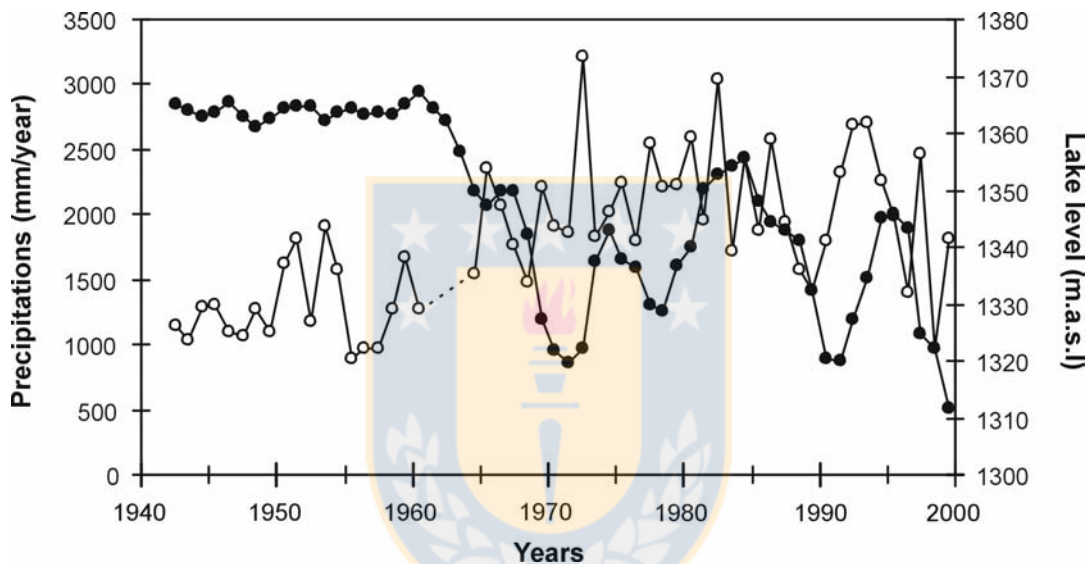


Figure 2. Water level and precipitation records for Laja Lake during the last 60 years. Lake level measurements are given in meters above sea level (m.a.s.l.) with 1300 as a reference level. Shaded circle= lake levels; Clear circle= precipitations; dashed line= no records.

4.4.2. Organic matter and biogenic silica

The content of organic matter in Laja Lake sediment fluctuated between 6.33 and 9.53%, with small variations from the 1940s to the 1980s; an increasing trend was seen for the most recent dates, especially since the mid-1990s. The concentration of biogenic silica ranged from a minimum of 22.9 mg g⁻¹ (1952) to a maximum of 104.7 mg g⁻¹ (2001), increasing in the upper layers of the sedimentary profile (Figure 3).

4.4.3. Diatom assemblage stratigraphy

Diatom valves were well-preserved in all the analyzed sedimentary samples from Laja Lake, allowing taxonomic identification of the total taxa. Figure 3 summarizes the most abundant species; percentages of diatoms with a minimum of >1% in at least three samples are shown. The diatom stratigraphy was grouped using a cluster analysis, thus evidencing five principal periods that can be distinguished throughout the profile (Figure 3).

Zone 1 (ca. 1938 - 1961)

According to dating and historical information, this period represents the conditions prior to human influence on the lake. Assemblages were dominated by the species *Aulacoseira distans* (Ehrenberg) Simonsen, *Cyclotella stelligera* Cleve & Grunow, *Cyclotella* aff. *glomerata*, *Fragilaria construens* (Ehr.) Grunow, *Fragilaria pinnata* Ehrenberg, and *Asterionella formosa* Hassall, with *A. distans* being the most abundant (between 56% and 80%). *C. stelligera* and *C. aff. glomerata* reached abundances of 5% and 10%, respectively. These results reveal the dominance of planktonic diatoms and a low percentage of littoral or facultative planktonic diatoms during this period, the latter principally being represented by *F. construens* and *F. pinnata*, which showed a mean abundances of 4.7% and 2.0%, respectively (Figure 3).

Zone 2 (ca. 1964 - 1972)

The structure of diatom assemblages evidenced a change in the dominant species. The abundance of *A. distans* declined drastically, reaching in this zone the lower values of the study period. At the same time, the abundances of *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen and *A. formosa* increased, with the latter reaching its highest values (85%) throughout the profile. *A. formosa* declined gradually in abundance until the end of the zone. Other planktonic taxa, like *C.*

stelligera and *C. aff. glomerata*, decreased abundances at the beginning and increased abundances at the end of Zone 2. Furthermore, during this period, an increase in the abundance of facultative planktonic diatoms was determined and some taxa, such as *Synedra ulna* (Nitzsch) Ehrenberg and *Fragilaria capucina* Desmazières, which were absent during the previous period, appeared in the record with abundances of 1.7% and 3%, respectively (Figure 3).

Zone 3 (ca. 1975 - 1979)

This zone includes only 12 and 11 cm of the profile, which are characterized by diatom assemblages in which no diatom species abundance is greater than 50%, unlike that observed in the previous zones. Species in this period had abundances less than 20%, with the exception of the facultative planktonic diatom, *Synedra rumpens* Kützing (46.9%); this was the maximum abundance of this species in the study period. *A. formosa* continued decreasing at the end of this zone, reaching an abundance of 12.9% at 11 cm. *A. granulata* increased and the rest of the non planktonic diatoms maintained their abundances (Figure 3).

Zone 4 (ca. 1984 - 2001)

This zone represents the most recent time period, including the ten superficial layers in the profile. This period was characterized by diatom assemblages with greater abundances of *A. distans* than were found in Zones 2 and 3, but with lower abundances than those determined in Zone 1. Otherwise, *A. formosa* showed a decreasing trend towards the uppermost layers. Littoral diatoms, such as *Nitzschia amphibia* Grunow, *Nitzschia palea* (Kützing) W. Smith, *Rhopalodia gibba* (Ehrenberg) O. Müller, *Hannaea arcus* (Ehrenberg) Patrick, and *Diatoma mesodon* (Ehrenberg) Kützing increased, indicating that the facultative planktonic diatoms showed mean abundances higher than in the previous zones (Figure 3).

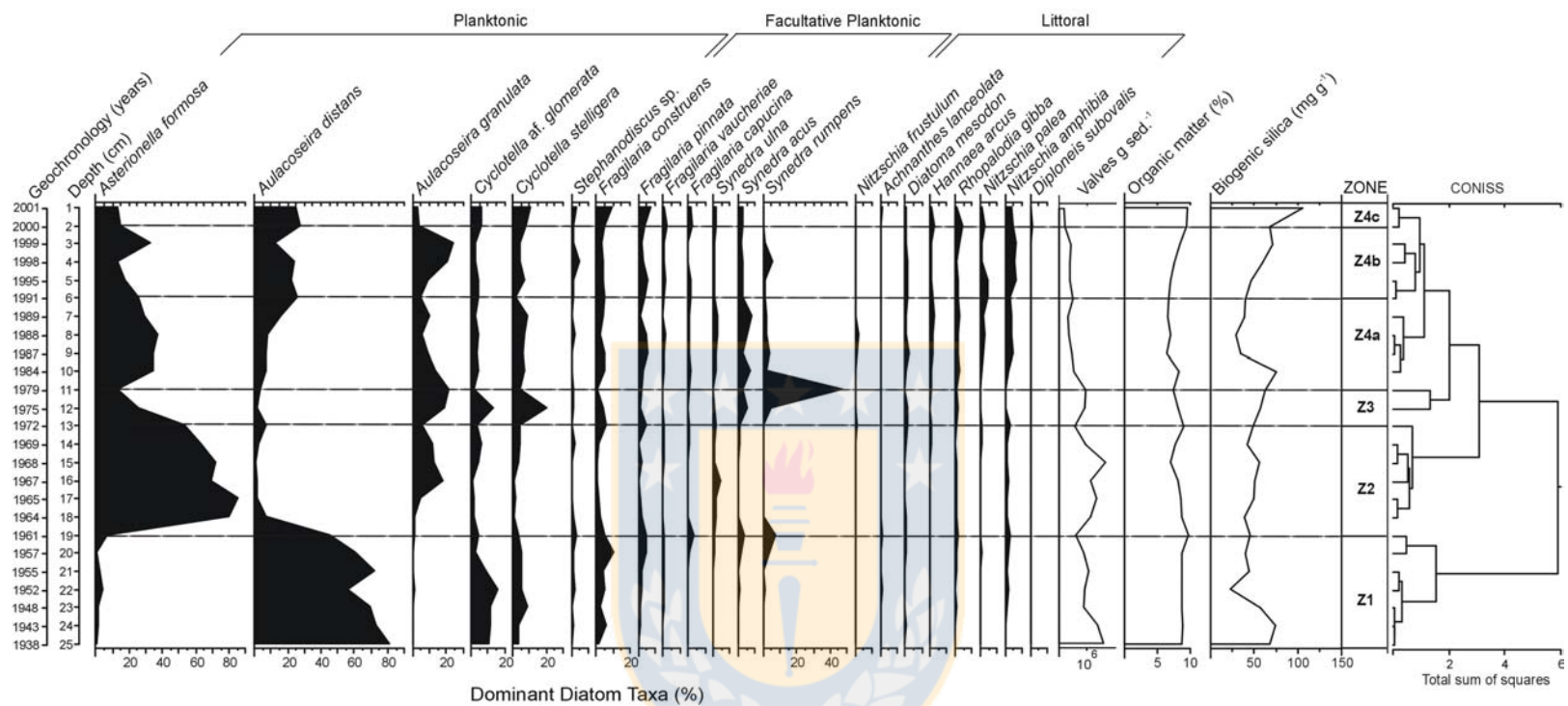


Figure 3. Summary of dominant diatom taxa in Laja Lake, showing the relative diatom abundances and total concentrations in each layer. The content of organic matter, biogenic silica and zones identified by the cluster analysis are included.

4.5. Discussion

Climatic, geological, and anthropic influences on lacustrine systems have been reported as the most important factors for determining the physical, chemical, and biological processes in these systems (Baier et al., 2004; Bradbury et al., 2004; Wolin and Stoermer, 2005). Thus, the hydrologic fluctuations in Laja Lake, resulting principally from the use of the water for hydropower, have modified the limnological conditions of the lake over the last 40 years. These fluctuations, recorded as variations in the water level over time, have been an important environmental factor that determines the conditions for aquatic communities.

The information given by water level records showed strong variations in the level of Laja Lake since 1960, with a total decrease of 52 m between 1942 and 2001. It is important to notice that higher levels were recorded before 1960 and that significant changes in the lake level were not observed at this time, even though precipitation was lower. However, since 1961, these conditions changed completely and the lake showed the highest drop in the lake level with a steadily decreasing trend of the water level, following an opposite trend regarding precipitation levels which were higher than the values recorded before 1960 (Figure 2). Specifically, the changes observed in the lake level at the beginning of the 1960s are attributed to the operation of a drainage tunnel beginning in 1963. This tunnel was constructed to provide water for irrigating land crops and to decrease the water level when necessary.

All of these water level changes are reflecting important modifications of the hydrologic conditions in Laja Lake. These variations are principally attributed to human regulation of water for energy production. Besides, low levels of precipitation recorded during some periods of

drought intensified the effects produced by water regulation during these years (Mardones and Vargas, 2005).

As result, the decreased lake levels would have modified the natural environmental conditions in the system, producing important changes in the littoral zone, particularly affecting the organisms living there. This consequence is very important to diatom communities, as a lower water level and increased littoral zone provide the conditions to stimulate the development of benthic or epiphytic diatoms, changing the composition of the diatom communities in the lake (Fritz, 1990; Moser, 1996).

During the study period, important modifications in the Laja Lake diatom assemblage composition were established. The first important changes in diatom stratigraphy (ca. 1961) indicated variations in diatom assemblages when water regulation started, as registered in the sedimentary record by diatom species composition, abundances, and total concentrations. According to diatom species composition and relative abundances, the assemblages reconstructed since 1961 are completely separate from those representing the previous time period. The principal changes observed were an increase of benthic littoral diatoms and a sharp decrease of planktonic diatoms in the most recent period (Figure 3).

These modifications of diatom communities have been reported in different research carried out on millennial and decadal scales; decreased water levels are inferred when planktonic diatoms are replaced by littoral and epiphytic diatoms in sedimentary assemblages (Cumming et al., 2002; Barker et al., 2002; Xue et al., 2003). Thus, the change in diatom assemblages from Laja Lake

would indicate a decrease in the water level, which agrees with the declining trend evidenced by water table records during the last 40 years, as a consequence of lake water regulation.

On the other hand, the increase of *A.formosa* in Zone 2 (ca. 1961 - 1972) may indicate increased Si/P supply ratios in the lake (Tilman et al., 1982) resulting from significant phosphorus consumption or an influx of silicon from the catchment. The consumption of phosphorus could have been the result of increased productivity of other algae groups (e.g. Chlorophyta), which are also important components of the phytoplankton in the lake at present. Besides, increased organic matter and concentrations of biogenic silica in the uppermost layer of the sedimentary profile could be attributed to enhanced primary production in the lake at this time.

The period between 1975 and 1979 could be considered to be a transitional period, in which diatom assemblages show a higher abundance of facultative planktonic diatoms. This compositional change in the assemblages would be the result of strong fluctuations recorded in the lake's water level at this time, when the hydropower station El Toro began operations in 1973, and the intake system of Alto Polcura started to operate in 1977.

However, the diatom concentration in this part of the core, principally in Zone 4, showed the opposite behavior, decreasing toward the upper layer in the profile. This response would be the result of a dilution of diatom valves into the sedimentary matrix as a consequence of higher allochthonous input into the lake. This situation agrees with the increased sedimentation rate reported in Laja Lake during the 1960s and the second half of the 1990s (Quiroz et al., 2005).

Finally, despite the limitations that could be considered in the information inferred from sedimentary records, the diatom record in Laja Lake shows important changes related to the variations in the lake water level, which are principally related to water regulation during the last 40 years. These changes can give important evidence to future management strategies for minimizing the negative impacts and assuring sustainable management of the water in the system. Furthermore, the response of diatom assemblages to the water variations indicates that the sedimentary record of diatoms in Laja Lake can be used as an indicator of fluctuations in the water level in that lacustrine system, being an excellent proxy for long-term environmental reconstructions.

Acknowledgements

Fabiola Cruces acknowledges financial support (doctoral fellowship) from the National Commission of Scientific Research and Technology (CONICYT, Chile) and the Graduate School of the University of Concepción, Chile. This research was financially supported by DIUC projects No. 203.310.35-1 and No. 204.310.039-1.0. The project “Impacts of volcanic activity, climate and land cover changes on the ecology and watershed hydrology of Andean lakes in Southern Central Chile”, funded by the “Bilateral Scientific and Technological Cooperation between Flanders and Chile” is also gratefully acknowledged.

4.6. References

- Baier J, Lücke A, Negendank JFW, Schleser GH, Zolitschka B. 2004. Diatom and geochemical evidence of mid- to late Holocene climatic changes at Lake Holzmaar, West-Eifel (Germany). *Quaternary International* 113: 81-96.
- Barker P, Telford R, Gasse F, Thevenon R. 2002. Late Pleistocene and Holocene palaeohydrology of Lake Rukwa, Tanzania, inferred from diatom analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 187: 295-305.
- Battarbee R, Charles D, Dixit S, Renberg I. 1999. Diatoms as indicators of surface water acidity. In: *The Diatoms: Applications to the Environmental and Earth Sciences*, Stoermer EF, Smol JP (eds). Cambridge University Press. 85-127.
- Battarbee RW, Kneen MJ. 1982. The use of electronically counted microspheres in absolute diatom analysis. *Limnology and Oceanography* 27: 184-188.
- Battarbee RW. 1986. Diatom analysis. In: *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*, Berglund BE. (ed). John Wiley and Sons, Chichester. pp. 527-570.
- Bloom AM, Moser KA, Porinchu DF, MacDonald GM. 2003. Diatom-inference models for surface-water temperature and salinity developed from a 57-lake calibration set from the Sierra Nevada, California, USA. *Journal of Paleolimnology* 29: 235-255.
- Boyle J. 2002. Inorganic geochemical methods in paleolimnology. In: *Tracking environmental change using lake sediments, Vol. 2; Physical and geochemical methods*, Last W, Smol J (eds). Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. pp. 83-141.
- Bradbury P, Colman S, Reynolds R. 2004. The history of recent limnological changes and human impact on Upper Klamath Lake, Oregon. *Journal of Paleolimnology* 31: 151-165.
- Caballero M, Ortega B. 1998. Lake levels since about 40000 years Ago at Lake Chalco, near México City. *Quaternary Research* 50: 69-79.
- Chalié F, Gasse F. 2002. Late Glacial-Holocene diatom record of water chemistry and lake level change from the tropical East African Rift Lake Abiyata (Ethiopia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 187: 259-283.
- Cumming B, Laird K, Bennett J, Smol J, Salomon A. 2002. Persistent millennial-scale shifts in moisture regimes in western Canada during the past six millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 25: 16117–16121.

- Dixit S, Dixit A, Smol J. 2002. Diatom and chrysophyte transfer functions and inferences of post-industrial acidification and recent recovery trends in Killarney lakes (Ontario, Canada). *Journal of Paleolimnology* 27: 79–96.
- Fritz S, Cumming B, Gasse F, Laird K. 1999. Diatoms as indicators of hydrologic and climatic change in saline lakes. In: *The Diatoms: Applications to the Environmental and Earth Sciences*, Stoermer EF, Smol JP (eds). Cambridge University Press. 41-72.
- Fritz S. 1990. Twentieth-century salinity and water-level fluctuations in Devil's Lake, North Dakota, test of a diatom-based transfer function. *Limnology and Oceanography* 35: 1771-1781.
- Gasse F, Barker P, Gell P, Fritz S, Chalié F. 1997. Diatom-inferred salinity in paleolakes: An indirect tracer of climate change. *Quaternary Science Reviews* 16: 547-563.
- Grimm EC. 1991. *Tilia and Tilia Graph*. Springfield: Illinois State Museum.
- Grimm EC. 1987. Coniss: A Fortran 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers and Geosciences* 13: 13-35.
- Hall R, Smol J. 1999. Diatoms as indicators of lake eutrofication. In: *The Diatoms: Applications to the Environmental and Earth Sciences*, Stoermer EF, Smol JP (eds). Cambridge University Press. 128-168.
- Legesse D, Gasse F, Radakovitch O, Vallet-Coulomb C, Bonnefille R, Verschuren D, Gibert E, Barker P. 2002. Environmental changes in a tropical lake (Lake Abiyata, Etiopía) during recent centuries. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 187: 233-258.
- Lohmar S. 2000. *Estratigrafía, petrografía y geoquímica del Volcán Antuco y sus depósitos (Andes del Sur 37°25'S)*. Universidad de Concepción.
- Mardones M, Vargas J. 2005. Efectos hidrológicos de los usos eléctrico y agrícola en la cuenca del río Laja (Chile centro-sur). *Revista de Geografía Norte Grande* 33: 89-102.
- Mortlock R, Froelich P. 1989. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep Sea Research* 36: 1415-1426.
- Moser K, MacDonald G, Smol J. 1996. Applications of freshwater diatoms to geographical research. *Progress in Physical Geography* 20: 21-52.
- Quiroz R, Popp P, Urrutia R, Bauer C, Araneda A, Treutler H, Barra R. 2005. PAH fluxes in the Laja Lake of south central Chile Andes over the last 50 years: Evidence from a dated sediment core. *Science of the Total Environment* 349: 150-160.

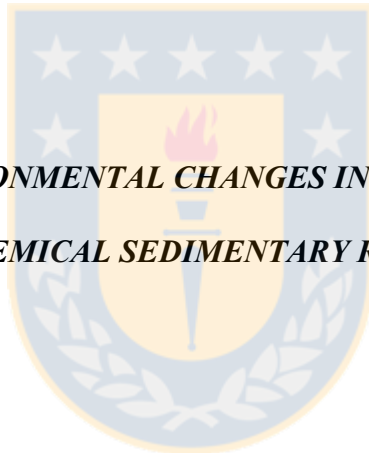
- Telford RJ, Lamb HF, Mohammed U. 1999. Diatom-derived palaeoconductivity estimates from Lake Awassa, Ethiopia: Evidence for pulsed inflows of saline ground-water?. *Journal of Paleolimnology* 21: 409-421.
- Tilman D, Kilham SS, Kilham P. 1982. Phytoplankton community ecology: the role of limiting nutrients. *Annual Review of Ecology and Systematics* 13: 349-372.
- Wolin J, Duthie H. 1999. Diatoms as indicators of water level change in freshwater lakes. In: *The Diatoms: Applications to the Environmental and Earth Sciences*, Stoermer EF, Smol JP (eds). Cambridge University Press. 183-204.
- Wolin J, Stoermer E. 2005. Response of a Lake Michigan coastal lake to anthropogenic catchment disturbance. *Journal of Paleolimnology* 33: 73-94.
- Xue B, Qu W, Wang S, Ma Y, Dickman MD. 2003. Lake level changes documented by sediment properties and diatom of Hulun Lake, China since the late Glacial. *Hydrobiologia* 498: 133-141.



CAPITULO 5

CAMBIOS AMBIENTALES REGISTRADOS EN LA CUENCA DEL LAGO LAJA DURANTE LOS ULTIMOS 2000 AÑOS

***LATE HOLOCENE ENVIRONMENTAL CHANGES IN LAJA LAKE: DIATOM AND
GEOCHEMICAL SEDIMENTARY RECORDS***



5.1. RESUMEN

Los registros sedimentarios lacustres proporcionan una valiosa fuente de información sobre las condiciones pasadas de estos ecosistemas. Por ello, a través del análisis de diversos proxies preservados en la matriz sedimentaria del Lago Laja se realizó una reconstrucción de las condiciones ambientales que ha presentado este sistema durante los últimos 2000 años. Para esto, se extrajo desde la zona de mayor profundidad del lago un núcleo de sedimento de aproximadamente 5 metros de longitud, estableciéndose la edad de los estratos a través de la actividad de los radioisótopos ^{210}Pb y ^{14}C . El perfil fue caracterizado a través del análisis de diversos parámetros físico-químicos (características texturales, materia orgánica, sílice biogénica, carbonatos, fósforo, fierro, manganeso, sodio y cloro) y de los ensamblajes diatomológicos presentes en los estratos sedimentarios. Los resultados obtenidos permiten diferenciar cuatro zonas en el perfil analizado, lo cual reflejaría las variaciones producidas en las condiciones limnológicas de este cuerpo de agua durante el período de estudio. Por otra parte, algunos estratos del perfil evidenciaron importantes cambios sedimentológicos que estarían asociados principalmente a la actividad volcánica en la cuenca. Finalmente, es posible indicar un aumento de la productividad del sistema durante el período más reciente, que se evidenció por el aumento de las diatomeas planctónicas y por parámetros tales como materia orgánica, fósforo y sílice biogénica.

5.2. INTRODUCCIÓN

Los ambientes lacustres, junto con la flora y fauna que se encuentra en ellos, constituyen ecosistemas dinámicos que están en permanente cambio, debido a que sus comunidades responden a una serie de interacciones entre factores bióticos y abióticos (Wetzel, 1981; Benson-Evans et al., 1999; Rodríguez, 1999).

El Lago Laja (36°54'S, 71°05'W) conforma un sistema lacustre altoandino, en el que juegan un rol fundamental tanto los procesos naturales como antrópicos. Por una parte, el lago presenta en su cuenca un complejo volcánico constituido por los volcanes Antuco y Sierra Velluda; el Antuco, de acuerdo a la data histórica disponible ha presentado una permanente actividad eruptiva, registrando un total de 19 eventos de diversa intensidad a partir de 1624, estando el último registrado en 1911 (López, com. pers.). Por otra parte, durante el último siglo este lago también ha experimentado una fuerte influencia antrópica, como consecuencia de la regulación hidrológica a la cual ha estado sometido para producir energía eléctrica (Parra, 1996; Mardones & Vargas, 2005).

Todos estos procesos actuando a través del tiempo directa o indirectamente sobre el cuerpo de agua, sin lugar a dudas han modificado las condiciones limnológicas del sistema, afectando las comunidades algales que se encuentran en el lago. Esto probablemente ha traído como consecuencia cambios en la composición de sus comunidades, debido a que éstas en parte están determinadas por las características fisico-químicas del agua, las cuales pudieron verse afectadas por los procesos naturales y/o antrópicos que influyen el lago.

Los sedimentos lacustres son importantes archivos de información pretérita de los lagos y sus cuencas, debido a que contienen una mezcla de elementos autóctonos y alóctonos derivados tanto de los procesos biológicos como geoquímicos externos e internos. Por lo tanto, los registros preservados en la matriz sedimentaria permiten inferir las condiciones limnológicas pasadas de estos sistemas (Smol & Glew, 1992; Charles et al., 1994; Smol et al., 2001).

En este sentido, el análisis químico del sedimento lacustre constituye un parámetro paleolimnológico de mucho interés, debido a que su interpretación puede aportar aspectos relacionados con los principales procesos determinantes de la historia limnológica del sistema lacustre, así como también aspectos relacionados con la historia de la cuenca. Parámetros químicos tales como contenido de materia orgánica, carbonatos, nutrientes, sílice biogénica y diversos metales, han sido utilizados para inferir entre otros, condiciones tróficas y niveles del agua de los lagos (Ariztegui et al., 2001; Zhang et al., 2002; Legesse et al., 2002; Gaiser et al., 2004; Dalton et al., 2005; McFadden et al., 2005).

En relación a los registros biológicos, las diatomeas han sido uno de los más ampliamente utilizados por la rapidez y sensibilidad de su respuesta frente a los cambios ambientales (Stoermer & Smol, 1999; Smol & Cumming, 2000; Anderson, 2000; Battarbee et al., 2001). De esta forma, el contenido de diatomeas en la matriz sedimentaria puede entregar información valiosa respecto a las condiciones limnológicas, debido a que su abundancia y distribución se encuentra fuertemente controlada por las condiciones físico-químicas y por los procesos sedimentarios en el cuerpo de agua.

De acuerdo a lo anterior, la presente investigación entrega evidencia, sobre las condiciones ambientales presentes en el Lago Laja y su cuenca durante los últimos 2000 años, basada en los ensamblajes diatomológicos sedimentarios y en el contenido de algunos parámetros geoquímicos. La reconstrucción de los cambios ambientales experimentados por este ecosistema a través del tiempo, serán esenciales para comprender el impacto real que los procesos naturales y las actividades antrópicas tienen sobre él, estableciendo la variabilidad natural del lago, de aquella provocada por el hombre especialmente durante el último siglo.

5.3. METODOLOGÍA

5.3.1. *Area de estudio*

El lago Laja se ubica a 1360 m sobre el nivel del mar en la Cordillera de los Andes (36°54'S, 71°05'W) Su formación geológica data de la época glacial. Hace unos 200 mil años se habría excavado el gran cajón andino del Río Laja, dando origen posteriormente al lago, como producto de erupciones volcánicas que bloquearon el valle permitiendo la formación de éste (Lohmar, 2000). El Lago Laja es el mayor embalse natural con que cuenta el país, y de él nace el Río Laja que es el principal tributario del Río Biobío. Tiene una longitud aproximada de 35 Kms desde norte (Punta Chillán) a sur (Babia El Pino), y un ancho máximo de 7 Kms en la zona del volcán Antuco. Tiene una profundidad máxima de 135 metros, una superficie de aproximadamente 87 Km², y un volumen de 6000 millones de metros cúbicos aproximadamente. Sus aguas son heladas y de fuerte oleaje en invierno.

El volumen de agua del lago lo utilizan desde 1958 las centrales Antuco, Abanico y El Toro para la generación de energía hidroeléctrica (Mardones & Vargas, 2005). Además, el agua de este sistema lacustre es utilizada para regadío y fines recreacionales.

5.3.2. *Obtención muestras sedimentarias y datación*

En Diciembre de 2001 se extrajo un núcleo de sedimento desde la zona de mayor profundidad del Lago Laja (120 m) mediante la instalación de una plataforma Uwitec. La longitud del perfil obtenido fue de aproximadamente 5 m. Posteriormente el núcleo fue seccionado a intervalos variables dependiendo del período de estudio; no obstante la mayor resolución en términos de tiempo está dada en el primer metro del perfil, donde se presentan los intervalos más próximos entre sí. La edad de los estratos sedimentarios fue obtenida a través de la medición de los radioisótopos ^{210}Pb , ^{137}Cs (Quiroz et al., 2005) y ^{14}C , utilizándose los dos primeros para el período más reciente, y el último para el más antiguo. Las mediciones de radiocarbono se realizaron en el Instituto de Partículas Físicas del Swiss Federal Institute of Technology Zurich y en el Laboratorio de Radiocarbono del Instituto de Física de la Salesian University of Technology.

Para la presente investigación se trabajó con los primeros 4,2 m del perfil, puesto que de acuerdo a la geocronología éstos representan los últimos 2000 años de evolución del Lago Laja.

5.3.3. *Composición química tefras*

En los estratos con presencia de tefras se determinó la composición química de éstas. Estos análisis se realizaron utilizando una microsonda electrónica (Cameca SX50) en el Centro de Análisis de Microsonda para Ciencias de la Tierra de la Universidad de Liège en Bélgica.

5.3.4.1. *Preparación muestras de diatomeas*

Aproximadamente 0.1 g de sedimento seco de cada muestra fue destinado para análisis de diatomeas. Para eliminar la materia orgánica, las sales disueltas, y lograr una buena visualización de las valvas de diatomeas con sus respectivas ornamentaciones, el material sedimentario fue sometido a un ataque químico con peróxido de hidrógeno al 30% y ácido clorhídrico, de acuerdo a la metodología de Battarbee (1986).

Posteriormente, con el material oxidado se realizaron muestras permanentes para su observación en microscopía fotónica. Para ello, una vez finalizado el procedimiento químico descrito anteriormente, se dejó secar sobre un cubreobjetos una gota de la muestra con diatomeas, la que fue montada sobre un portaobjetos, utilizando resina Hyrax (I.R=1.7) como medio de montaje.

5.3.4.2. *Identificación y conteo de los ensambles de diatomeas*

Para cada estrato de la columna de sedimento analizado se contaron e identificaron un mínimo de 500 valvas de diatomeas. La identificación se realizó a nivel específico en un microscopio fotónico Carl Zeiss Axioplan con objetivo de inmersión y contraste de fase; además se utilizó un microscopio electrónico de barrido JEM 6380 Lv en los casos que la identificación lo requirió. La taxonomía de las especies se basó en literatura especializada para diatomeas.

Para determinar la concentración de diatomeas en cada estrato sedimentario se adicionó una solución de microesferas de poliestireno de concentración conocida, de tal forma de calcular la concentración de diatomeas por gramo de sedimento seco (Battarbee and Kneen, 1982).

5.3.5. Análisis químicos

Materia orgánica: La materia orgánica se determinó mediante la técnica de loss-on-ignition, utilizando aproximadamente 1 g de sedimento seco después de 24 horas a 105°C, luego de lo cual la muestra se llevó a 550°C por 4 horas siguiendo el método descrito por Boyle (2002).

Sílice biogénica: La determinación de este parámetro se llevó a cabo en dos etapas; primero se eliminó la materia orgánica y se realizó una extracción del compuesto desde la matriz de sedimento, para lo cual se utilizó ácido clorhídrico 1N, peróxido de hidrógeno al 10% y carbonato de sodio 2M. Luego, se realizó la medición de la sílice disuelta según el método del azul de molibdeno modificado de Mortlock & Froelich (1989), determinándose la absorbancia con espectrofotometría de absorción molecular a una longitud de onda de 810 nm.

Fósforo total: Para la preparación de la muestra se utilizó ácido sulfúrico al 30% y solución de peroxidisulfato de potasio. En su determinación se midió PO_4 , mediante el método colorimétrico del azul de molibdeno (Jackson, 1964), leído en un espectrofotómetro de absorción molecular a una longitud de onda de 890 nm.

Carbonatos: Se determinó repitiendo el método descrito para la materia orgánica, pero en este caso las muestras se llevaron a 1000°C por 2 horas, de acuerdo a lo descrito por Boyle (2002).

Calcio, Sodio, Aluminio, Hierro y Manganeso: Estos elementos se determinaron mediante espectrofotometría de absorción atómica-llama. Para ello, aproximadamente 0,2 g de muestra fueron lixiviados con ácido clorhídrico al 20% durante 24 horas (Jackson, 1964), después de lo cual se realizó la lectura en el espectrofotómetro con la lámpara específica para cada uno de ellos.

5.3.6. *Análisis de los datos*

Con los datos de los parámetros químicos y las abundancias de los taxa de diatomeas identificados se construyeron diagramas con el Programa Tilia y Tilia-graph (Grimm, 1991). Con los datos de abundancias se realizó un análisis de agrupamiento para establecer estratos con composición similar. Para ello se realizó un análisis de cluster usando el Programa CONISS (Grimm, 1987), estableciéndose las distintas zonas identificadas en el perfil. Mediante el cálculo del índice de Shannon se determinó la diversidad diatomológica en cada estrato sedimentario analizado. Finalmente, se realizó un Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) para establecer la relación entre la data biológica y la geoquímica, utilizando para ello el Programa CANOCO (Ter Braak, 2002).



5.4. RESULTADOS

5.4.1. Geocronología

- Datación con ^{210}Pb

La actividad de este radioisótopo fue medida hasta el estrato 28 del perfil, variando entre 1 y 5 años la edad estimada por cada estrato (Tabla 1).

Tabla 1. Edad de los estratos sedimentarios estimada mediante la actividad del radioisótopo ^{210}Pb .

Estrato (cm)	Años	Estrato (cm)	Años
1	2001	15	1968
2	1999	16	1967
3	1999	17	1965
4	1998	18	1964
5	1995	19	1961
6	1991	20	1957
7	1989	21	1955
8	1988	22	1952
9	1987	23	1948
10	1984	24	1943
11	1979	25	1938
12	1975	26	1935
13	1972	27	1931
14	1969	28	1928

Ex.: Quiroz et al., 2005

Datación con ^{14}C

Se realizaron un total de 6 determinaciones del radioisótopo ^{14}C , con mediciones hechas entre los centímetros 195 y 522 del perfil sedimentario del Lago Laja. Estos resultados indicaron edades entre 436 AD y 1373 BC. (Tabla 2). Cabe indicar que las edades determinadas para los estratos 195-200, 256-257 y 320-321 fueron descartadas de la geocronología por representar edades invertidas en el perfil, probablemente como consecuencia de una alteración en el proceso de depositación y sedimentación.

Tabla 2. Geocronología del perfil sedimentario del Lago Laja establecida a través del radioisótopo ^{14}C .

Estrato (cm)	AMS ^{14}C (Años BP)	Edad Calibrada (AD / BC)
195 – 200	2385 ± 55	*
256 – 257	1780 ± 50	*
320 – 321	2255 ± 75	*
320 – 321	1490 ± 55	436 AD – 653 AD
402 – 405	1915 ± 50	26 AD – 320 AD
519 – 522	3015 ± 50	1373 BC – 1013 BC

AD: Año Domini
 BC: Antes de Cristo
 *: Edades descartadas.

Basado en los resultados de la geocronología con ^{210}Pb y las mediciones de ^{14}C , se desarrolló un modelo de años calendario para asignar las edades a los distintos intervalos del perfil sedimentario del Lago Laja, aplicando para ello un modelo polinomial de segundo orden (Figura 1).

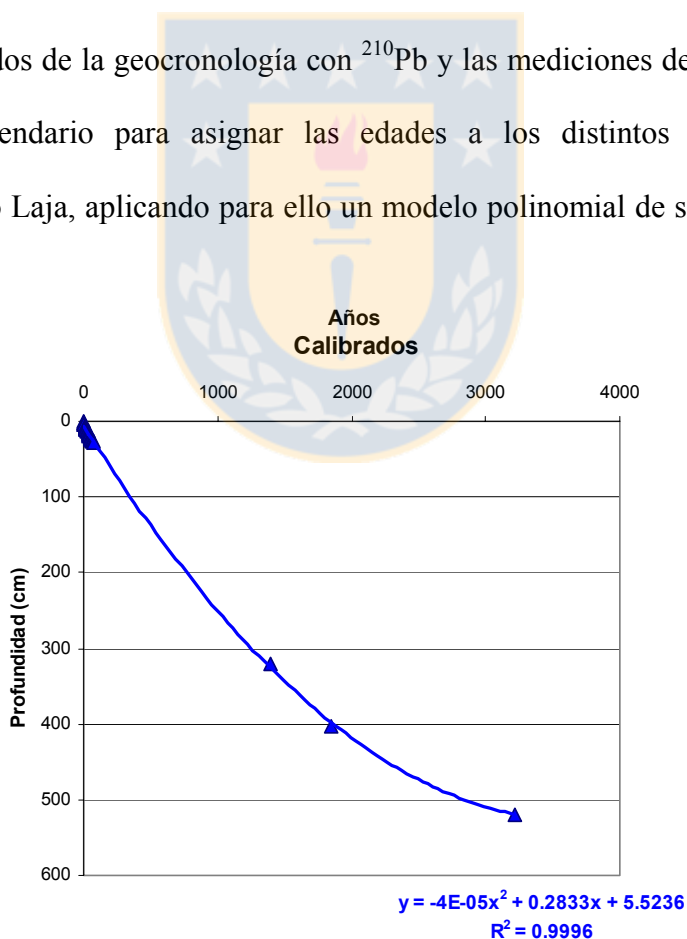


Figura 1. Modelo edad v/s profundidad para el Lago Laja.

5.4.2. Características granulométricas del perfil sedimentario

A lo largo del perfil del Lago Laja fue posible determinar estratos con una composición granulométrica variable, observándose básicamente la presencia de arcillas y arenas, junto con depositaciones de tefras y restos vegetales en la matriz sedimentaria (Figura 2).

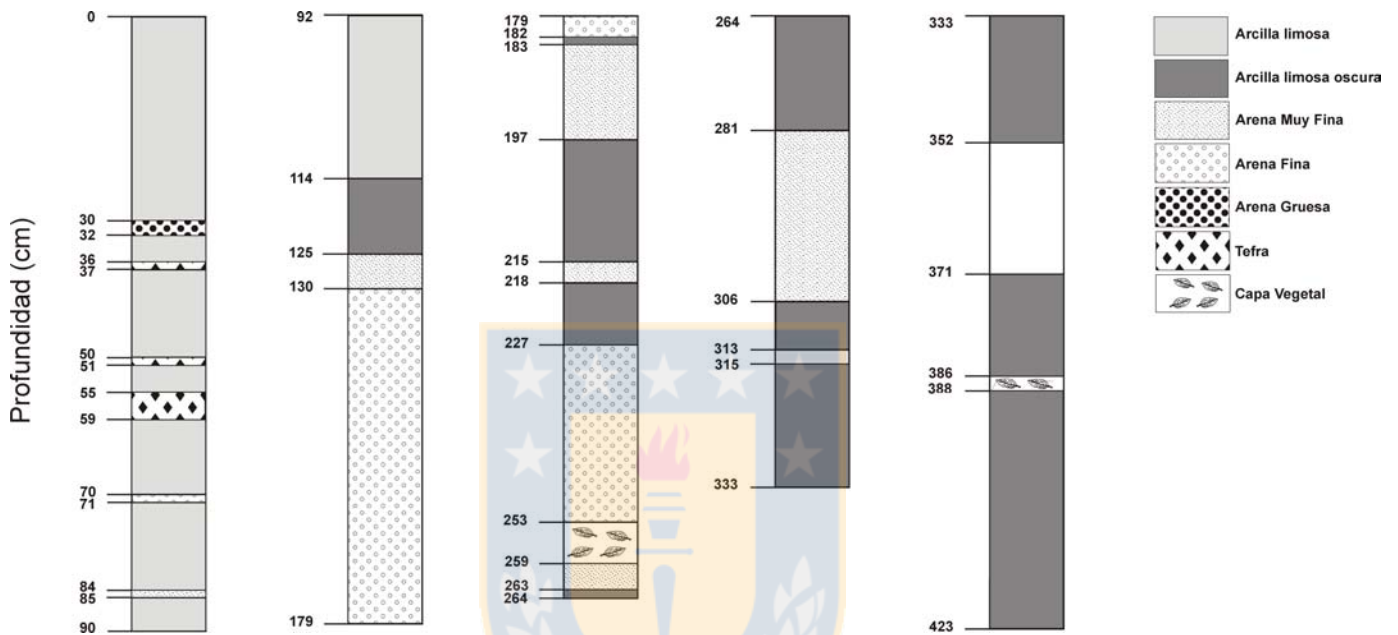


Figura 2. Características granulométricas del perfil sedimentario del Lago Laja.

5.4.3. Composición química tefra

Las tefras presentes en los estratos sedimentarios del Lago Laja presentaron una composición andesítico basáltica, con una composición de SiO_2 que fluctuó entre 53.89 y 55.16 % y un bajo contenido de $\text{Na}_2\text{O}+\text{k}_2\text{O}$ (4.51 a 5.19 %) (Figura 3). Esta composición es similar a lo señalado por Cruces et al. (2006) para el material volcánico encontrado en un perfil sedimentario del Lago Galletué.

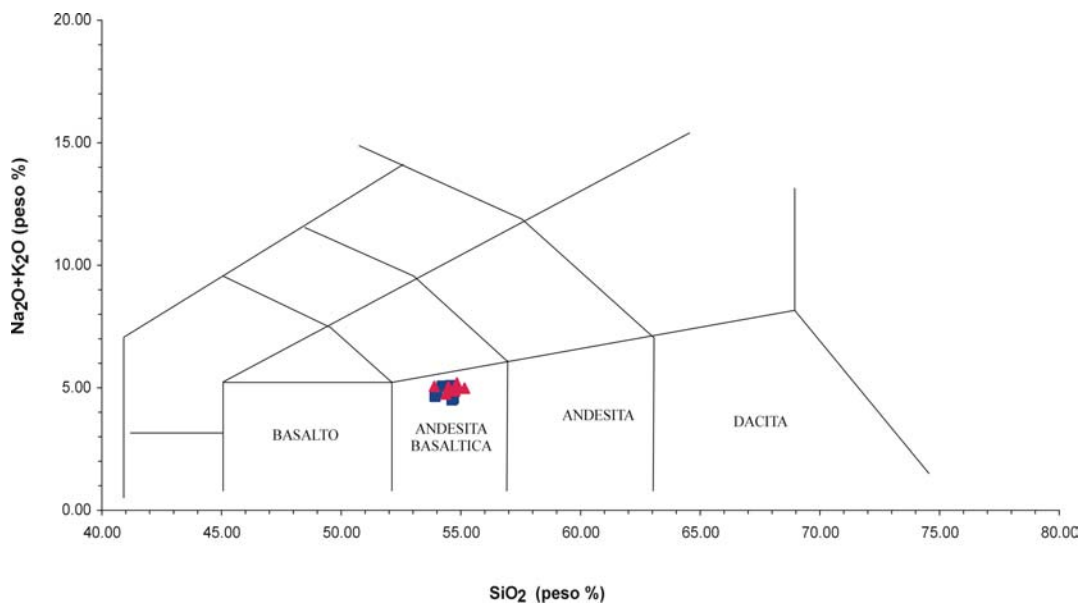


Figura 3. Composición química de las tefras depositadas en el Lago Laja.

5.4.4. Composición ensambles diatomológicos

La preservación de las valvas de diatomeas en la matriz sedimentaria del Lago Laja fue buena, lo que permitió la identificación y cuantificación de éstas en todos los estratos analizados. La mayoría de los taxa presentes en el perfil fueron identificados hasta nivel específico, con algunas excepciones donde fueron señalados hasta nivel genérico debido a ciertas dificultades taxonómicas que están siendo evaluadas actualmente.

El análisis de agrupamiento llevado a cabo con los ensambles diatomológicos reconstruidos a lo largo del perfil, permitió agrupar los estratos en 4 zonas (Figura 4), las que representarían los principales cambios ambientales registrados en el sistema lacustre.

Zona 1 (182 cm – 421 cm)

Esta zona representa el período más antiguo del perfil analizado, y en él los ensambles diatomológicos se caracterizan por la dominancia de las especies *Fragilaria construens*, *Fragilaria pinnata* y *Cyclotella stelligera* (Tabla 3), con abundancias máximas que alcanzaron a 33,3, 39,1 y 30,2% respectivamente. Cabe destacar que entre los estratos 239-259 y 289-300 no se observaron valvas de diatomeas en la matriz sedimentaria, estos estratos corresponden a depósitos de arenas en el perfil.

Por su parte, la concentración de diatomeas en aquellos estratos con presencia de diatomeas fluctuó entre $3,13 \times 10^5$ y $1,73 \times 10^6$ valvas g sed.seco⁻¹, en tanto que el índice de diversidad de Shannon para estos estratos varió entre 1,00 y 1,36.

Zona 2 (96 cm – 179 cm)

Durante este período no se observaron grandes diferencias en la composición de los ensambles diatomológicos respecto a lo señalado para el período anterior, manteniéndose como dominantes las especies *F. construens* (32,9%), *F. pinnata* (37,8%) y *C. stelligera* (20,0%) (Tabla 3). Al igual que en la Zona 1, en algunos estratos (125-179) no fue posible establecer los ensambles diatomológicos debido a que no se registraron valvas en la matriz sedimentaria; al igual que en la zona anterior, estos estratos representan depositación de partículas arenosas.

La concentración y la diversidad de diatomeas presentaron en promedio un leve aumento respecto a la Zona I, fluctuando entre $3,16 \times 10^5$ - $4,42 \times 10^6$ valvas g sed.seco⁻¹ y 1,20 – 1,54, respectivamente.

Zona 3 (27 cm – 90 cm)

Esta zona se caracterizó por un cambio significativo en la composición de los ensambles de diatomeas, observándose el cambio de las especies que habían dominado los ensambles durante los dos períodos mencionados anteriormente. De esta forma, los ensambles pasan a estar dominados por *C. stelligera*, *C. aff. glomerata* y *Aulacoseira granulata* (Tabla 3), reflejando una comunidad mayoritariamente de diatomeas céntricas, al contrario de lo que se había indicado en las zonas anteriores, donde las diatomeas bentónicas del género *Fragilaria* dominaban los ensambles reconstruidos. Además, durante este período aparece en el registro sedimentario la especie *Aulacoseira distans* que alcanza una abundancia máxima de 11,6%.

Durante este período se mantiene la tendencia al aumento en la concentración de diatomeas, variando entre $1,32 \times 10^6$ y $5,62 \times 10^6$ valvas g sed.seco⁻¹, en tanto que la diversidad se mantiene sin grandes variaciones respecto a las Zonas 1 y 2 (1,08-1,32).

Zona 4 (1 cm – 26 cm)

Los estratos incluidos en esta zona representan el período más actual en la historia del Lago Laja. Aquí los ensambles de diatomeas presentan un nuevo cambio en su composición y las especies dominantes en la Zona 3 son reemplazadas por *Aulacoseira distans* (80,6%) y *Asterionella formosa* (85,1%), manteniendo también una alta abundancia *A. granulata* (23,9%) (Tabla 3). Las especies *C. aff. glomerata* y *C. stelligera* disminuyen drásticamente su abundancia, volviendo la primera a las abundancias que presentaba en las Zonas 1 y 2. Cabe destacar que especies bentónicas litorales del género *Synedra* (*S. rumpens*, *S. ulna* y *S. acus*), presentes en algunos estratos de las zonas anteriores con muy bajas abundancias, aumentan durante este período.

La concentración de diatomeas experimentó un aumento al inicio de esta zona, presentando un peak de $8,36 \times 10^6$ valvas g sed.seco^{-1} en el estrato 15 del perfil, luego de lo cual comienza a disminuir llegando a $9,06 \times 10^5$ valvas g sed.seco^{-1} en el estrato superficial (1 cm). Por su parte, la diversidad presentó un aumento respecto a lo que se venía observando en las zonas anteriores, alcanzando el índice de diversidad de Shannon un valor mínimo de 1,08 y un máximo de 1,51.

Tabla 3. Especies de diatomeas dominantes y subdominantes en cada zona establecida en el análisis de agrupamiento.

ZONA	Profundidad (cm)	Geocronología (años)	Especies dominantes	Especies subdominantes
4	0 - 26	2001 AD – 1935 AD	<i>A.distans</i> , <i>A.formosa</i> , <i>A.granulata</i>	<i>C.aff.glomerata</i> , <i>C.stelligera</i> , <i>F.construens</i> , <i>F.pinnata</i>
3	26 - 90	1935 AD – 1685 AD	<i>C.stelligera</i> , <i>C.aff.glomerata</i>	<i>A.granulata</i> , <i>F.construens</i> , <i>F.pinnata</i> , <i>A.distans</i>
2	90 - 179	1685 AD – 1314 AD	<i>F.construens</i> , <i>F.pinnata</i>	<i>C.stelligera</i> , <i>A.granulata</i>
1	179 - 421	1314 AD – 134 BC	<i>F.construens</i> , <i>F.pinnata</i> , <i>C.stelligera</i>	<i>A.granulata</i> , <i>C.aff.glomerata</i>

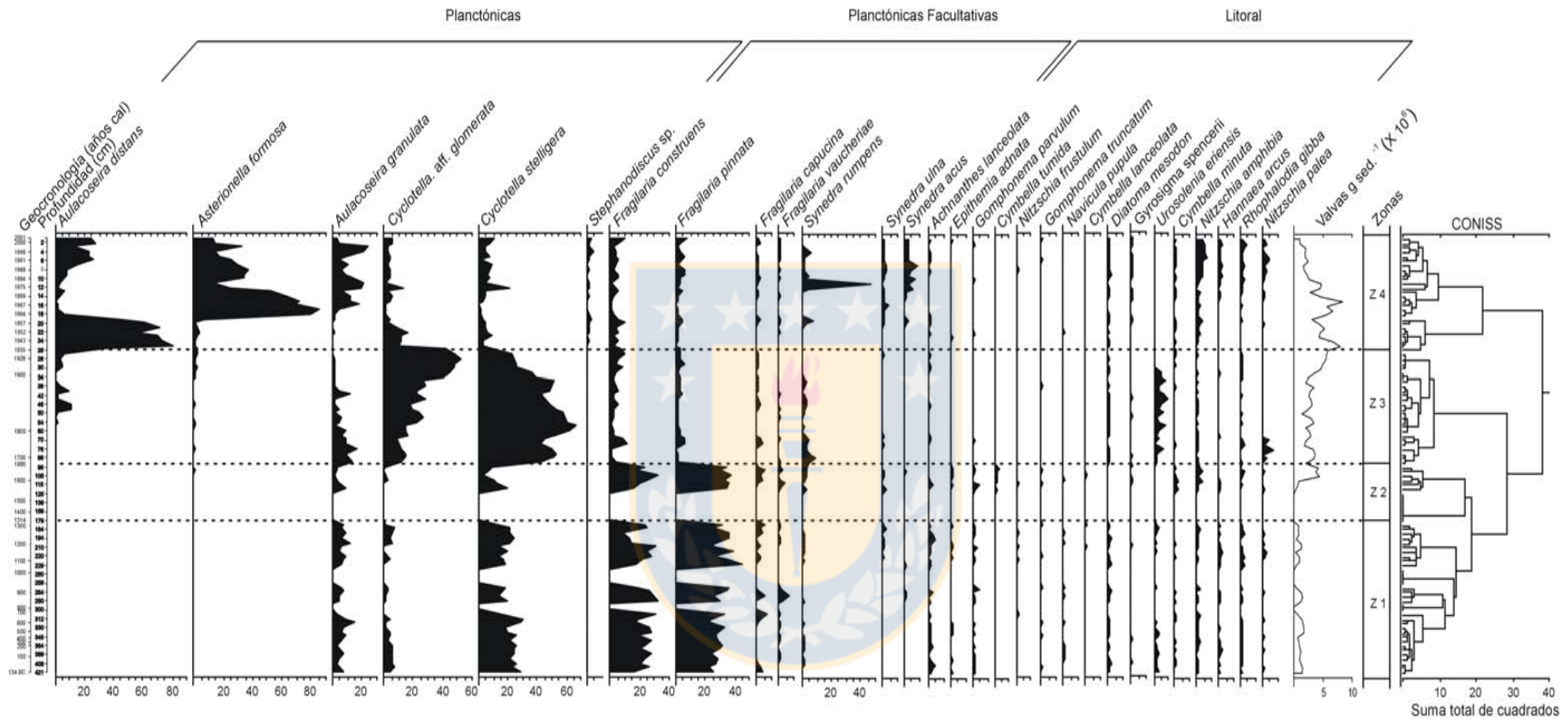


Figura 4. Composición de los ensambles diatomológicos y concentración de diatomeas en el perfil sedimentario del Lago Laja. También se muestra las zonas establecidas por el análisis de agrupamiento.

5.4.5. *Analálisis Químicos*

En la Tabla IV se entrega un resumen con el valor máximo, mínimo y medio de cada parámetro determinado en el perfil sedimentario del Lago Laja.

Tabla 4. Concentraciones de los parámetros geoquímicos en el perfil sedimentario del Lago Laja.

Parámetro	Mínima	Máxima	Media	Media	Media	Media	Media
				Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
P (mg kg ⁻¹)	438.5	2168.0	1197.2	1002.9	822.0	1294.8	1544.9
M.O (%)	1.8	11.9	6.65	6.76	4.39	6.13	8.13
Sib (mg kg ⁻¹)	1790.3	104788.7	24824.6	7798.5	10182.0	26182.9	53104.9
CaCO ₃ (%)	1.1	8.2	3.83	2.49	2.42	3.52	6.61
Fe (mg kg ⁻¹)	19117.6	63278.0	38650.1	32374.3	36029.9	45017.1	42044.9
Mn (mg kg ⁻¹)	276.6	2511.7	1005.5	549.2	629.3	1138.4	1662.5
Na (mg kg ⁻¹)	1616.9	8784.4	5107.8	4755.4	5848.8	5617.3	4708.3
Ca (mg kg ⁻¹)	4403.1	16844.9	8984.2	12251.1	10712.2	7635.9	5144.4
Al (mg kg ⁻¹)	28068.3	58282.5	44862.7	51069.8	45081.2	42306.4	39094.5

A continuación se detalla la tendencia que presentó cada parámetro geoquímico durante los últimos 2000 años, en relación a las zonas establecidas de acuerdo a los ensambles diatomológicos (Figura 5):

Materia orgánica: El contenido de materia orgánica en el lago Laja presentó una leve tendencia al aumento hacia los estratos más recientes del perfil, determinándose los niveles más altos en la Zona 4. La Zona 1 fue la más variable fundamentalmente debido a los depósitos de arena que se encontraron durante este período, lo cual disminuyó el contenido orgánico en la matriz sedimentaria. Lo mismo se pudo observar al comienzo de la Zona 2.

Fósforo (P): La concentración de fósforo total, al igual que el contenido de materia orgánica, presentó una tendencia al aumento hacia los períodos más recientes. De la misma forma, en las Zonas 1 y 2, se determinaron las menores concentraciones de este nutriente en los estratos donde la matriz sedimentaria estaba compuesta fundamentalmente por arenas.

Sílice biogénica: La concentración de este elemento en el sedimento mostró un claro aumento en los estratos que representan la Zona 3 y 4 del perfil. Durante los períodos anteriores (Zona 1 y 2), los niveles de sílice biogénica fueron muy bajos, y al igual que lo establecido para la materia orgánica y el fósforo, los estratos con arenas son los que presentaron las menores concentraciones.

Carbonatos (CO_3): El contenido de carbonatos totales en el lago Laja también mostró un incremento en las Zonas 3 y 4 del perfil, evidenciando los menores valores durante el período más antiguo analizado y los mayores en el más reciente (Zona 4).

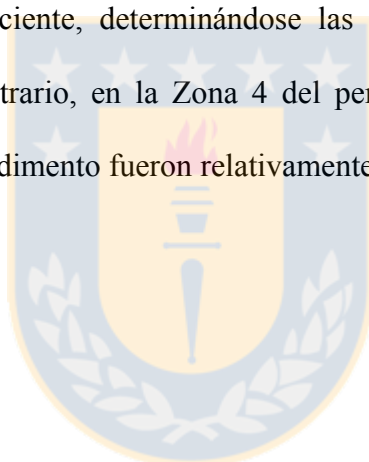
Fierro (Fe): Las concentraciones de fierro no presentaron diferencias significativas entre los diferentes estratos del período analizado. No obstante, fue posible determinar un leve incremento en las Zonas 3 y 4.

Manganeso (Mn): Al contrario de lo observado con el fierro, el manganeso presentó un claro y significativo aumento en las Zonas 3 y 4 del perfil, determinándose las mayores concentraciones en la Zona 4. Sin embargo, durante este período el aporte de este metal al lago fue muy variable, al igual que lo observado en la Zona 1.

Aluminio (Al): Las concentraciones de aluminio en la matriz sedimentaria del Lago Laja, no presentaron diferencias significativas durante el período analizado, aún cuando en la Zona 4 se determinó una leve disminución.

Sodio (Na): Las concentraciones de este elemento mostraron permanentes fluctuaciones durante todo el período de estudio, con las menores concentraciones en la Zona 4 y las mayores en la Zona 2.

Calcio (Ca): Este elemento presentó una clara tendencia hacia la disminución a medida que se avanza hacia el período más reciente, determinándose las mayores fluctuaciones durante el período más antiguo. Por el contrario, en la Zona 4 del perfil fue posible establecer que las concentraciones de calcio en el sedimento fueron relativamente constantes.



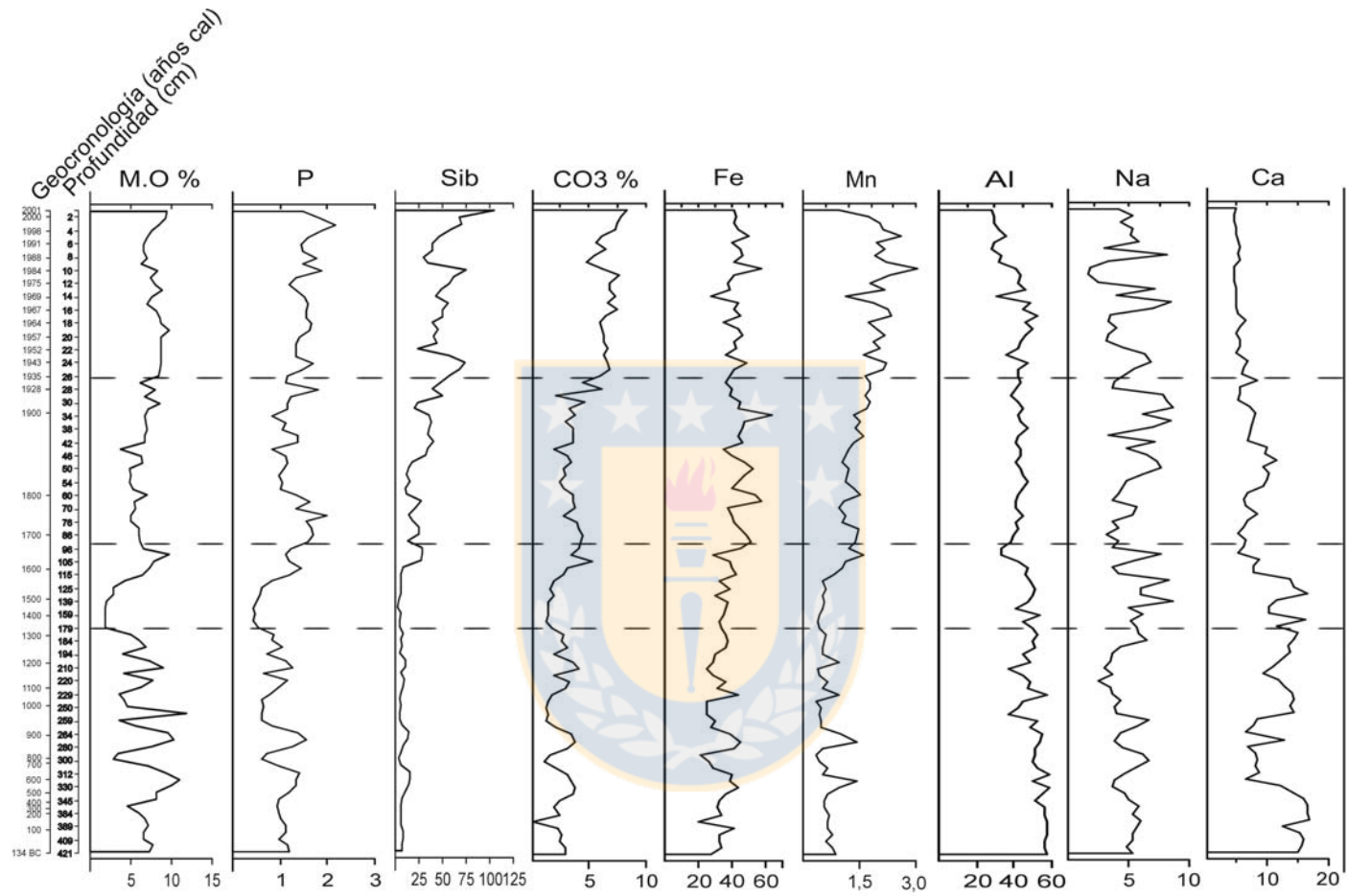


Figura 5. Contenido de los parámetros geoquímicos en cada zona establecida en el Lago Laja. (Concentraciones de P, Sib, Fe, Mn, Al, Na y Ca en g kg^{-1})

5.4.6. Relación entre los ensambles diatomológicos y las variables ambientales

Para establecer la relación existente entre la data biológica (ensambles de diatomeas) y la geoquímica, se realizó un análisis multivariado aplicando un Análisis de Correspondencia Canónica (CCA). Los resultados de este análisis indican que el primer eje explica el 57,8 % de la varianza, en tanto que los ejes 1 y 2 explican el 79,6 % de la varianza total de los datos. De esta forma, es posible indicar que las variables que tienen mayor influencia sobre los estratos que representan el período más reciente (Zona 4) son aquellas que tienen una relación más directa con las variables relacionadas a la productividad del lago (ej. P, Sib). Esto concuerda con la definición de la Zona 4 del perfil, que reflejó fundamentalmente un incremento de nutrientes, materia orgánica y la concentración de diatomeas en el lago.

Para los períodos más antiguos (Zonas 1, 2 y 3) los estratos se presentan influenciados por variables básicamente inorgánicas (Al, Na, Ca) (Figura 6). Esto último probablemente es consecuencia de los aportes externos que recibió el cuerpo de agua desde la cuenca, lo que también se vió reflejado a través de los depósitos de arenas registrados en el perfil.

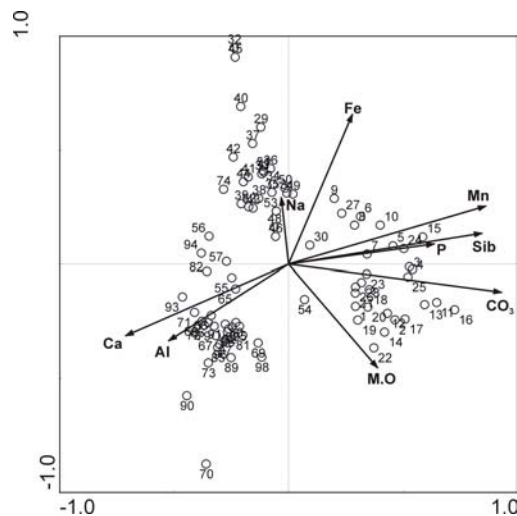


Figura 6. CCA mostrando la relación entre las variables ambientales y los diferentes estratos sedimentarios del Lago Laja.

5.5. DISCUSIÓN

Los registros analizados en la presente investigación mostraron importantes variaciones durante algunos períodos de los últimos 2000 años de historia del Lago Laja, las cuales pueden ser relacionadas a diferentes procesos, entre los cuales podemos mencionar cambios en las condiciones de la columna de agua, en el nivel del lago, y en los aportes que ha recibido el lago desde su cuenca. Lo anterior permite establecer que tanto los proxies físico-químicos como los ensamblajes de diatomeas han demostrado ser sensibles indicadores de las condiciones ambientales que ha presentado el Lago Laja durante el período de tiempo considerado.

Por otra parte, en términos generales los cambios registrados en las diatomeas están en concordancia con los cambios observados en las variables sedimentarias geoquímicas, lo que permite una interpretación más completa de las condiciones en el pasado. Así, las variaciones determinadas durante los últimos 2000 años pueden ser interpretadas tanto en términos de la historia limnológica del Lago Laja, como de los procesos ocurridos en su cuenca.

Los altos porcentajes de abundancia de las especies *Aulacoseira distans* y *Aulacoseira granulata* en los estratos más recientes del perfil estarían reflejando un aumento de la productividad del sistema durante las últimas décadas, concordando con lo señalado por Bracco et al. (2005) quienes establecieron que estas especies aparecen en el registro o aumentan su abundancia al aumentar la trofia (aumentos de materia orgánica y fósforo) de los cuerpos de agua. Además, las especies pertenecientes a este género han sido consideradas como oportunistas (Willén, 1991), lo que explicaría también su alta abundancia en el período más reciente de la historia del lago,

donde el sistema ha estado sometido a importantes fluctuaciones de su régimen hidrológico (Mardones & Vargas, 2005; Cruces et al., 2006).

Por su parte, el aumento y aparición en el registro sedimentario de *A.formosa* y *Stephanodiscus parvus* en la Zona 4 del perfil, también estarían evidenciando un aumento en el nivel de nutrientes (fósforo y sílice) en el lago, puesto que ambas especies han sido señaladas por diversos autores como indicadoras de ambientes con niveles medios a altos de nutrientes (Anderson, 1990; Alefs & Müller 1999; Clerk et al. 2000; Meriläinen et al. 2000; Bradbury et al., 2004).

De acuerdo a la composición mineral y orgánica, en conjunto con los ensambles diatomológicos, los períodos representados por los estratos 125-179, 239-259 y 289-300 representan un ambiente altamente minerogénico, en el cual probablemente este sedimento se depositó rápidamente a través de la llegada de una gran masa de material proveniente de la cuenca. En este sentido, el material que representa dichos estratos tendría su origen en la actividad eruptiva del complejo volcánico Antuco-Sierra Velluda, que se encuentra en el sector sur oeste del lago. De acuerdo a lo anterior, durante el período de estudio este complejo volcánico habría registrado al menos 11 eventos en la matriz sedimentaria del lago, no obstante el número de eventos eruptivos en la cuenca habría sido mayor debido a que sólo en la data histórica disponible para el Volcán Antuco, se registran 19 eventos a partir de 1624 (López, com. pers.). Esto evidencia que probablemente las características de la actividad eruptiva y las condiciones climáticas serían factores determinantes en la llegada de material volcánico al lago.

Por otra parte, el bajo contenido de materia orgánica, carbonatos y sílice biogénica en los estratos con presencia de arenas que se registran en el perfil, serían consecuencia del aporte de la gran

cantidad de material alóctono que llegó al cuerpo de agua, provocando en parte la dilución de estos elementos en la matriz sedimentaria. El peak de materia orgánica determinado entre los estratos 239 y 259 del perfil, es el resultado de la presencia de una gran cantidad de material vegetal en dichos estratos, el que habría llegado al lago desde la cuenca junto con todos los aportes externos que recibió el cuerpo de agua.

Por otra parte, los estratos que evidencian períodos de actividad volcánica habrían originado importantes perturbaciones en el registro sedimentario del Lago Laja, alterando las condiciones limnológicas de este cuerpo de agua. Estas condiciones repercutieron sin lugar a dudas sobre los ensambles de diatomeas, evidenciando la dominancia de *Fragilaria construens* y *Fragilaria pinnata* que han sido señaladas como importantes constituyentes de la flora pionera de los lagos, siendo éstas una de los primeros colonizadores una vez que ocurren fuertes perturbaciones en los cuerpos de agua (Hickman & Schweger, 1991; Hickman & Reasoner, 1998). No obstante, al contrario de lo señalado por Cruces et al. (2006) en el Lago Galletué, en los estratos con material volcánico del Lago Laja, el registro de diatomeas es muy escaso o está ausente en algunos de ellos. Esto probablemente fue el resultado de eventos que sucedieron en períodos muy cortos de tiempo, llegando la masa de material externo de forma muy rápida. Una vez que éste se depositó en el fondo del lago, se reestablecieron las condiciones limnológicas que permitieron nuevamente el desarrollo de las comunidades de diatomeas.

Por su parte, la alta abundancia y dominancia de especies bentónicas del género *Fragilaria* (*F. pinnata* y *F. construens*) durante los períodos mencionados anteriormente (Zonas 3 y 4), también sugeriría un sistema con un bajo contenido de nutrientes en la columna de agua (Brugam et al., 1998). Esta condición es respaldada por el contenido de fósforo en los sedimentos, que también

mostró niveles más bajos durante dicho período. Desde un punto de vista climático, las altas abundancias de las especies mencionadas anteriormente en las Zona 1 y 2 también podría estar reflejando condiciones más húmedas y frías en el área del lago (Smol, 1988; Laing et al., 1999). Sin embargo, la marcada influencia volcánica durante estos períodos, dificulta establecer relaciones entre los ensambles de diatomeas y las características del clima en esa época.

Por su parte, las condiciones establecidas durante el período que representa la Zona 3 estarían dadas fundamentalmente por cambios en procesos más bien internos del cuerpo de agua, en el que se observó básicamente un aumento de la productividad del sistema. Esto llevó al reemplazo de las diatomeas que habían dominado los ensambles durante los períodos anteriores, presentando dos taxa del género *Cyclotella* las mayores abundancias determinadas en esta zona del perfil. De acuerdo a diversos autores, la dominancia de diatomeas planctónicas en muchos casos es un indicador de ambientes con mayor disponibilidad de nutrientes o con alta productividad, lo cual estaría en concordancia con la tendencia al aumento en la materia orgánica, fósforo y sílice biogénica que se comienza a observar durante la Zona 3.

Finalmente, las modificaciones determinadas en los ensambles diatomológicos evidenciados en la Zona 4 del perfil del Lago Laja, serían principalmente el resultado de las variaciones hidrológicas que ha experimentado este sistema durante este período de tiempo (Cruces et al., sometido). Lo anterior se evidenció básicamente por el aumento de especies bentónicas-litorales, junto con la disminución de los taxa planctónicos, los que son coincidentes con los principales cambios hidrológicos que se han señalado para el lago como consecuencia de la regulación hidrológica a la cual ha estado sometido (Mardones & Vargas, 2005). Durante este período también habría

aumentado la productividad del lago, lo que se refleja por el aumento de los parámetros químicos que se relacionan con esta condición limnológica (ej. materia orgánica, fósforo, sílice biogénica).

Así entonces, los diferentes proxies analizados en la presente investigación indican o revelan cambios limnológicos y ambientales en el Lago Laja y su cuenca, con respuestas variables en las condiciones del sistema dependiendo del período de tiempo del cual se trate.

Los resultados obtenidos permiten indicar que la capacidad para establecer cambios ambientales a partir de los registros sedimentarios, en ciertos casos puede ser limitada debido en parte a que ciertos procesos son difíciles de descifrar por los múltiples factores que los influyen. No obstante estas limitaciones, los registros sedimentarios analizados en el Lago Laja nos proporcionan una valiosa fuente de información pasada de éste y de los cambios que ha experimentado a través del tiempo. En este sistema se evidenció la fuerte influencia volcánica a la que ha estado expuesto el cuerpo de agua, especialmente durante el período más antiguo; y por otra parte, en tiempos recientes (Zona 4) se hacen evidentes los efectos que ha tenido la intervención antrópica sobre las condiciones limnológicas de este cuerpo de agua.

5.6. BIBLIOGRAFIA

- Alefs J. & J. Müller. 1999. Differences in the eutrophication dynamics of Ammersee and Starnberger See (Southern Germany), reflected by the diatom succession in varve-dated sediments. *J. Paleolimnol.* 21: 395–407.
- Anderson N. 1990. The biostratigraphy and taxonomy of small *Stephanodiscus* and *Cyclostephanos* species (Bacillariophyceae) in a eutrophic lake and their ecological implications. *Brit. Phycol. J.* 25: 217-235.
- Ariztegui D., C. Chondrogianni, A. Lami, P. Guilizzoni & E. Lafargue. 2001. Lacustrine organic matter and the Holocene paleoenvironmental record of Lake Albano (central Italy). *J. Paleolim.* 26: 283-392.
- Battarbee R. & M. Kneen. 1982. The use of electronically counted microspheres in absolute diatom analysis. *Limnology and Oceanography* 27: 184-188.
- Battarbee R. 1986. Diatom analysis. In: *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*, Berglund BE. (ed). John Wiley and Sons, Chichester. pp. 527-570.
- Battarbee R., V. Jones, R. Flower, N. Cameron, H. Bennion, L. Carvalho & S. Juggins. 2001. Diatoms. In: *Tracking environmental change using lake sediments, Vol. 3; Terrestrial, Algal and Siliceous Indicators*, Last W, Smol J (eds). Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. pp. 155-203.
- Benson-Evans K., R. Antoine & S. Antoine. 1999. Studies of the water quality and algae of Llangorse Lake. *Aquatic Conserv.: Mar. Freshw. Ecosyst.* 9: 425–439.
- Boyle J. 2002. Inorganic geochemical methods in paleolimnology. In: *Tracking environmental change using lake sediments, Vol. 2; Physical and geochemical methods*, Last W, Smol J (eds). Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. pp. 83-141.
- Bracco R., H. Inda, L. del Puerto, C. Castiñeira, P. Sprechmann & F. García-Rodríguez. 2005. Relationships between Holocene sea-level variations, trophic development, and climatic change in Negra Lagoon, Southern Uruguay. *Journal of Paleolimnology* 33: 253–263.
- Bradbury J., S. Colman & R. Reynolds. 2004. The history of recent limnological changes and human impact on Upper Klamath Lake, Oregon. *J. Paleolim.* 31: 151-165.
- Brugam R.B., K. McKeever & L. Kolesa. 1998. A diatom-inferred water depth reconstruction for an Upper Peninsula, Michigan, lake. *J. Paleolim.* 20: 267-276.

- Charles, D., Smol, J., Engstrom, D. 1994. Paleolimnological approaches to biomonitoring. Biological monitoring of aquatic systems. Loeb, S. and A. Spacie (eds). Ann Arbor, Kansas, Lewis press: 233-293.
- Clerk S., R. Hall, R. Quinlan & J. Smol. 2000. Quantitative inferences of past hypolimnetic anoxia and nutrient levels from a Canadian Precambrian Shield lake. *J. Paleolimnol.* 23: 319–336.
- Cruces F., R. Urrutia, O. Parra, A. Araneda, H. Treutler, S. Bertrand, N. Fagel, L. Torres, R. Barra & L. Chirinos. 2006. Changes in diatom assemblages in an Andean lake in response to a recent volcanic event. *Archiv für Hydrobiologie* 165: 23-35.
- Dalton C., H. Birks, S. Brooks, N. Cameron, R. Evershed, S. Peglar, J. Scott & R. Thompson. 2005. A Multi-proxy study of lake-development in response to catchment changes during the Holocene at Lochnagar, north-east Scotland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 221:175-201.
- Gaiser E., M. Brooks, W. Kenney, C. Schelske & B. Taylor. 2004. Interpreting the hydrological history of a temporary pond from chemical and microscopic characterization of siliceous microfossils. *J. Paleolim.* 31: 63-76.
- Grimm EC. 1987. Coniss: A Fortran 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers and Geosciences* 13: 13-35.
- Grimm EC. 1991. Tilia and Tilia Graph. Springfield: Illinois State Museum.
- Hickman M. & C.E. Schweger. 1991. A palaeoenvironmental study of Fairfax Lake, a small lake situated in the Rocky Mountain Foothills of west-central Alberta. *J. Paleolim.* 6: 1-15.
- Hickman M. & M. Reasoner. 1998. Late Quaternary diatom responses to vegetation and climate change in a subalpine lake in Banff National Park, Alberta. *J. Paleolim.* 20: 253-265.
- Jackson M. 1964. Análisis químico de suelos. Ediciones Omega S.A, Vol. 1, Barcelona-España. 367 pp.
- Laing T., K. Rühland & J. Smol. 1999. Past environmental and climate changes related to tree-line shifts inferred from fossil diatoms from a lake near the Lena River Delta, Siberia. *The Holocene* 9: 547-557.
- Legesse D., F. Gasse, O. Radakovitch, C. Vallet-Coulomb, R. Bonnefille, D. Verschuren, E. Gibert & P. Barker. 2002. Environmental changes in a tropical lake (Lake Abiyata, Ethiopia) during recent centuries. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 187 : 233-258.

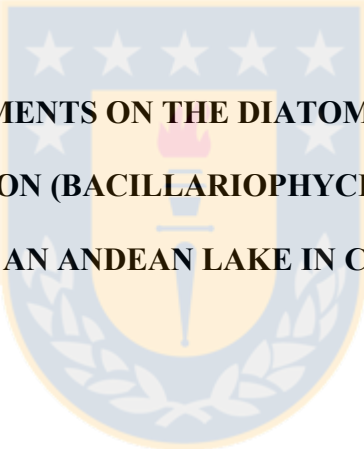
- Lohmar S. 2000. Estratigrafía, petrografía y geoquímica del Volcán Antuco y sus depósitos (Andes del Sur 37°25'S). Universidad de Concepción.
- Mardones M, J. Vargas. 2005. Efectos hidrológicos de los usos eléctrico y agrícola en la cuenca del río Laja (Chile centro-sur). *Revista de Geografía Norte Grande* 33: 89-102.
- McFadden M., W. Patterson, H. Mullins & W. Anderson. 2005. Multi-proxy approach to long – and short-term Holocene climate-change: evidence from eastern Lake Ontario. *J. Paleolim.* 33: 371-391.
- Meriläinen J., J. Hynynen, A. Teppo, A. Palomäki, K. Granberg & P. Reinikainen. 2000. Importance of diffuse nutrient loading and lake level changes to the eutrophication of an originally oligotrophic boreal lake: a palaeolimnological diatom and chironomid analysis. *J. Paleolimnol.* 24: 251–270.
- 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.
- Quiroz R, Popp P, Urrutia R, Bauer C, Araneda A, Treutler H, Barra R. 2005. PAH fluxes in the Laja Lake of south central Chile Andes over the last 50 years: Evidence from a dated sediment core. *Science of the Total Environment* 349: 150-160.
- Rodríguez J. 1999. *Ecología*. Ediciones Pirámide, Barcelona, España. 411 pp.
- Smol J. & B. Cumming. 2000. Tracking long-term changes in climate using algal indicators in lake sediments. *J. Phycology* 36: 986-1011.
- Smol J. & J. Glew. 1992. Paleolimnology. In: *Encyclopedia of Earth System Science, Volume 3*, Academic Press, Inc. pp. 551-564.
- Smol J. 1988. Paleoclimate proxy from freshwater arctic diatoms. *Verh. Int. Ver. Limnol.* 23 : 837-844.
- Smol J., H. Birks & W. Last. 2001. Using biology to study long-term environmental change. In : *Tracking environmental change using lake sediments, Vol. 3; Terrestrial, Algal and Siliceous Indicators*, Last W, Smol J (eds). Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. pp. 1-3.
- Stoermer E. & J. Smol. 1999. *The diatoms: Applications for the environmental and earth sciences*. Cambridge University Press. 469 pp.
- Ter Braak C. 2002. *Program CANOCO Version 4.5*. Wageningen University and Research Centre, The Netherlands.
- Wetzel R. 1981. *Limnología*. Ediciones Omega S.A. Barcelona- España. 679 pp.
- Willén E. 1991. Planktonic diatoms-an ecological review. *Algological Studies* 62: 69-106.

Zhang H., B. Wünnemann, Y. Ma, J. Peng, H. Pachur & Z. Feng. 2002. Lake Level and Climate Changes between 42,000 and 18,000 ^{14}C yr B.P in the Tengger Desert, Northwestern China. Quaternary Research 58: 62-72.



CAPITULO 6

TRABAJO TAXONOMICO



**OBSERVATIONS AND COMMENTS ON THE DIATOM *STEPHANODISCUS PARVUS*
STOERMER & HÅKANSSON (BACILLARIOPHYCEAE) FOUND IN BOTTOM
SEDIMENTS OF AN ANDEAN LAKE IN CENTRAL CHILE**

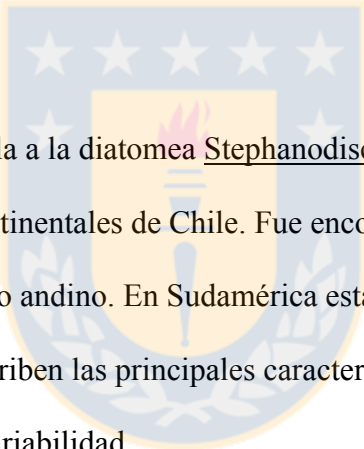
Referencia:

Fabiola Cruces, Patricio Rivera & Roberto Urrutia. Submitted.

6.1. Abstract

This study reports the diatom Stephanodiscus parvus Stoermer & Håkansson for the first time in Chilean continental waters. This species was found in a sedimentary profile collected from Lake Laja, an Andean lake. The only previous report of this diatom in South America was in Argentina. We describe the principal morphological features of S. parvus and comment on its variability.

Key words: First record, Chile, morphology, variability



Resumen: En este estudio se señala a la diatomea Stephanodiscus parvus Stoermer & Håkansson por primera vez para las aguas continentales de Chile. Fue encontrada en un perfil sedimentario recolectado en el lago Laja, un lago andino. En Sudamérica esta especie había sido señalada solamente para Argentina. Se describen las principales características morfológicas de S. parvus y se entregan comentarios de su variabilidad.

Palabras clave: Primera cita, Chile, morfología, variabilidad

6.2. Introduction

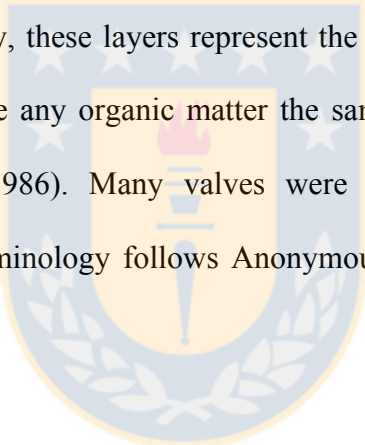
Stephanodiscus Ehrenberg is a planktonic, freshwater genus present in rivers, lakes and reservoirs around the world (e.g., Håkansson 2002, Håkansson & Hickel 1986, Håkansson & Ehrlich 1987, Håkansson & Meyer 1994, Round et al. 1990, Stoermer & Håkansson 1984, Theriot & Stoermer 1982). Until now, three species have been reported in Chilean continental waters: S. hantzschii Grunow (Kraske –1939- from the Calbuco area (41°46'S, 73°08'W) and Río Pascua (48°10'S, 73°10'W); S. agassizensis Håkansson & Kling (Rivera et al. –2003- in Lake Chungará (18°14'S, 69°09'W); and recently, S. kuetszingii Klee & Casper (Rivera & Cruces – 2005- in Rapel Reservoir (34°10'S, 71°29'W). Other two Stephanodiscus species (S. astraea Ehrenberg & Grunow and S. novaezeelandiae Cleve), found in Chile previously correspond to the genera Cyclotella (Kützing) Brébisson and Cyclostephanos Round, respectively (Håkansson 2002).

The diatomological analysis of sedimentary profile samples covering the last 70 years of Lake Laja's history, showed the presence of another representative of Stephanodiscus genus. Upon examination, these valves were identified as S. parvus Stoermer & Håkansson (1984). Although it is widely distributed in North American and European lakes, in South America, this taxon has only been reported in Argentina. The Chilean specimens revealed variability of some morphological characteristics for the taxon, especially the number of valve face fultoportulae and the number of satellite pores. This paper, describes and illustrates the principal morphological features of S. parvus, and comments on some other closely related taxa (S. hantzschii and S. minutulus (Kützing) Cleve et Möller).

6.3. Material and methods

Lake Laja is an Andean lake located 1360 m above sea level, in the Antuco Volcano area (36°54'S, 71°05'W). The lake is 35 km long, 7 km wide, has a surface of 87 km², and a volume of 6,000,000 m³. In winter, the lake swells considerably, and, since 1958, the lake water is used for hydropower, irrigation, and recreation (Mardones & Vargas 2005).

The diatom material analyzed, deposited in the Diatom Collection, Department of Botany, University of Concepción, Chile, (DIAT-CONC), was obtained in December 2001 from a sedimentary profile taken at the deepest part of the lake (120 m depth). The core was sectioned at 1 cm intervals, and the 30 surface layers were analyzed (DIAT-CONC M-3261 to 3290). According to ²¹⁰Pb geochronology, these layers represent the last 70 years of the lake's history (Quiroz et al. 2005). To eliminate any organic matter the samples were treated with hydrogen peroxide following Battarbee (1986). Many valves were studied under scanning electron microscopy (JEM 6380 Lv). Terminology follows Anonymous (1975), Ross et al. (1979), and Håkansson (2002).

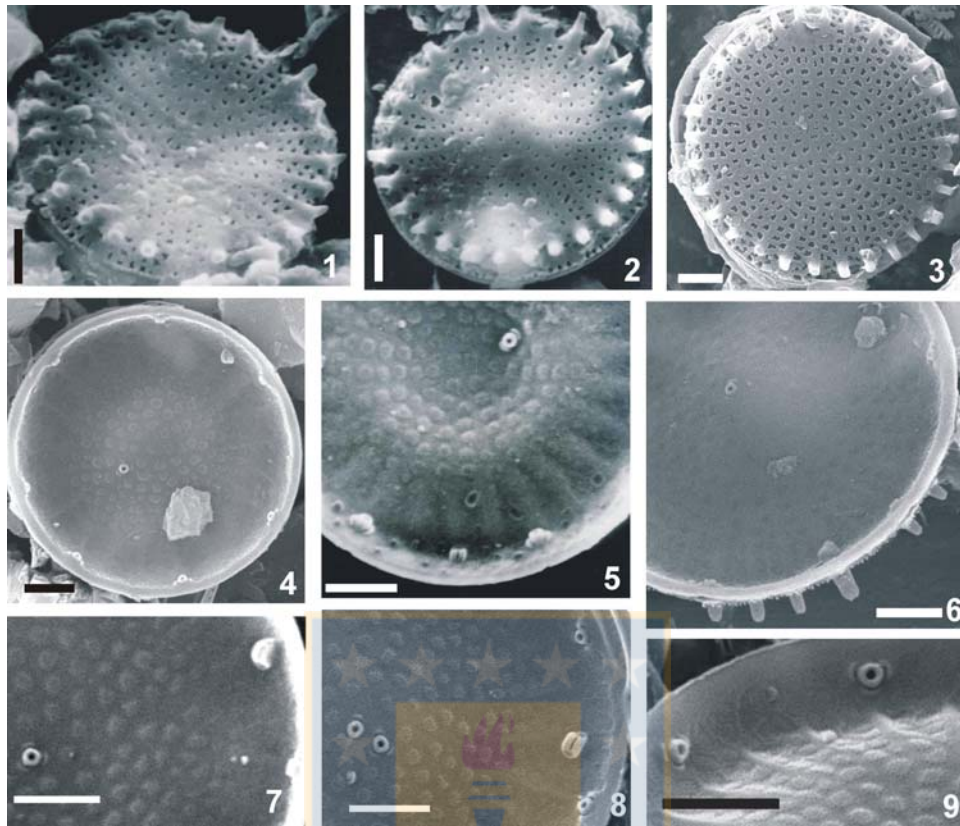


6.4. Results

Only isolated valves were studied. The valves are circular, between 5.5 and 8.2 μm in diameter. The valve face surface is flat (Fig. 3), concave (Figs 1, 4) or convex (Figs 2, 5). Areolae (4-5 in 1 μm) are arranged in uniseriate rows except towards the valve face/mantle junction, where they become bi- or triseriate (Figs 1-3). For some valves, the fascicles are separated by externally raised interfascicles (Fig. 1), and always have a spine (of variable length and thickness) at the end of each interfascicle (Figs 1-3). There is usually only one valve face fulportula (with two satellite pores) located in a subcentral isotopic position (Figs 4-6), and valve face/mantle fulportulae occurring on every 3-5 interfascicles (Figs 4, 6), normally with two satellite pores (Figs 5, 8). There is a single marginal sessile rimoportula with an elongated external tube (Fig. 6); the internal labium lies in a quite oblique (Figs 7-8) or radial direction (Fig. 5).

6.5. Discussion

The characteristics of the Chilean specimens agree well with those described for Stephanodiscus parvus Stoermer & Håkansson. The number of valve face fulportulae and number of satellite pores in Chilean specimens were variable morphological features. Individuals with two valve face fulportulae -instead of one- (Fig. 8) and fulportulae with three satellite pores -instead of two-, were observed in valve face (Fig. 8) or marginal processes (Fig. 9). Valve surfaces (flat or curved) and the interfascicle elevations were also variable features. These observations agree well with those of Stoermer & Håkansson (1984), Kobayasi et al. (1985) and Anderson (1990), who found S. parvus to be a polymorphic taxon related to the chemical conditions of the waters bodies it inhabits.



Figs 1-9. *Stephanodiscus parvus*. SEM. Scale= 1 μm. Figs 1-3, external views. Figs 4-9, internal views. Fig. 1. Concave valve face with raised interfascicles. Fig. 2. Convex valve face; a spine is present at the end of each interfascicle. Fig. 3. Flat valve face; radially oriented areolae in fascicles. Fig. 4. Valve with one subcentral fultoportula and a ring of marginal processes. Fig. 5. Convex valve face; one subcentral fultoportula with two satellite pores, such as the marginal ones; radially oriented labium of rimoportula. Fig. 6. One subcentral fultoportula with two satellite pores; note the long external rimoportula tube. Fig. 7. One subcentral fultoportula with three satellite pores. Fig. 8. Marginal and one subcentral fultoportulae with two satellite pores, the other with three; oblique labium of rimoportula. Fig. 9. Marginal fultoportulae with three satellite pores.

The general appearance of S. parvus is very similar to that of S. hantzschii and S. minutulus. However, S. hantzschii valves lack valve face fulcra. On the other hand, and according to Håkansson (2002), the valve face fulcra observed on S. minutulus is heterotopic in position.

Although S. parvus has been reported in many North American and European freshwater lakes and reservoirs, in South America it has only been found previously in Argentina (Ferrario et al. 1989, Echenique & Guerrero 2003, Mayr et al. 2005). The distribution of this species has generally been related to meso- or eutrophic lakes. In Lake Laja, S. parvus valve concentrations increased in more recent layers (relative abundances between 0.1 and 4.8 %), which could indicate increased nutrient levels in the lake.

Other species identified in the Lake Laja samples were the diatoms Asterionella formosa Hassall, Aulacoseira granulata (Ehrenberg) Simonsen, A. distans (Ehrenberg) Simonsen, Cyclotella stelligera Cleve & Grunow, C. aff. glomerata Bachmann, Fragilaria construens (Ehrenberg) Grunow, F. pinnata Ehrenberg and Synedra rumpens Kützing. All these taxa have been previously reported from Chilean continental waters (Rivera 1983, Rivera et al. 1990).

Acknowledgements

The authors wish to thank Prof. Dr. E. F. Stoermer for his review of some photographs of the Chilean material and his helpful comments and suggestions. The financial support of the Project DIUC No 205310044-1.0 is also gratefully acknowledged.

6.6. References

- ANDERSON, N.J. (1990): The biostratigraphy and taxonomy of small Stephanodiscus and Cyclostephanos species (Bacillariophyceae) in a eutrophic lake and their ecological implications. - Brit. Phycol. J. **25**: 217-235.
- ANONYMOUS. (1975): Proposal for a standardization of diatom terminology and diagnosis. - Nova Hedwigia Beih.: 323-354.
- BATTARBEE, R. (1986): Diatom analysis. - In: B.E. Berglund (ed.): Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology: 527-569. John Wiley & Sons, Chichester.
- ECHENIQUE R. & J. M. GUERRERO. (2003): Las Algas del Sistema del Río Limay (Argentina). III Chrysophyta, Bacillariophyceae. 1: Centrales. - Bol. Soc. Arg. Bot. **38**: 149-163.
- FERRARIO, M., R. GODINA & M. DAMBORENEA. (1989): Sobre algunos taxa de Diatomeas Centrales continentales para Argentina. - Iheringia, Bot. **39**: 55-67.
- HÅKANSSON, H. (2002): A compilation and evaluation of species in the genera Stephanodiscus, Cyclostephanos and Cyclotella with a new genus in the family Stephanodiscaceae. - Diatom Res. **17**: 1-139.
- HÅKANSSON, H. & B. HICKEL. (1986): The morphology and taxonomy of the diatom Stephanodiscus neoastraea sp. nov. - Brit. Phycol. J. **21**: 39-43.
- HÅKANSSON, H. & A. EHRLICH. (1987): Stephanodiscus galileensis sp. nov. from Holocene Subsurface Sediments of Lake Kinnereth, Israel. - Diatom Res. **2**: 15-21.
- HÅKANSSON, H. & B. MEYER. (1994): A comparative study of species in the Stephanodiscus niagarae complex and a description of S. heterostylus sp. nov. - Diatom Res. **9**: 65-85.
- KOBAYASI, H., H. KOBAYASHI & M. IDEI. (1985): The fine structure and taxonomy of the small and tiny Stephanodiscus (Bacillariophyceae) species in Japan. 3. Co-occurrence of Stephanodiscus minutulus (Kütz.) Round and S. parvus Stoerm. et Håk. - Jap. J. Phycol. **33**: 293-300.
- KRASKE, G. (1939): Zur Kieselalgenflora Südchiles. - Arch. Hydrobiol. **35**: 350-468.
- MARDONES M. & J. VARGAS. (2005): Efectos hidrológicos de los usos eléctrico y agrícola en la cuenca del río Laja (Chile centro-sur). - Rev. Geogr. Norte Grande **33**: 89-102.
- MAYR, C., M. FEY, T. HABERZETTL, S. JANSSEN, A. LÜCKE, N. MAIDANA, C. OHLENDORF, F. SCHÄBITZ, G.H. SCHLESER, U. STRUCK, M. WILLE & B. ZOLITSCHKA. (2005): Palaeoenvironmental changes in southern Patagonia during the last

millennium recorded in lake sediments from Laguna Azul (Argentina). – *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **228**: 203-227.

QUIROZ R., P. POPP, R. URRUTIA, C. BAUER, A. ARANEDA, H. TREUTLER & R. BARRA. (2005): PAH fluxes in the Laja Lake of south central Chile Andes over the last 50 years: Evidence from a dated sediment core. – *Sci. Total Environ.* **349**: 150-160.

RIVERA P. (1983): A Guide for References and Distribution for the Class Bacillariophyceae in Chile between 18°28'S and 58°S. - *Biblioth. Diatomol.* **3**: 1-386.

RIVERA P., M. GEBAUER & H.L. BARRALES. (1990): A Guide for References and Distribution for the Class Bacillariophyceae in Chile between 18°28'S and 58°S. Part II. Data from 1982 to 1988. - *Gayana Bot.* **46**: 155-198.

RIVERA P., F. CRUCES & I. VILA. (2003): Primera cita de Stephanodiscus agassizensis Håkansson & Kling (Bacillariophyceae) en Chile. - *Gayana Bot.* **59**: 83-88.

RIVERA, P. & F. CRUCES. (2005): First record of Stephanodiscus kuetzingii Klee & Casper (Bacillariophyceae) from living material collected in Rapel Reservoir, Central Chile. - *Diatom Res.* **20**: 163-170.

ROSS, R., E.J. COX, N.I. KARAYEVA, D.G. MANN, T.B.B. PADDOCK, R. SIMONSEN & P.A. SIMS. (1979): An amended terminology for the siliceous components of the diatom cell. - *Nova Hedwigia Beih.* **64**: 513-533.

ROUND, F.E., R.M. CRAWFORD & D.G. MANN. (1990): *The Diatoms. Biology & Morphology of the Genera*: 747 pp. Cambridge University Press, Cambridge.

STOERMER, E.F. & H. HÅKANSSON, H. (1984): Stephanodiscus parvus: validation of an enigmatic and widely misconstrued taxon. - *Nova Hedwigia* **39**: 497-511.

THERIOT, E. & E.F. STOERMER. (1982): Observations of North American population of Stephanodiscus (Bacillariophyceae) species attributed to Friedrich Hustedt. - *Trans. Am. Microsc. Soc.* **101**: 368-374.

DISCUSIÓN GENERAL

El Lago Laja es un sistema lacustre que ha estado sometido a través del tiempo a diferentes fuentes de perturbación, entre las que se encuentran principalmente la actividad volcánica (presente a través de toda su historia), y la influencia antrópica (iniciada a partir de la segunda mitad del siglo XX).

El análisis de los registros sedimentarios diatomológicos y geoquímicos presentes en este lago evidenció claras variaciones durante el Holoceno tardío (~2000 años), que permiten establecer que este sistema ha experimentado importantes cambios ambientales que afectaron tanto al cuerpo de agua como a su cuenca durante este período de tiempo. La respuesta que mostraron los registros sedimentarios frente a las variaciones ambientales producidas, se evidencian de forma diferente dependiendo del período que se considere.

De acuerdo a lo anterior, la historia ambiental que abarca los últimos dos milenios de historia del Lago Laja, puede ser dividida básicamente en cuatro períodos, los cuales representarían las distintas condiciones limnológicas que presentó el lago durante este período. Los cambios determinados durante los dos períodos más antiguos (Zona 1 y 2), corresponderían a variaciones originadas fundamentalmente por los aportes externos que recibió el cuerpo de agua como consecuencia de la actividad volcánica ocurrida en la cuenca.

En este sentido, diversos autores han establecido los efectos de la llegada de material volcánico o tefras a los lagos (Lotter et al., 1995; Barker et al., 2000; Eastwood et al., 2002), concluyendo que este proceso natural es un importante modificador de las condiciones ambientales de los sistemas

lacustres y la biota que se desarrolla en ellos. En el Lago Laja, la principal consecuencia de los eventos eruptivos habría sido la llegada de grandes masas de material inorgánico, que provocaron una dilución de los registros geoquímicos analizados en la presente investigación.

Por su parte, los ensamblajes de diatomeas presentes en el lago durante dichos períodos, experimentaron una drástica disminución, que llevó a su total ausencia en algunos de los estratos sedimentarios. Lo anterior, habría sido el resultado de la llegada y depositación del material que llegó al lago en un período de tiempo muy corto, alterando principalmente las condiciones físico-químicas y la turbidez de la columna de agua. No obstante, cabe destacar que una vez que este material sedimentó completamente, la comunidad de diatomeas vuelve a aumentar su concentración y se reestablece la composición de especies que había en el período previo a la perturbación volcánica, lo que concuerda con lo establecido por Telford et al. (2004) y Barker et al. (2000) en sistemas de México y Tanzania, respectivamente.

Contrariamente a lo establecido para los períodos más antiguos, en épocas más recientes (Zonas 3 y 4) los cambios establecidos en el sistema se relacionan más directamente con los procesos internos del cuerpo de agua y sus condiciones hidrológicas. Las variaciones que presentaron principalmente los ensamblajes diatomológicos y algunos de los parámetros químicos (materia orgánica, fósforo, sílice biogénica), evidencian un aumento de la productividad del Lago Laja, especialmente en el período más actual (Zona 4). Al mismo tiempo, los cambios que mostraron los ensamblajes de diatomeas durante este período, están dando cuenta que las fluctuaciones en el nivel del agua a las cuales ha estado sometido el lago modificaron la composición de sus ensamblajes.

En este sentido, aún cuando en ciertas ocasiones los cambios inferidos en las condiciones de los lagos y su biota no pueden ser relacionados directamente a las actividades humanas, las modificaciones determinadas en el Lago Laja durante las últimas décadas están reflejando las consecuencias que la intervención antrópica han tenido sobre este ecosistema. Esto ya ha sido demostrado para diversos cuerpos de agua, donde el hombre ha actuado como un factor alterador de sus condiciones ambientales, a través de intervención directa sobre el cuerpo de agua o indirecta, con modificaciones en sus cuencas que finalmente repercuten en la calidad del agua del lago (Legesse et al., 2002; García-Rodríguez et al., 2002; Bradbury et al., 2004).

Por otra parte, desde un punto de vista taxonómico, el trabajo de identificación de las diatomeas (Bacillariophyceae) presentes en el Lago Laja, dan cuenta de una falta de conocimiento taxonómico respecto a este grupo algal en Chile, que se evidenció por la presencia de especies que habían sido mal identificadas en trabajos realizados previamente, en tanto que otras no presentaban registro de su presencia en Chile. Esto último se agudiza por el hecho de trabajar con muestras sedimentarias que representan períodos de tiempo muy antiguos, donde se incrementa la probabilidad de encontrar especies fósiles.

Finalmente, a pesar de las limitaciones que se pueden considerar en el uso de los registros sedimentarios como evidencia para inferir las condiciones ambientales pasadas, esta herramienta ha demostrado ser una valiosa fuente de información en el Lago Laja. De esta forma, el enfoque multi-proxy utilizado en la presente investigación complementa los registros históricos disponibles para el lago durante las últimas décadas, y da señales sobre las condiciones pasadas a escala de siglos y milenios.

CONCLUSIONES

El Lago Laja ha presentado importantes variaciones ambientales durante el período holocénico tardío (~últimos 2000 años), las que se reflejaron tanto en los ensambles diatomológicos como en los registros geoquímicos sedimentarios que representan dicho período.

Durante el período más antiguo es posible indicar que las principales variaciones que se observaron en los registros sedimentarios son consecuencia de la llegada de material alóctono al lago. Este material habría sido originado por la actividad volcánica ocurrida en la cuenca del Lago Laja durante el período de tiempo analizado.

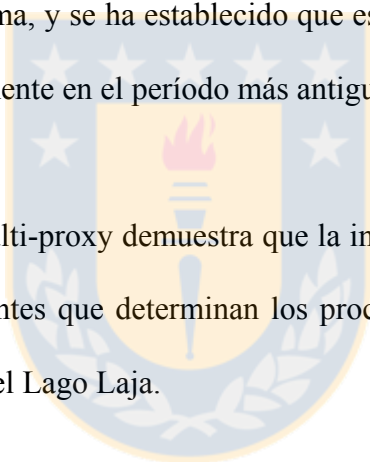
En la época más reciente de la historia de este sistema (último siglo), los cambios registrados en los ensambles diatomológicos y en algunos de los parámetros químicos permiten establecer que la influencia antrópica ha sido el principal factor responsable de los cambios establecidos. Estos dan cuenta fundamentalmente, de importantes fluctuaciones en el nivel del agua del lago como consecuencia de la regulación hidrológica a la cual ha estado sometido durante este período.

En relación a la productividad de diatomeas en el Lago Laja, es posible indicar que la concentración de diatomeas presentó una tendencia al aumento hacia la actualidad, registrando importantes variaciones en aquellos estratos sedimentarios con presencia de material volcánico, por lo tanto, de acuerdo a estos resultados se acepta la hipótesis 1 (H1) planteada en la presente investigación.

También es aceptada la hipótesis 2 (H2), debido a que los resultados indican que durante el período en el cual se ha llevado a cabo la mayor intervención antrópica sobre el sistema (últimas cinco décadas), éste ha experimentado importantes cambios en la composición de los ensamblajes diatomológicos, que reflejan la drástica disminución en el nivel del agua que se ha registrado en el lago.

Por otra parte, de acuerdo a los resultados obtenidos se rechaza la última hipótesis (H3), puesto que no fue posible establecer variaciones climáticas en el área de estudio. Esto se debe fundamentalmente a que la influencia volcánica durante el período de estudio es una importante fuente de perturbación en el sistema, y se ha establecido que es la principal causa de los cambios limnológicos ocurridos, especialmente en el período más antiguo (Zonas 1, 2 y 3).

Finalmente, esta investigación multi-proxy demuestra que la influencia volcánica y antrópica son dos de los factores más importantes que determinan los procesos biológicos y físico-químicos durante los últimos 2000 años en el Lago Laja.



Bibliografía general

- Barker P., R. Telford, O. Merdaci, D. Williamson, M. Taieb, A. Vincens & E. Gibert. 2000. The sensitivity of a Tanzanian crater lake to catastrophic tephra input and four millennia of climate change. - *The Holocene* 10: 303-310.
- Battarbee R. & M. Kneen. 1982. The use of electronically counted microspheres in absolute diatom analysis. *Limnology and Oceanography* 27: 184-188.
- Battarbee R. 1986. Diatom analysis. In: *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*, Berglund BE. (ed). John Wiley and Sons, Chichester. pp. 527-570.
- Battarbee R., D. Charles, S. Dixit & I. Renberg. 1999. Diatoms as indicators of surface water acidity. In: Stoermer, E. F. and Smol, J. P. (eds.). *The Diatoms: Applications to the Environmental and Earth Sciences*. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 85-127.
- Benn D.I. & C.M. Clapperton. 2000. Glacial sediment-landform associations and paleoclimate du-ring the last glaciation, strait of Magellan, Chile. *Quaternary Research* 54: 13-23.
- Bennett K.D., S.G. Haberle & S.H. Lumley. 2000. The last glacial-holocene transition in southern Chile. *Science* 290: 325-328.
- Bradbury J., S. Colman & R. Reynolds. 2004. The history of recent limnological changes and human impact on Upper Klamath Lake, Oregon. *Journal Paleolimnology* 31: 151-165.
- Bradbury P. & P. Van Metre. 1997. A land-use and water-quality history of White Rock Lake reservoir, Dallas, Texas, based on paleolimnological analyses. *Journal Paleolimnology* 17: 227–237.
- Bujalesky G., C. Heusser, A. Coronato, C. Roig & J. Rabassa. 1997. Pleistocene glaciolacustrine sedimentation at Lago Fagnano, Andes of Tierra del Fuego, southernmost South America. *Quaternary Science Reviews* 16: 767-778.
- Charles D. & J. Smol. 1994. Long-term chemical changes in lakes: quantitative inferences from biotic remains in the sediment record. In: L Baker (ed). *Environmental chemistry of lakes and reservoirs*. 3-31. Washington, American Chemical Society.
- Charles, D., Smol & J., Engstrom, D.1994. Paleolimnological approaches to biomonitoring. *Biological monitoring of aquatic systems*. Loeb, S. and A. Spacie (eds). Ann Arbor, Kansas, Lewis press: 233-293.
- Cruces F., R. Urrutia, A. Araneda, L. Torres, M. Cisternas & W. Vyverman. 2001. Evolución trófica de Laguna Grande de San Pedro (VIII Región, Chile) durante el último siglo, mediante el análisis de registros sedimentarios. *Revista Chilena de Historia Natural* 74: 407-418.

- Cruces F., R. Urrutia, O. Parra, A. Araneda, H. Treutler, S. Bertrand, N. Fagel, L. Torres, R. Barra & L. Chirinos. 2006. Changes in diatom assemblages in an Andean lake in response to a recent volcanic event. *Archiv für Hydrobiologie* 165: 23-35.
- Davis R., D. Anderson, S. Dixit, P. Appleby & M. Schauffler. 2006. Responses of two New Hampshire (USA) lakes to human impacts in recent centuries. *Journal Paleolimnology* 35: 669-697.
- Dirección General de Aguas (D.G.A). 1989. Medición de rutas de nieve. Ministerio de Obras Públicas, Depto. de Hidrología. Datos de Archivo.
- Dixit S., A. Dixit & J. Smol. 2002. Diatom and chrysophyte transfer functions and inferences of post-industrial acidification and recent recovery trends in Killarney lakes (Ontario, Canada). *Journal Paleolimnology* 27: 79–96.
- Douglas M. & J. Smol. 1999. Freshwater diatoms as indicators of environmental change in the High Arctic. In: E.F. Stoermer and J.P. Smol (eds). *The Diatoms: Applications to the Environmental and Earth Sciences*. Cambridge University Press. 227-244.
- Eastwood W., J. Tibby, N. Roberts, H. Birks & H. Lamb. 2002. The environmental impact of the Minoan eruption of Santorini (Thera): statistical analysis of palaeoecological data from Gölhisar, southwest Turkey. *The Holocene* 12: 431-444.
- Finsinger W., C. Bigler, U. Krähenbühl, A. Lotter & B. Ammann. 2006. Human impacts and eutrophication patterns during the past ~200 years at Lago Grande di Avigliana (N. Italy). *Journal Paleolimnology* 36: 55-67.
- Fritz S, B. Cumming, F. Gasse & K. Laird. 1999. Diatoms as indicators of hydrologic and climatic change in saline lakes. In: Stoermer E.F and Smol J.P (eds). *The Diatoms: Applications to the Environmental and Earth Sciences*. Cambridge University Press. 41-72.
- Gaiser E., M. Brooks, W. Kenney, C. Schelske & B. Taylor. 2004. Interpreting the hydrological history of a temporary pond from chemical and microscopic characterization of siliceous microfossils. *Journal Paleolimnology* 31: 63-76.
- Gell P. 1997. The development of a diatom database for inferring lake salinity, Western Victoria, Australia; Towards a quantitative approach for reconstructing past climate. *Australian Journal of Botany* 45: 389-423.
- González M. & N. Maidana. 1998. PostWisconsinian paleoenvironments at Salinas del Bebedero basin, San Luis, Argentina. *Journal Paleolimnology* 20: 353–368.

- Gracia-Rodríguez F., N. Mazzeo, P. Sprechmann, D. Metzeltin, F. Sosa. H. Treutler, M. Renom, B. Scharf & C. Gaucher. 2002. Paleolimnological assessment of human impacts in Lake Blanca, SE Uruguay. *Journal Paleolimnology* 28: 457-468.
- Grimm E.C. 1987. Coniss: A Fortran 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers and Geosciences* 13: 13-35.
- Grimm E.C. 1991. Tilia and Tilia Graph. Springfield: Illinois State Museum.
- Hall R. & J. Smol. 1999. Diatoms as indicators of lake eutrofication. In: Stoermer E.F, Smol J.P (eds). *The Diatoms: Applications to the Environmental and Earth Sciences*. Cambridge University Press. 128-168.
- Jenny B., B. Valero-Garcés, R. Urrutia, K. Kelts, H. Veit. P. Appleby & M. Geyh. 2002. Moisture changes and fluctuations of the westerlies in Central Chile during the last 2000 years. *Quaternary International* 87: 3-18.
- Jenny B., B.L. Valero-Garcés, R. Villa-Martínez, R. Urrutia. M. Geyh & H. Veit. 2002. Early to Mid-Holocene Aridity in Central Chile and the Southern Westerlies: The Laguna Aculeo Record (34°S). *Quaternary Research* 58: 160–170.
- Jenny B., D. Wilhelm & B.L. Valero-Garcés. 2003. The Southern Westerlies in Central Chile: Holocene precipitation estimates based on a water balance model for Laguna Aculeo (33°50'S). *Climate Dynamics* 20: 269–280.
- Karst-Riddoch T., M. Pisaric & J. Smol. 2005. Diatom responses to 20th century climate-related environmental changes to high-elevation mountain lakes of the northern Canadian Cordillera. *Journal Paleolimnology* 33: 265-282.
- Lamb H., N. Roberts, M. Leng, P. Barker, A. Benkaddour & S. Van der Kaars. 1999. Lake evolution in a semi-arid montane environment: responses to catchment change and hydroclimatic variation. *Journal Paleolimnology* 21: 325-343.
- Latorre C., J. Betancourt & M.T.K. Arroyo. 2006. Late Quaternary vegetation and climate history of a perennial river canyon in the Río Salado basin (22°S) of Northern Chile. *Quaternary Research* 65: 450–466.
- Legesse D., F. Gasse, O. Radakovitch, C. Vallet-Coulomb, R. Bonnefille, D. Verschuren, E. Gibert & P. Barker. 2002. Environmental changes in a tropical lake (Lake Abiyata, Ethiopia) during recent centuries. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 187: 233-258.
- Leira M. 2005. Diatom responses to Holocene environmental changes in a small lake in northwest Spain. *Quaternary International* 140-141: 90-102.

- Lohmar S. 2000. Estratigrafía, petrografía y geoquímica del Volcán Antuco y sus depósitos (Andes del Sur 37°25'S). Universidad de Concepción.
- Lotter A. 2001. The paleolimnology of Soppensee (Central Switzerland), as evidenced by diatom, pollen, and fossil pigment analyses. *Journal Paleolimnology* 25: 65-79.
- Lotter A., H. Birks & B. Zolitschka. 1995. Late-glacial pollen and diatom changes in response to two different environmental perturbations: volcanic eruption and Younger Dryas cooling. *Journal Paleolimnology* 14: 23-47.
- Lotter A., R. Pienitz & R. Schmidt. 1999. Diatoms as indicators in extreme environments. In: E.F.Stoermer and J.P Smol (eds). *The Diatoms: Applications to the Environmental and Earth Sciences*. Cambridge University Press. 205-226.
- Maldonado A. & C. Villagrán. 2002. Paleoenvironmental changes in the semiarid Coast of Chile (~32°S) during the last 6200 cal year inferred from a swamp-forest pollen record. *Quaternary Research* 58: 130-138.
- Maldonado A. & C. Villagrán. 2006. Climate variability over the last 9900 cal yr BP from a swamp forest pollen record along the semiarid coast of Chile. *Quaternary Research* (In press).
- Maldonado A., J. Betancourt, C. Latorre & C. Villagrán. 2005. Pollen analyses from a 50 000-yr rodent midden series in the southern Atacama Desert (25° 30' S). *Journal of Quaternary Science* 20: 493–507.
- Mardones M. & J. Vargas. 2005. Efectos hidrológicos de los usos eléctrico y agrícola en la cuenca del río Laja (Chile centro-sur). *Revista de Geografía Norte Grande* 33: 89-102.
- Mardones M. 2002. Evolución morfogenética de la hoya del río Laja y su incidencia en la geomorfología de la Región del Biobío, Chile. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis* 47: 97-127.
- Markgraf V., J.P. Bradbury, A. Schwalb, S.J. Burns, C. Stern, D. Ariztegui, A. Gilli, F.S. Anselmetti, S. Stine & N. Maidana. 2003. Holocene palaeoclimates of southern Patagonia: limnological and environmental history of Lago Cardiel, Argentina. *The Holocene* 13: 597–607.
- Mayr C., M. Fey, T. Haberzettl, S. Janssen, A. Lücke, N. Maidana, C. Ohlendorf, F. Schäbitz, McFadden M., W. Patterson, H. Mullins & W. Anderson. 2005. Multi-proxy approach to long – and short-term Holocene climate-change: evidence from eastern Lake Ontario. *Journal Paleolimnology* 33: 371-391.
- McKnight D., D. Brakke & P. Mulholland. 1996. Freshwater ecosystems and climate change in North America. *Limnology and Oceanography* 41: 815-1149.

- Michelutti N., M. Hay, P. Marsh, L. Lesack & J. Smol. 2001. Diatom changes in lake sediments from the Mackenzie Delta, N.W.T., Canada: Paleohydrological Applications. 2001. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 33: 1-12.
- Michelutti N., M. Douglas & J. Smol. 2002. Tracking recent recovery from eutrophication in a high arctic lake (Meretta Lake, Cornwallis Island, Nunavut, Canada) using fossil diatom assemblages. *Journal Paleolimnology* 28: 377–381.
- Moreno P. 2004. Millennial-scale climate variability in northwest Patagonia over the last 15 000 yr. *Journal of Quaternary Science* 19: 35–47.
- Moreno P. 1997. Vegetation and climate near lago Llanquihue in the Chilean lake district between 20200 y 9500 14C yr BP. *Journal of Quaternary Science* 12: 485-500.
- Moreno, P., G.L. Jacobson, T.V. Lowell & G.H. Denton. 2001. Interhemispheric climate links revealed by a late-glacial cooling episode in southern Chile. *Nature* 409: 804-808.
- Moser K., J. Smol, G. MacDonald & C. Larsen. 2002. 19th century eutrophication of a remote boreal lake: a consequence of climate warming?. *Journal Paleolimnology* 28: 269–281.
- Moser K., A. Korhola, J. Weckstrom, T. Blom, R. Pienitz, J. Smol, M. Douglas & M. Hay. 2000. Paleohydrology inferred from diatoms in northern latitude regions. *Journal Paleolimnology* 24: 93-107.
- Niemeyer H. & J. Muñoz. 1983. Geología de la Hoja Laguna de la Laja. Servicio Nacional de Minería, N° 57: 52 pp.
- Parra O. 1996. "El río Biobío: "Elemento base del desarrollo de la Región". Cuadernos del Biobío, Ediciones Universidad de Concepción
- Parra O., S. Basualto, R. Urrutia & C. Valdovinos. 1999. Estudio comparativo de la diversidad fitoplanctónica de cinco lagos de diferentes niveles tróficos. *Gayana* 56: 25-40.
- Parra O., C. Valdovinos, R. Urrutia, M. Cisternas, E. Habit y M. Mardones. 2003. Caracterización y tendencias tróficas de cinco lagos costeros de Chile Central. *Limnética* 22: 51-83.
- Prather C. & M. Hickman. 2000. History of a presently slightly acidic lake in northeastern Alberta, Canada as determined through analysis of the diatom record. *Journal Paleolimnology* 24: 183–198.
- Rigsby C., J. Bradbury, P. Baker, S. Rollins & M. Warren. 2005. Late Quaternary palaeolakes, rivers, and wetlands on the Bolivian Altiplano and their palaeoclimatic implications. *Journal of Quaternary Science* 20: 671–691.

- Rodríguez J. 1999. *Ecología*. Ediciones Pirámide, Barcelona, España. 411 pp.
- Smith R. 2002. Diatom-based Holocene paleoenvironmental records from continental sites on northeastern Ellesmere, high Arctic, Canada. *Journal Paleolimnology* 27: 9-28.
- Smol J. & B. Cumming. 2000. Tracking long-term changes in climate using algal indicators in lake sediments. *Journal Phycology* 36: 986-1011.
- Smol J., I. Walker & P. Leavitt. 1991. Paleolimnology and hindcasting climatic trends. *Verh. Int. Theor. Ang. Limnol.* 24: 1240-1246.
- Solovieva N., V. Jones, L. Nazarova, S. Brooks, H. Birks, J. Grytnes, P. Appleby, T. Kauppila, B. Kondratenok, I. Renberg & V. Ponomarev. 2005. Paleolimnological evidence for recent climatic change in lakes from the northern Urals, arctic Russia. *Journal Paleolimnology* 33 : 463-482.
- Sorvary S. & A. Korhola. 1998. Recent diatom assemblage changes in subarctic Lake Saanajärvi, NW Finnish Lapland, and their paleoenvironmental implications. *Journal Paleolimnology* 20: 205–215.
- Stoermer E. & J. Smol. 1999. *The diatoms: Applications for the environmental and earth sciences*. Cambridge University Press. 469 pp.
- Sylvestre F. 2002. A high-resolution diatom reconstruction between 21,000 and 17,000 14C yr BP from the southern Bolivian Altiplano (18–23°S). *Journal Paleolimnology* 27: 45–57.
- Sylvestre F., S. Servant-Vildary & M. Roux. 2001. Diatom-based ionic concentration and salinity models from the south Bolivian Altiplano (15–23°S). *Journal Paleolimnology* 25: 279–295.
- Telford R., P. Barker, S. Metcalfe & A. Newton. 2004. Lacustrine responses to tephra deposition: examples from Mexico. *Quaternary Science Review* 23: 2337–2353.
- Ter Braak C. 2002. Program CANOCO Version 4.5. Wageningen University and Research Centre, The Netherlands.
- Thiele R., H. Moreno, S. Elgueta, A. Lahsen, S. Rebolledo & M. Petit-Breuilh. 1998. Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja. *Revista Geológica de Chile* 25: 229-253
- Urrutia R., K. Sabbe, F. Cruces, K. Pozo, J. Becerra, A. Araneda, W. Vyverman & O. Parra. 2000. Paleolimnological studies of Laguna Chica of San Pedro (VIII Region): Diatoms, hydrocarbons and fatty acid records. *Revista Chilena de Historia Natural* 73: 717-728.
- Valero-Garcés B., M. Grosjean, A. Schwalb, K. Kelts, H. Schreier & B. Messerli. 1996. Limnogeología de laguna Chungará y cambio climático durante el holoceno superior en el

altiplano chileno septentrional. IV Reunión de Geomorfología, Sociedad Española de Geomorfología, España.

Valero-Garcés B.L., B. Jenny, M. Rondanelli, A. Delgado-Huertas, S. Burns, H. Veit & A. Moreno. 2005. Palaeohydrology of Laguna Tagua Tagua (34° 30' S) and moisture fluctuations in Central Chile for the last 46 000 yr. *Journal of Quaternary Science* 20: 625–641.

Villa-Martínez R., C. Villagrán & B. Jenny. 2004. Pollen evidence for late-Holocene climatic variability at Laguna de Aculeo, Central Chile (lat. 34 S). *The Holocene* 14: 361–367.

Wetzel R. 1981. *Limnología*. Ediciones Omega S.A. Barcelona- España. 679 pp.

Wilson E., J. Smol & J. Sauchyn. 1997. A Holocene paleosalinity diatom record from southwestern Saskatchewan, Canada. *Journal Paleolimnology* 17: 23-31.

Zeeb B., C. Christie, J. Smol, D. Findlay, H. Kling & H. Birks. 1994. Responses of diatom and chrysophyte assemblages in Lake 227 sediments to experimental eutrophication. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 51: 2300-2311.

