Universidad Austral de Chile
Facultad de Ciencias

PROFESOR PATROCINANTE
DR. JORGE JARAMILLO
INSTITUTO DE BOTANICA
FACULTAD DE CIENCIAS

PROFESOR CO-PATROCINANTE
DR. GINO CASASSA
GLACIOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO
CENTRO ESTUDIO CIENTÍFICOS

ANÁLISIS BIOLÓGICO EN TESTIGOS DE NEVIZA/HIELO EN LOS GLACIARES DEL VOLCÁN MOCHO-CHOSHUENCO Y DEL VOLCÁN OSORNO (X REGIÓN DE LOS LAGOS, CHILE)

Tesis de Grado presentada como parte de los requisitos para optar al **título de Biólogo Marino.**

PAMELA ALEJANDRA SANTIBÁÑEZ ÁVILA
Valdivia – Chile
2007

PROFESOR PATROCINANTE
DR. JORGE JARAMILLO M.
INSTITUTO DE BOTÁNICA
FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE

PROFESOR CO-PATROCINANTE
DR. GINO CASASSA R.
GLACIOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO
CENTRO ESTUDIO CIENTÍFICOS

PROFESOR INFORMANTE
RODRIGO SCHEIHING A.
BIOFÍSICA Y FISIOLOGÍA MOLECULAR
CENTRO ESTUDIO CIENTÍFICOS

PROFESOR COLABORADOR
SHIRO KOHSHIMA
EVOLUTION AND COMPARATIVE BIOLOGY
FACULTY OF BIOSCIENCE AND BIOTECHNOLOGY
TOKYO INSTITUTE OF TECNOLOGY

"Como pájaros que se posan esparce la nieve,
que baja como langosta que salta al suelo.
Admira el ojo la belleza de su blancura,
y al verla caer se pasma el corazón.
Él derrama también sobre la tierra la escarcha como sal,
que al helarse se queda como pinchos de espinas.
El viento frío del norte sopla
y se forma el hielo sobre el agua;
sobre toda masa de agua se posa,
y el agua se reviste de coraza".

Eclo 43,18-20.

A MIS PAPÁS.....

A MIS HERMANOS Y MELI……..

A DIEGO Y ALEX.....

Por su inmenso amor.....

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Dr. Gino C, Dr. Jorge J. y Dr. Shiro K, por la gran oportunidad y confianza depositada en mí. Por reafirmarme lo importante de la pasión por el trabajo y la humildad con que lo hacen.

A Rodrigo S. por el gran apoyo, la ayuda y la amistad entregada.

Al Dr. Pedro Labarca y a los integrantes de su laboratorio, por el apoyo y gran ayuda que me han proporcionado. A Marcos R. por la obtención de las muestras, por que trabaja con pasión.

A la escuela de Biología Marina, que me han apoyado en todas mis decisiones, en especial a la Tía Rosita. Al instituto de Zoología, por el apoyo y cariño entregado.

A los grandes profesores que merecen ser llamados profesores por su pasión y entrega, y los no tanto, que me enseñaron que es posible ser autodidacta.

A mi mamá por su fuerza, a mi papá por su sabiduría, a ambos por su inmenso apoyo, por enseñarme a deleitarme con la naturaleza y su creador. Por entender que aunque los barcos permanecen seguros en el puerto no fueron hechos para eso.

A mis hermanos por tenerme mucha paciencia, por la alegría, por los viajes, el apoyo, por existir, por enseñarme lo necesarios que son para la vida.

Al Alex por el apoyo incondicional, por tu infinito amor, por compartirme con mis pasiones. Por enseñarme que el amor todo lo puede. Y a su familia, por el apoyo.

A la Meli por todos los cuidados, por el apoyo, por el cariño. Por demostrarme que la familia no es solo un lazo sanguíneo.

A mi hijo por mostrarme la máxima expresión del amor de Dios, solo por existir.

A mis amigos de la vida por estar ahí siempre, por seguirme en mis ideas, por lanzarse hacia el vacío, por la confianza.

A los amigos que encontré en este camino, mis colegas, Carola y Julio, gracias por acompañarme.

A mis compañeros y colegas de los grupos Ostrako y ACHA (Asociación Científico Humanista Ancud), *conocer para conservar*.

Y a todos los que me han brindado la mano, y han cooperado con sus sonrisas….

Este estudio fue apoyado por FONDECYT 1040989. CECS cuenta con financiamiento de la Iniciativa Científica Milenio, Empresas CMPC, Fundación Andes y Tinker Foundation.

INDICE GENERAL **PÁGINA**

RESUMEN……..……..1

ABSTRACT…….……2

CAPITULO 1: **INTRODUCCIÓN**…….……....3

1.1. MARCO TEÓRICO…….…….3

1.2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA…….……...6

1.3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS DE TRABAJO…….……....11

CAPITULO 2: **MATERIALES Y METODO**…….……12

2.1. SITIO DE ESTUDIO……..…….12

2.2. OBTENCIÓN DE TESTIGOS……..…..14

2.3. PROCESO DE OBTENCIÓN DE MUESTRAS…….…….…..14

2.4. TECNICA DE ANÁLISIS DE MUESTRAS…….....15

2.4.1. Fijación y Montaje de Muestras…….…….…….15

2.4.2. Proceso de Cuantificación y Observación……...…….16

2.4.3. Estimación de Biovolumen Microalgal……..…….…….16

2.4.4. Estimación de la Concentración de Granos de Polen...……..…...…17

2.4.5. Evaluación de Contaminación……..……..…..17

2.4.6. Propiedades Físicas……...…18

2.4.7. Medición de Isótopo y Especies Químicas……..…….18

2.5. INTERPRETACIÓN Y ESTIMACIÓN DE BALANCE DE MASA

DE LOS TESTIGOS…….……..……19

CAPITULO 3: **RESULTADOS**……..…….…….20

3.1. TESTIGO DE NEVIZA/HIELO SOBRE EL GLACIAR DE LA CUMBRE DEL VOLCÁN OSORNO……..……..……20
3.1.1. Análisis Biológico…….……...20
3.1.1.1. Microalgas…….……20
3.1.1.2. Granos de polen…….……25
3.1.1.3. Protozoo Tecameba……...…….26
3.1.1.3.1. *Identificación taxonómica*……..…..……26
3.1.1.3.2. *Descripción del genero Trinema spp*……..……26
3.1.1.3.3. *Cuantificación Trinema spp*……..…..…….26
3.1.2. Análisis Físico…….…….……28
3.1.2.1. Propiedades físicas…….……..……..28
3.1.3. Análisis de Isótopo y Especies Químicas…….……..……..29
3.1.3.1. Perfiles de profundidad del isótopo y de las especies químicas…….……...…29
3.1.3.1.1. *Isótopo δD*…….……..……29
3.1.3.1.2. *Especies químicas*……...……29
3.1.3.2. Correlación de especies químicas……..…..…..31
3.2. TESTIGO DE NEVIZA/HIELO SOBRE EL GLACIAR DE LA CUMBRE DEL VOLCÁN MOCHO-CHOSHUENCO……..…….……..33
3.2.1. Análisis Biológico…….……...33
3.2.1.1. Microalgas…….……33
3.2.1.2. Granos de polen…….……33
3.2.1.3. Protozoo Tecameba……..…….38
3.2.2. Análisis Físico…….…….……38

3.2.2.1. Propiedades físicas……..…….……..38

3.2.3. Análisis de Isótopo y Especies Químicas…….…….……..39

3.2.3.1. Perfiles de profundidad del isótopo y de las especies químicas…….…...……39

3.2.3.1.1. *Isótopo δD*…….……...……39

3.2.3.1.2. *Especies químicas*……..…….……40

3.2.3.2. Correlación de especies químicas……..……..…..41

3.3. TESTIGO DE NEVIZA/HIELO SOBRE ESTACION 18 DEL GLACIAR SURESTE DEL VOLCÁN MOCHO-CHOSHUENCO…….……...…..…..44

3.3.1. Análisis Biológico…….……...44

3.3.1.1. Microalgas…….……44

3.3.1.2. Granos de polen…….……48

3.3.1.3. Protozoo Tecameba……...……48

3.3.1.4. Otros microorganismos…….……48

3.3.2. Análisis Físico…….…….……49

3.3.2.1. Propiedades físicas…….……...……..49

3.3.3. Análisis de Isótopo y Especies Químicas……...……..50

3.3.3.1. Perfiles de profundidad del isótopo δD...…….……50

CAPITULO 4: **DISCUSIÓN**.....52

4.1. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA PARA LA INTERPRETACIÓN DE TESTIGOS……...…52

4.1.1. Resolución Estacional a través de la Interpretación Biológica……..…..….52

4.1.2. Interpretación Propiedades Físicas…….……..……56

4.1.3. Interpretación Isótopo y Especies Químicas…….....…...…….56

4.1.3.1. Variación estacional δD……..…….……..56

4.1.3.2. Variación estacional especies químicas……..…….…..57

4.2. INTERPRETACION DEL TESTIGO DE NEVIZA/HIELO SOBRE EL GLACIAR DE LA CUMBRE DEL VOLCÁN OSORNO…….……..….61

4.2.1. Resolución Estacional y Datación a través del Análisis Biológico……..……....61

4.2.1.1. Estimación balance de masa basado en interpretación biológica…….…….62

4.2.2. Propiedades Físicas del Testigo……..……..…63

4.2.3. Interpretación Isotópica y Especies Químicas……...……..…….64

4.2.3.1. Variación estacional δD……..……...64

4.2.3.2. Especies químicas……..64

4.2.3.2.1. *Principales fuentes de origen de las especies químicas*…….……64

4.2.3.2.2. *Variación estacional de las especies químicas*…….……..……67

4.2.4. Estimación del Balance de Masa……..……71

4.3. INTERPRETACIÓN DEL TESTIGO DE NEVIZA/HIELO SOBRE EL GLACIAR DE LA CUMBRE DEL VOLCÁN MOCHO-CHOSHUENCO…….....….73

4.3.1. Resolución Estacional y Datación a través del Análisis Biológico……..……....73

4.3.1.1. Estimación balance de masa basado en interpretación biológica…….….75

4.3.2. Propiedades Físicas del Testigo……...…77

4.3.3. Interpretación Isotópica y Especies Químicas……...……..…….79

4.3.3.1. Variación estacional δD……..……...79

4.3.3.2. Especies químicas……..……..……..79

4.3.3.2.1. *Principales fuentes de origen de las especies químicas*…….……79

4.3.3.2.2. *Variación estacional de las especies químicas*…….……..……81

4.3.4. Estimación del Balance de Masa……..……85

4.4. INTERPRETACIÓN DEL TESTIGO DE NEVIZA/HIELO SOBRE ESTACION 18 DEL GLACIAR SURESTE DEL VOLCÁN MOCHO-CHOSHUENCO……..……...……..….88

4.4.1. Resolución Estacional y Datación a través del Análisis Biológico……..……....88

4.4.2. Propiedades Físicas del Testigo……..…..…90

4.4.3. Interpretación Isotópica. ……..……...…….…….90

4.4.3.1. Variación estacional δD……..……...90

4.4.4. Resolución Anual, Estacional y Estimación del Balance de Masa……..…….91

4.5. DIFERENCIA DE DISTRIBUCIÓN SEGÚN TAMAÑO CELULAR EN MICROALGAS……..……94

4.6. EVALUACIÓN DE TESTIGOS…….....…..……95

4.7. UTILIDAD DE MÉTODO *MULTIPROXY*…….…..97

CAPITULO 5: **CONCLUSIONES Y PROYECCIONES**.....99

LITERATURA CITADA……...……..……102

RESUMEN

Durante el último siglo se ha observado un aumento en la temperatura de la tierra de 0.7 ºC, cuya causa principal se estima que es de origen antropogénico debido a la emisión de gases invernadero. Caracterizar los cambios actuales y pasados del clima, tanto de origen natural como antropogénico, es de particular relevancia para entender el sistema climático y estimar los cambios futuros.

Los testigos de hielo obtenidos mediante perforaciones en los glaciares proveen uno de los registros más detallados del clima y de las condiciones medioambientales previas. Sin embargo, el análisis de estos testigos es complejo en glaciares temperados, debido a que las variaciones estacionales de los contenidos isotópicos del hielo y especies químicas sufren fuertes disturbios por la percolación del agua de fusión. En dichos glaciares temperados se ha detectado un variado ecosistema, compuesto de microalgas y otros microorganismos que habitan en la superficie de la nieve y el hielo. Estas microalgas, por su mayor tamaño con respecto a los isótopos y especies químicas, no se ven tan afectadas por la percolación de agua. El crecimiento de microalgas sobre la superficie del glaciar ocurre durante la estación de derretimiento (primavera–verano). Luego, al llegar el otoño la capa superficial se congela y se cubre con la acumulación de nieve invernal, período en el cual no ocurre crecimiento de microalgas.

El objetivo del presente estudio fue cuantificar el biovolumen algal, contenido de polen y otros microorganismos en tres testigos de neviza/hielo somero en la Región de los Lagos, Chile. Con este fin, se recolectó en noviembre de 2005 un testigo en la cumbre del glaciar del Volcán Osorno (2652 m s.n.m.) y dos testigos en el glaciar del Volcán Mocho-Choshuenco (a 2000 m de altitud y 2422 m de altitud).

Son cuantificadas en las muestras de los tres testigos algas verdes, cianobacterias, granos de polen del genero *Nothofagus*, granos de polen de la familia Podocarpaceae y protozoos Tecamebas del género *Trinema spp*. Estos últimos son por primera vez observados habitando sobre la superficie glaciar. En el testigo del Volcán Mocho-Choshuenco a los 2000 m s.n.m. se encontraron además Copépodos y nauplius.

Los resultados indican signos estacionales claros en biovolumen algal, abundancia de *Trinema spp* y concentración de granos de polen. Las variaciones estaciónales de δD y las especies químicas se pierden bajo los ~ 5 m debido probablemente a la percolación y/o procesos post-depositación, pero también son utilizadas como herramientas para la interpretación de los testigos, al igual que las propiedades físicas Estimamos que el testigo del Volcán Osorno de 10.4 m de profundidad contiene una capa anual (2004/2005) y una capa del último período de acumulación (otoño-invierno del 2005); el testigo del Volcán Mocho-Choshuenco perforado a los 2422 m s.n.m. de 10.2 m de profundidad contiene tres capas anuales (2002/2003 – 2003/2004 – 2004/2005), más una capa del último período de acumulación (otoño-invierno del 2005); y el testigo del Volcán Mocho-Choshuenco perforado a los 2000 m s.n.m. de 10.0 m de profundidad solo contiene una capa que corresponde al último período de acumulación (otoño-invierno 2005). Las estimaciones de balance de masa neto y de invierno en los testigos del Volcán Mocho-Choshuenco, son corroboradas con los valores obtenidos anteriormente a través de balizas en el período 2003/2004. Esto sugiere que el análisis biológico efectuado provee estimaciones confiables de las capas anuales y estacionales en los testigos de neviza/hielo de estos sitios. Esta es la primera experiencia de análisis de microorganismos en testigos de hielo en los glaciares de la Región de los Lagos, lo cual comprueba su valiosa utilidad y contribución como paleoindicador de condiciones ambientales y climáticas.

ABSTRACT

A global temperature rise of 0.7 °C has been observed during the last century on Earth, with anthropogenic forcing being the most probable cause due to the emission of greenhouse gases. Characterizing the present and past climate changes, both of natural and anthropogenic origin, is particularly relevant in order to understand the climate system and estimate future changes.

Ice cores drilled from glaciers provide one of the most detailed records about previous climate and environmental conditions. Nevertheless, the analysis of ice cores is complex in temperate glaciers, as seasonal variations of isotopic contents and chemical species undergo strong disturbance due to meltwater percolation. A rich ecosystem living on the surface of the snow and ice has been detected on temperate glaciers, composed by snow algae and other microorganisms, which, due to their larger size when compared to stable isotopes and chemical species of snow/ice, are less affected by water percolation. Snow algae growth is observed over the surface of the glacier during the melting season (spring – summer). In autumn-winter, the surface layer freezes and becomes covered by accumulation of snow, period during which algae growth does not occur.

The objective of the present study was to analyse snow algae biovolume, pollen content and other microorganisms in shallow firn/ice cores collected in the Lake District of Chile. For this purpose, a firn core was drilled on the glacier at the summit of Volcán Osorno (2652 m a.s.l.) and two cores on the glacier of Volcán Mocho-Choshuenco (2000 m a.s.l and 2400 m a.s.l). Ice cores were retrieved during November 2005.

Green algae, cianobacteria, pollen from genus *Nothofagus*, pollen from Podocarpaceae and protozoa Tecamebas from genus *Trinema spp* are quantified in the samples obtained from the three firn/ice. This is the first time that protozoa Tecamebas are observed living on the glacier surface. Copepods and nauplius were found in the firn/ice core from Volcán Mocho Choshuenco at 2000 m.a.s.l.

Results show clear seasonal signs of algal biovolume, abundance of *Trinema spp* and pollen concentration. δD seasonal variations and chemical species disappear under ~ 5 m, probably due to percolation and/or post-depositional processes. Nevertheless the isotopic and chemical information, as well as the physical properties, are used as tools for the core interpretation. We estimate that the 10.4 m deep core from Volcán Osorno presents an annual layer (2004 / 2005) and a layer from the last accumulation period (autumn – winter 2005); the 10.2 m deep core from Volcán Mocho Choshuenco, drilled at 2422 m a.s.l., presents three annual layers (2002/2003 – 2003/2004 – 2004/2005), plus a layer from the last accumulation period (autumn – winter 2005). The 10.0 m , deep core from Volcán Mocho Choshuenco, drilled at 2000 m a.s.l., only presents one layer corresponding to the last accumulation period (autumn – winter 2005). Winter and net mass balance estimations from Mocho-Choshuenco cores compare well with values previously obtained by means of the stake method in the period 2003/2004. This suggests that the biological analysis provides trustworthy estimations on annual and seasonal layers in firn/ice cores from these areas. This is the first experience regarding micro-organism analysis in firn/ice cores in glaciers of the Lake District of Chile, which demonstrates its value and contribution as paleoindicator of climatic and environmental conditions.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. MARCO TEÓRICO

El promedio de temperaturas de la superficie en todo el mundo ha aumentado en 0,74 ± 0,18°C en el período 1900-2006, (IPCC, 2007) lo cual se ha reflejado en la observación de distintos cambios a nivel mundial como el retroceso de glaciares (Oerlemans, 2005), y el ascenso del nivel del mar (Overpeck *et al*., 2006), entre otros. Hay consenso en el mundo científico que el calentamiento tiene una relevante influencia de origen antropogénico, debido a la mayor emisión de gases invernadero (principalmente dióxido de carbono - CO_2, metano - CH_4, óxido nitroso - N_2O) como consecuencia de la quema de combustibles fósiles (IPCC, 2007). Sin embargo, una parte probablemente menor de este proceso puede deberse a un calentamiento natural de la tierra, producido luego del periodo frío conocido como "la pequeña edad del hielo" o *Little Ice Age* que culminó en 1850 aproximadamente (Jones *et al*., 2001). Son muchos los factores que continúan limitando la capacidad de detectar, atribuir y comprender el cambio climático actual (IPCC, 2007). Por lo tanto el conocimiento de registros climáticos pasados de distintos sitios del mundo es de particular relevancia ya que la información de la variabilidad de corto plazo (<~30 años) y de largo plazo (>~30 años), son esenciales para estimar cambios naturales y antropogénicos presentes y futuros.

Existen diferentes métodos, directos e indirectos, que permiten la reconstrucción del paleoclima y paleoambiente. Dentro de los directos se encuentran los registros históricos e instrumentales (por ejemplo para Chile los registros instrumentales de temperatura datan de la segunda mitad del siglo XIX). Los registros indirectos, en inglés denominados "*proxy*", incluyen los testigos de sedimentos marinos y lacustres, anillos de árboles, arrecifes de coral y testigos de

neviza/hielo, entre otros (Bradley, 1999). Los testigos de hielo obtenidos de glaciares proveen uno de los registros más detallados del clima y de las condiciones medioambientales pasadas (Lorius *et al*., 1990; Bradley, 1999).

Los glaciares se definen como "toda masa de hielo perenne – a escalas humanas -, formada por la acumulación de nieve, cualquiera sean sus dimensiones y su forma, que fluye lentamente por deformación, deslizamiento basal y deslizamiento de sedimentos subglaciales" (Lliboutry, 1956). Los glaciares son indicadores del cambio climático a pequeña y gran escala de tiempo (Haeberli y Beniston, 1998; Thompson *et al*., 2000; Oerlemans, 2005; IPCC, 2001; Kääb *et al*., 2006), reconocidos por IPCC (2001) como los mejores indicadores terrestres de cambio climático debido a que estos cuerpos de nieve y hielo en movimiento poseen alta sensibilidad a las variaciones climáticas a través de su crecimiento o decrecimiento, y a su vez son capaces de registrar variaciones temporales de sus propiedades físicas, químicas y biológicas en su estratigrafía interna de nieve, neviza y hielo, constituyendo los mejores indicadores de alta resolución de cambios climáticos y medioambientales.

En la actualidad para la reconstrucción del paleoclima y paleoambiente a través de un testigo de neviza/hielo, se puede analizar una variedad creciente de parámetros físicos, químicos y biológicos, los que preservan las características atmosféricas y ambientales al momento de su depositación sobre la superficie del glaciar. Algunos de ellos son:

- estratigrafía (capas de nieve/hielo/material particulado),
- isótopos estables de oxígeno e hidrógeno (δD y H, ^{18}O y ^{16}O) como indicadores de la temperatura atmosférica en el momento en que se depositó la nieve,
- especies químicas Na^+, Ca^{2+}, K^+, NH_4^+,NO_3^-, Mg^{2+}, SO_4^{2} , y Cl^-, entre otros,

- gases atmosféricos atrapados en burbujas de aire que reflejan la composición atmosférica (CO_2, CH_4),
- radioisótopos tales como ^{210}Pb, ^{32}Si, ^{39}Ar y ^{14}C que sirven como indicadores de edad,
- componentes biogénicos como microalgas, polen y bacterias, entre otros.

Estos parámetros físicos, químicos y biológicos se utilizan como registros estacionales, anuales, decadales, y mileniales para la reconstrucción del clima y medioambiente pasados. El registro climático más antiguo obtenido por un testigo de hielo es de 740.000 años, recobrado en el domo Concordia (Dome C), Antártica Oriental, durante el año 2004 (EPICA, 2004; McManus, 2004).

Los registros anuales y estacionales nos permiten a su vez estimar el balance de masa de un glaciar, el cual se define por la integración areal de la suma algebraica de la ganancia de masa a través de la precipitación, escarcha (por condensación atmosférica) y depositación de nieve por viento (acumulación), y de la perdida de masa a través del derretimiento, sublimación y desprendimiento de témpanos (ablación). Si el balance de masa es positivo el glaciar aumenta de volumen, si es negativo su volumen disminuye (Braithwaite, 2002). Los testigos de nieve/hielo también permiten obtener el balance de masa en un punto del glaciar, lo cual normalmente se efectúa en la zona de acumulación donde existe un balance positivo, y que puede tener variaciones en distintas escalas de tiempo.

El balance de masa glaciar tiene relación directa con los cambios atmosféricos del medio ambiente, y la dinámica glaciar. Los cambios en el balance de masa inciden directamente en el nivel global del mar, el cual está ascendiendo actualmente a una tasa de 3.1 mm/año con aproximadamente la mitad de este valor debido al derretimiento de los glaciares (IPCC, 2007). A su vez los glaciares de montaña que alimentan cauces, lagos, centrales hidroeléctricas o sistemas

de irrigación constituyen un riesgo ante la formación de inesperados aluviones (Braithwaite, 2002). Por lo tanto, las estimaciones de balance de masa de glaciares son de particular importancia para el establecimiento del estatus presente de los glaciares y la explicación de fenómenos globales como las edades de hielo, cambios abruptos de clima y los cambios del nivel del mar (IPCC, 2001; Braithwaite, 2002).

En Chile existe solo un estudio sistemático de balance de masa de largo plazo, el cual es conducido por la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas, que monitorea desde 1975 el glaciar Echaurren Norte, ubicado en la cuenca superior del río Maipo (Escobar *et al*., 1995). El año 2003 el Centro de Estudios Científicos (CECS) inició un programa de balance de masa en el glaciar sureste del volcán Mocho-Choshuenco, el cual se ha interpretado para los años 2003-2005 (Rivera *et al*., 2005; Bown *et al*., en prensa).

1.2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

Los estudios relativos a testigos de hielo de Groenlandia y Antártica han entregado evidencia crucial para reconstruir el pasado medioambiental y climático de regiones polares (Lorius *et al., 1990*; McManus, 2004). Para complementar la información obtenida de estas regiones, son importantes los estudios de testigos en glaciares de latitudes bajas y medias (glaciares de montaña y campos de hielo no polares, entre 60° N y 60° S), que aunque cubren escalas de tiempo más cortas, pueden proveer información de las condiciones locales y el impacto de las actividades humanas que se realizan en sus alrededores (Thompson *et al.*, 2000, 2003).

En los glaciares de latitudes y altitudes bajas, que son usualmente temperados (vale decir donde el hielo está al punto de fusión), frecuentemente no pueden ser utilizados los métodos comunes para datar y caracterizar un testigo de hielo, como por ejemplo contar las capas anuales

a través de la variación estacional de concentraciones de iones químicos e isótopos estables (δD y $\delta^{18}O$), debido principalmente a la fuerte distorsión que sufren estas señales anuales y estacionales por la percolación del agua que se derrite en la superficie del glaciar durante el verano (Schwikowski *et al*., 1999; Eichler *et al*., 2001; Oliver *et al*., 2003). Consecuentemente, nuevos métodos son necesarios para datar y caracterizar testigos de glaciares temperados.

Se tiene conocimiento de tres estudios en tres zonas geográficas diferentes, en los cuales se analizan microalgas que habitan sobre el glaciar, utilizados para datar testigos de hielo en glaciares de latitudes bajas:

- glaciar Yala en los Himalayas de Nepal (Yoshimura *et al.*, 2000)
- glaciar Tyndall en Patagonia, Chile (Shiraiwa *et al*., 2002; Kohshima *et al*., *en prensa*)
- glaciar Sofiyskiy en las montañas Altai, Rusia, no interpretado exclusivamente con microalgas, como los anteriores, ya que abarca otros componentes biológicos como polen y hongos (Uetake *et al.*, 2006).

Estas investigaciones, en conjunto con otros estudios sobre comunidad y biomasa algal sobre la superficie de glaciares (Yoshimura *et al.*, 1997; Takeuchi *et al*., 1998; Takeuchi, 2001; Kohshima *et al*., 2002; y Takeuchi y Kohshima, 2004; entre otros), concluyen que las microalgas en los testigos de hielo constituyen una relevante señal anual, proporcionando información útil para conocer las condiciones medioambientales y climáticas pasadas, además de facilitar la estimación del balance de masa de un glaciar.

Las microalgas habitan en la superficie del glaciar durante la estación de derretimiento (primavera – verano), proliferando en la superficie al poseer las condiciones ambientales necesarias como son la presencia de nutrientes disueltos en el agua y luz, característicos de

glaciares temperados. Luego, al llegar el otoño la capa superficial se congela y se cubre con la acumulación de nieve de invierno, período en el cual no ocurre crecimiento de microalgas. La capa con microalgas se va agregando a los estratos del glaciar todos los años, siendo de este modo preservadas y a su vez pueden ser detectadas en los testigos de neviza/hielo, ya que poseen un tamaño mayor que los iones químicos e isótopos estables, no siendo tan afectadas por la percolación que ocurre en glaciares de latitudes medias, entregando una señal estacional y anual clara (Yoshimura *et al*., 2000; Kohshima *et al*., 2002; Shiraiwa *et al*., 2002; Uetake *et al., en prensa*).

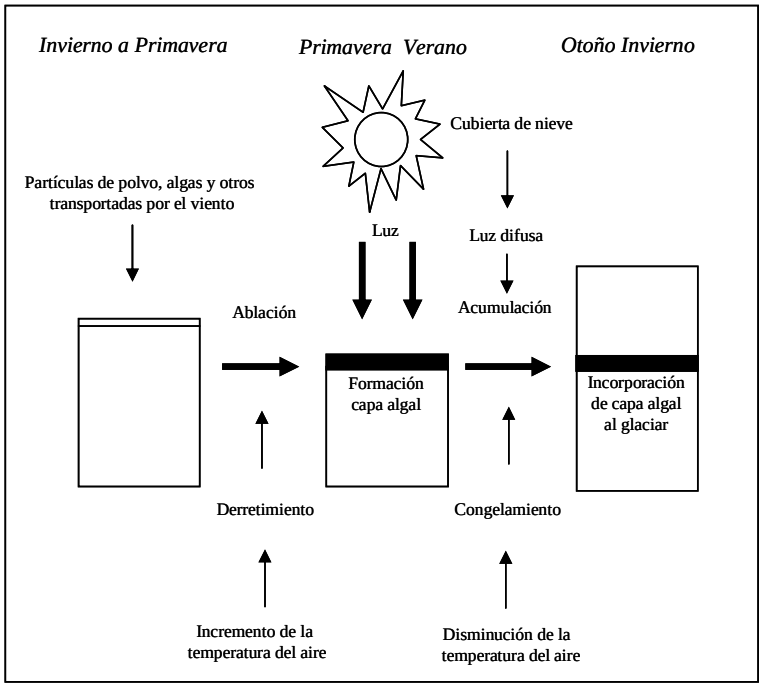

Fig.1. Formación capa microalgal basado en Yoshimura *et al.* (2000), modificado.

Al igual que las microalgas muchos otros microorganismos han sido reportados habitando sobre glaciares e integrando el ecosistema glaciar tales como insectos, copépodos, hongos, cianobacterias y bacterias (Kohshima, 1987; Takeuchi, 2001; Segawa *et al*., 2005). Estos microorganismos, debido a su resistencia al frío, son verdaderos extremófilos. Dicho ecosistema es relativamente simple y cerrado con una comunidad biótica especial, tolerante a bajas

temperaturas y comparable a ambientes de agua dulce como lagos y ríos (Kohshima, 1987; Kohshima *et al*., 2002), en donde las microalgas, como productores primarios, sustentan a las poblaciones heterótrofas (Kohshima, 1987; Yoshimura *et al*., 1997; Takeuchi *et al*., 1998; Kohshima *et al*., 2002). Se indica asimismo que en las partes profundas del testigo pudiese existir dificultad para identificar y cuantificar microalgas, debido a la autolisis o a la descomposición bacteriana de las células algales (Yoshimura *et al*., 2000; Kohshima *et al*., en prensa).

En la búsqueda de métodos alternativos para datar glaciares alpinos de latitudes bajas, otros estudios (Nakazawa *et al*., 2004; Nakazawa *et al*., 2005) ponen atención en la dispersión y depositación del polen sobre los glaciares, descubriendo marcas estacionales y anuales de polen en testigos de hielo sobre los glaciares Sofiyskiy y Belukha en las montañas Altai en Rusia. Estos estudios revelan las siguientes ventajas para datar con polen:

- los granos de polen se depositan sobre la superficie del glaciar por solo unos meses en el año, durante la floración, distinguiéndose diferentes capas estacionales al utilizar distintas especies de polen,
- el tamaño del grano de polen es relativamente grande, de 10 a 150 μm, lo que ayuda a la permanencia del grano en la profundidad a la cual se depositó, a pesar de la percolación del agua,
- la dura cubierta exterior del grano lo protege del deterioro a través del tiempo.

Estos estudios concluyen que el polen puede ser usado para determinar capas anuales y estacionales en glaciares de latitudes bajas, y a su vez ser una fuente importante de información paleoclimática y paleoambiental, como también un indicador sensible de la circulación atmosférica pasada (Liu *et al*., 1998; Bourgeois *et al*., 2000; Nakazawa *et al*., 2004; Nakazawa *et al*., 2005).

Sin embargo, se encuentra una variación temporal y espacial significativa en la concentración de polen en la superficie de la capa de hielo tropical en los Andes Altiplánicos de Bolivia y Perú, señalando diferencias en el porcentaje y concentración de polen en un mismo lugar entre dos años consecutivos. (Reese *et al*., 2003; Reese y Liu, 2005). Es preciso responder la existencia de variabilidad espacial o temporal debida al viento, precipitaciones o la disminución de la floración y por lo tanto dispersión de polen en la vegetación que rodea los sitios, antes de validar la confiabilidad del polen como registro anual o estacional.

Lo anterior sugiere que para mejorar la confiabilidad de la datación de los testigos de hielo a través del análisis biológico, es beneficioso el uso de múltiples fuentes de información, tal como el polen y las microalgas (Uetake *et al*., *en prensa*). En adición a aportar información de capas estacionales y anuales en un testigo, las características detalladas de microorganismos que habitan sobre el glaciar y quedan preservados en los testigos, tal como las microalgas, podrían proveer información acerca de las condiciones medioambientales de la superficie, como temperatura y tasas de acumulación de nieve, factores que afectan su crecimiento (Yoshimura *et al*., 2000; Kohshima *et al*., 2002).

El presente estudio pretende datar a través de un análisis biológico mediante microalgas, polen y otros microorganismos, tres testigos someros (~ 10 m) en glaciares andinos temperados de la Región de los Lagos de Chile, para evaluar la preservación de las características biológicas, físicas y químicas, idealmente datando el testigo con una resolución anual y estacional, que permitirá estimar el balance de masa de cada sitio. Se espera que el estudio posibilite seleccionar un sitio adecuado para obtener un futuro testigo profundo (>50 m), que cubra idealmente un registro climático y ambiental único de al menos varias décadas, incorporando datos en una zona carente de información.

1.3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS DE TRABAJO

1.3.1. Hipótesis Descriptivas

- Existe una estratificación estacional y anual de biovolumen microalgal, polen y otros microorganismos en los testigos de neviza/hielo, del volcán Mocho-Choshuenco y del volcán Osorno.
- Dicha señal estacional y anual permite estimar directamente la acumulación de nieve sobre el sitio de perforación, constituyendo un valioso indicador climático y medioambiental.

1.3.2. Objetivo General

Reconstrucción de las condiciones climáticas y medioambientales con una resolución anual y estacional en testigos de neviza/hielo someros, a través de análisis biológico, biovolumen microalgal, abundancia de polen y otros microorganismos, en el glaciar del Volcán Mocho-Choshuenco y del Volcán Osorno, Región de los Lagos, Chile.

1.3.3. Objetivos Específicos

- Cuantificación, registro fotográfico, estimación de biovolumen de microalgas, estimación de abundancia de polen y otros microorganismos, en testigos de neviza/hielo someros de glaciar del Volcán Mocho-Choshuenco y del glaciar del Volcán Osorno.
- Análisis biológico de los testigos someros a través de los datos obtenidos
- Análisis de especies químicas, incluyendo tendencias y preservación de estacionalidad en su distribución en los sitios perforados, comparando con la interpretación biológica del testigo.
- Interpretación y datación interanual y estacional de las condiciones nivales y estimación del balance de masa anual e invernal basado en análisis biológicos, químicos y físicos.

Capítulo 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. SITIO DE ESTUDIO

Se escogieron los siguientes dos glaciares ubicados en los volcanes activos de la X Región de los Lagos (Fig. 2), Cordillera de los Andes, Chile:

- Volcán Mocho-Choshuenco (Lat: 39° 55’ S; Long: 72° 02’W), un testigo recolectado en la cumbre a 2422 m s.n.m. y otro en el glaciar sureste a 2000 m s.n.m.
- Volcán Osorno (Lat: 41° 06’ S; Long: 72°30’ W), un testigo recolectado en la cumbre a 2652 m s.n.m.

Se escogieron ambos lugares porque sus cumbres respectivas presentan lugares relativamente planos y con una capa adecuada de hielo para realizar una perforación del orden de 10 m de profundidad. Basado en inspecciones visuales de la superficie del glaciar por parte de los investigadores del CECS, en la cumbre del Volcán Mocho-Choshuenco, y en el valor anual de la temperaturas de estaciones costeras en la X Región (~11°C) en combinación con un gradiente altitudinal normal de temperatura (~6°C/km), se esperaba que la temperatura media anual en la cumbre del Volcán Mocho-Choshuenco y Volcán Osorno fuese del orden de ¯3 a ¯5 °C, pero con una fuerte fusión estival y abundante presencia de agua en verano, al menos en superficie.

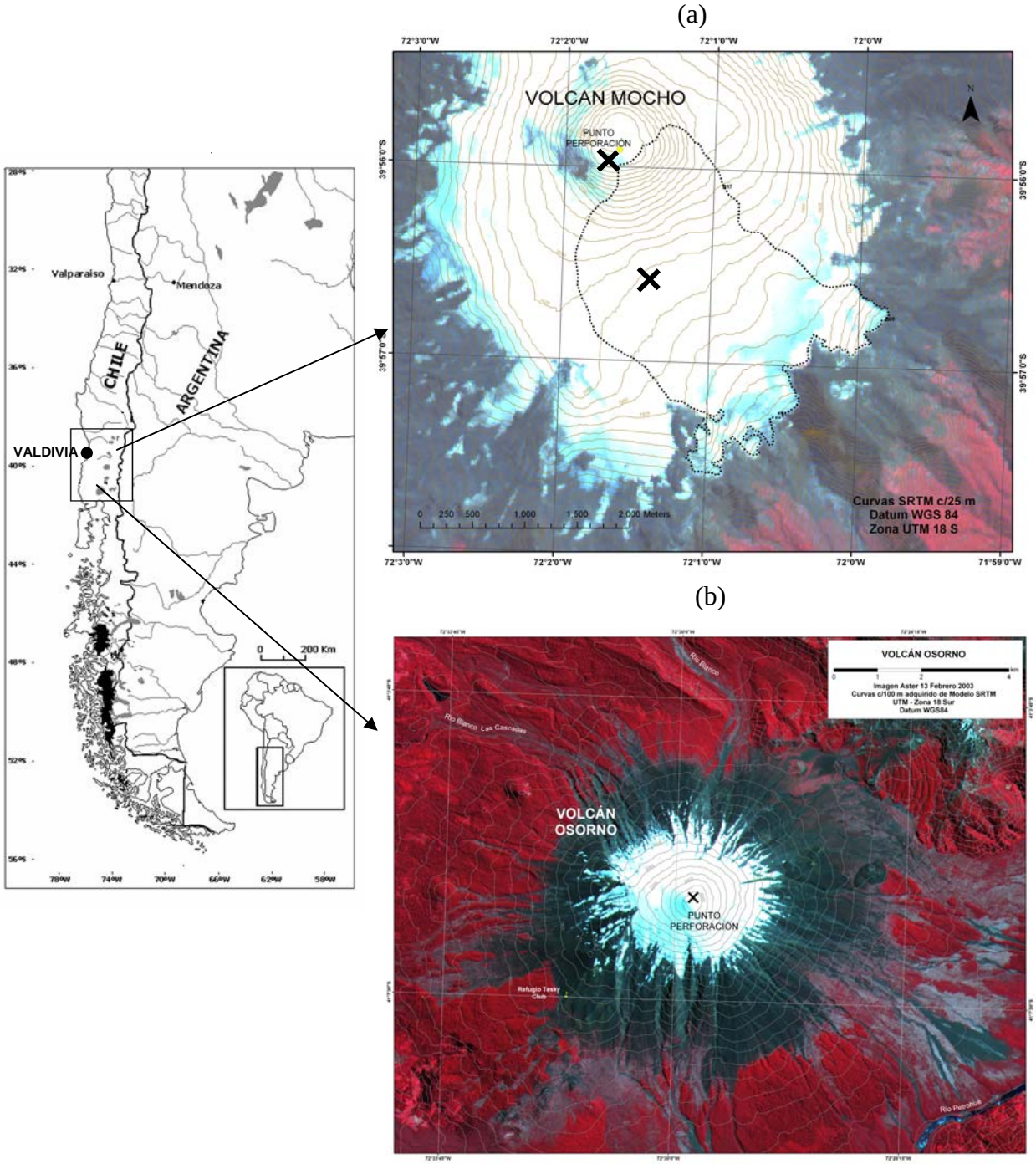

Fig.**2**. Localización de los volcanes Mocho-Choshuenco y Osorno, X Región de los Lagos, Chile. **(a)** Imagen satelital volcán Mocho-Choshuenco. Las cruces negras indican los sitios de perforación. El área delineada en el volcán corresponde al glaciar sureste. **(b)** Imagen satelital del volcán Osorno. La cruz negra indica sitio de perforación.

2.2. OBTENCIÓN DE TESTIGOS

Se obtuvo un testigo de neviza/hielo en la cumbre del glaciar del Volcán Osorno a 2652 m de altitud y 10.4 m de profundidad el día 1 de noviembre del 2005. Se obtuvieron asimismo dos testigos de neviza/hielo en el glaciar sureste del Volcán Mocho-Choshuenco, el primero taladrado el día 26 de octubre del 2005, de 10 m de profundidad, sobre un pozo somero (profundidad de 1 m) de nieve en la zona de acumulación a 2000 m de altitud y el segundo el día 27 de octubre del 2005, de 10.2 m de profundidad, en la cumbre a 2422 m de altitud. Los testigos fueron obtenidos por el Dr. Shiro Kohshima del Tokio Institute of Technology, Japón, y el Dr. Gino Casassa del CECS, Valdivia, en colaboración con los Sres. Gonzalo Campos, Darío Schwerer, Ronald Mella (CECS), Marcos Rodríguez (CECS) y Marcelo Arévalo.

2.3. PROCESO DE OBTENCIÓN DE MUESTRAS

El proceso de muestreo de los testigos de neviza/hielo contempló taladrar un máximo de 15 m con un taladro manual de fibra de vidrio y tubo muestreador de aluminio con cuchillos cortantes de acero, de un diámetro interno de 7 cm (Fig. 3 y 4). Cada testigo, de un largo aproximado de 10 m, fue cortado y limpiado con un cuchillo de acero, en secciones de 20 cm de largo, eliminando en cada sección una capa superficial de 1 cm de espesor para descartar contaminación. Por cada testigo hay por consiguiente alrededor de 50 secciones que corresponden a 50 muestras. Las muestras de neviza y hielo fueron envasadas en bolsas plásticas pre-limpiadas y luego trasladadas a una cámara fría del CECS en Valdivia a -18°C, donde llegaron en estado sólido. Posteriormente las muestras fueron derretidas a temperatura ambiente, e inmediatamente envasadas en dos frascos plásticos de 50 ml por cada muestra, los que se preservaron en una cámara de frío (-24ºC), para su posterior fijación y montaje. Los frascos

fueron pre-limpiados con agua Nanopura desionizada. Como se describe en la sección siguiente, un frasco se utilizó para las muestras biológicas, mientras que el otro frasco se envió a Japón para análisis de isótopos estables y especies químicas.

Fig. 3. Tubo muestreador de aluminio, sostenido por el Dr. Shiro Kohshima. Volcán Mocho-Choshuenco.

Fig. 4. Obtención de testigo de prueba en glaciar Volcán Mocho-Choshuenco. Se puede observar el taladro manual de fibra de vidrio y tubo muestreador.

2.4. TÉCNICA DE ANÁLISIS DE MUESTRAS

2.4.1. <u>Fijación y Montaje de Muestras</u>

Para el análisis de microorganismos y polen, las muestras debieron ser montadas y fijadas al interior de una cámara de flujo laminar vertical para evitar su contaminación. Se filtraron 15 ml de la muestra de hielo derretido a través de un filtro de membrana de politetrafluoroetileno hidrofílico (PTFE), Millipore (JHPO1300, USA), tamaño de poro del filtro de 0.2 μm, y 13 mm de diámetro. Antes de la filtración se lavó el filtro con agua bidestilada Nanopura. Una vez

filtrada la muestra, el filtro se montó sobre el portaobjeto añadiéndole una gota de fijador, compuesto de glicerol, formalina y agua (volumen 1:1:1). Luego se colocó el cubreobjeto y se selló con bálsamo de Canadá.

2.4.2. Proceso de Cuantificación y Observación

Se cuantificó el número de microorganismos y polen con un microscopio de fluorescencia (OLYMPUS BX-FLA). La determinación del biovolumen algal se realizó mediante la técnica desarrollada por Yoshimura *et al*. (1997, 2000). Se cuantificó y midió las células algales que emitieron luz roja fluorescente al ser excitadas con luz incidente verde (filtro U-MWIG), detectando los fluorocromos de la clorofila, lo que indica que son células algales fotosintéticamente activas. La cuantificación de microalgas y otros microorganismos se llevó a cabo a través de tres a cinco transectos paralelos al diámetro central, pero una vez finalizada la cuantificación de estos transectos se observo el filtro completo en el caso de encontrar otros microorganismos que por su tamaño y baja abundancia se distribuyeran hacia la periferia. En el caso de polen de la familia Podocarpaceae se cuantificó los granos del filtro en su totalidad.

La identificación de los granos de polen se realizó a través de Heusser, C. (1971) y la de *Trinema spp* a través de Kudo, R. (1969) y Decloitre, L (1981).

2.4.3. Estimación de Biovolumen Microalgal

El biovolumen microalgal se obtuvo a través del volumen medio celular, el que se estima midiendo 50 – 100 células por especie o por rangos de tamaño de 1 μm en el caso de especies desconocidas. Para este estudio las microalgas fueron agrupadas por morfotipos, que corresponden a microalgas con las mismas características de morfología y de tamaño. Cada

morfotipo fue caracterizado y rotulado con una letra mayúscula. Por lo tanto el volumen medio celular fue obtenido contando 50 – 100 microalgas por morfotipo, y a su vez cada morfotipo fue separado por rangos de tamaño de 1 μm para esta estimación. El biovolumen algal total (μm^3 mL^{-1}) se estimó multiplicando el volumen medio celular (μm^3) de cada morfotipo por su densidad algal (células/mL) en cada muestra, para luego sumar el biovolumen de todos los morfotipos presentes en la muestra y obtener el perfil vertical.

Para realizar los perfiles verticales de biovolumen algal se eliminó el biovolumen de los organismos menores a 5 μm, sugerido por Uetake *et al.* (2006).

2.4.4. Estimación de la Concentración de Granos de Polen

Para el polen se clasificaron y cuantificaron solo los tipos con concentraciones máximas, según la técnica desarrollada por Nakazawa *et al.* (2004). Fueron cuantificados en los testigos dos tipos de polen, el primero corresponde a granos de polen pertenecientes a árboles de la familia Podocarpaceae, y el otro a granos de polen pertenecientes a árboles del género *Nothofagus*.

2.4.5. Evaluación de Contaminación

Se realizaron dos controles con cinco réplicas cada uno, que fueron sometidos a las mismas etapas de montaje, fijación y cuantificación, con el objetivo de evaluar la posible contaminación. El control uno correspondió a agua Nanopura congelada en un envase de 50 mL, idéntico al de las muestras reales, en freezer a -20 °C durante una semana, y el control dos a agua Nanopura congelada de la misma manera que la anterior, pero durante un mes. Los resultados de los controles indicaron que no hay contaminación, ya que no existió presencia de

microorganismos ni de polen, vale decir 0 μm^3 mL^{-1} de biovolumen algal, y 0 individuos de polen.

2.4.6. Propiedades Físicas

Cada testigo cuenta con la información de estratigrafía visual y densidad de nieve/hielo, obtenida en terreno en forma inmediatamente posterior a la perforación. La transformación del largo de cada sección del testigo de neviza/hielo a largo equivalente (eq.) de agua se realiza mutiplicando el largo de cada sección (20 cm) por la densidad de la neviza/hielo cada 20 cm, dividida por la densidad de agua, de acuerdo a la siguiente ecuación:

Eq. agua = Largo de cada sección x Densidad de la neviza/hielo / Densidad del agua

La profundidad acumulada es simplemente la sumatoria de los equivalentes en agua de cada sección.

2.4.7. Medición de Isótopos y Especies Químicas

El segundo conjunto de botellas de 50 mL fue enviado a Japón congelado, en una caja con hielo seco, llegando a Japón sin derretirse. Los iones principales de las especies químicas (Na^+, Ca^{2+}, K^+, NH_4^+,NO_3^-, Mg^{2+}, SO_4^{2} , Cl^-) fueron medidos con cromatógrafo iónico, y los isótopos estables de δD (deuterio) fueron medidos con un espectrómetro de masa (Schwikowski et al., 1999 a y 1999 b), ambos análisis siendo realizados en el Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, y supervisados por el Dr. Takayuki Shiraiwa y el Dr. Shiro Kohshima. Las mediciones de las concentraciones de especies químicas del testigo de

neviza/hielo sobre la estación 18 del glaciar sureste del volcán Mocho-Choshuenco no fueron realizados, por lo cual no se encuentran disponibles para el análisis en este estudio.

2.5. INTERPRETACION Y ESTIMACIÓN DE BALANCE DE MASA DE LOS TESTIGOS

Se estimó el balance de masa, de cada sitio perforado, primero a partir de la interpretación del análisis biológico, para observar la utilidad de este análisis por si solo. Luego complementamos y comparamos esta estimación con la interpretación de los análisis físicos y químicos. Por lo tanto la estimación del balance de masa se realizó al final mediante un conjunto de indicadores, lo cual se denomina en inglés como método *multiproxy*.

Para realizar la estimación del balance de masa con las capas microalgales, corroborado con los otros perfiles biológicos, se utilizó el límite superior de la capa de microalgas como marca estacional que indico el fin de la estación de crecimiento (marzo aproximadamente) y por lo tanto comienzos de otoño, ya que se consideró la posible descomposición de células algales que afectarían mucho más al limite inferior de microalgas que corresponde al inicio de la estación de derretimiento, la cual podría ser modificada a través del avance de la estación. En cambio el límite superior de microalgas se mantendría estable después de su depositación ya que es más rápidamente agregado al sustrato y preservado inmediatamente antes del invierno (Kohshima *et al.*, en prensa). No existen datos concretos de cuando comienza y termina la estación de derretimiento en los sitios perforados, pero debería ser aproximadamente a fines de marzo o abril (Rivera *et al*., 2005). Por lo tanto nosotros asumimos de acuerdo a la literatura que el límite superior de una capa de microalgas indica la transición del fin de la estación de derretimiento, y el comienzo de la estación de acumulación de nieve en otoño-invierno.

Capítulo 3

RESULTADOS

Se entregarán los resultados en el siguiente orden, para cada testigo:

- análisis biológicos
- propiedades físicas,
- análisis de isótopo y especies químicas,

El orden de los testigos corresponderá a:

- 3.1. Testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del Volcán Osorno
- 3.2. Testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del Volcán Mocho-Choshuenco
- 3.3. Testigo de neviza/hielo sobre la estación 18 del glaciar Sureste del Volcán Mocho-Choshuenco.

3.1. TESTIGO DE NEVIZA/HIELO DEL VOLCÁN OSORNO

3.1.1. <u>Análisis Biológico</u>

3.1.1.1. Microalgas

Se observaron y caracterizaron 27 morfotipos de microalgas de los cuales 25 corresponden a microalgas del Reino Protista, División Clorophyta (algas verdes) y 2 morfotipos pertenecientes al Reino Monera, División Cyanophyta (algas verde – azules) también conocidas como Cianobacterias (Tabla 1; Fig.6 y 7).

El perfil vertical de biovolumen algal indica dos capas entre los 5.6-7.2 m y entre los 8.2-10 m (Fig. 5a). El máximo biovolumen microalgal en este perfil corresponde a 19.98 x 10^4 μm^3 mL^{-1}.

Los morfotipos que presentan mayor biovolumen relativo en la capa de microalgas entre los 5.4–7.4 m son K y J, los cuales representan un 60% (Fig.5b) y un 25% (Fig. 5c) del total, respectivamente. Los morfotipos en los cuales se excluyó a las células <5 μm del perfil de biovolumen algal total corresponden a: A (3-4 μm de diámetro), G (4-5 μm de ancho), AE (3 μm de ancho) y AP (2-5 μm de largo y 2-4 μm de ancho). Los perfiles de estos morfotipos se encuentran en la Figura 5, excepto el perfil de los morfotipos AE y AP ya que poseen un número de microalgas muy bajo y se encuentran solo en una capa de 20cm.

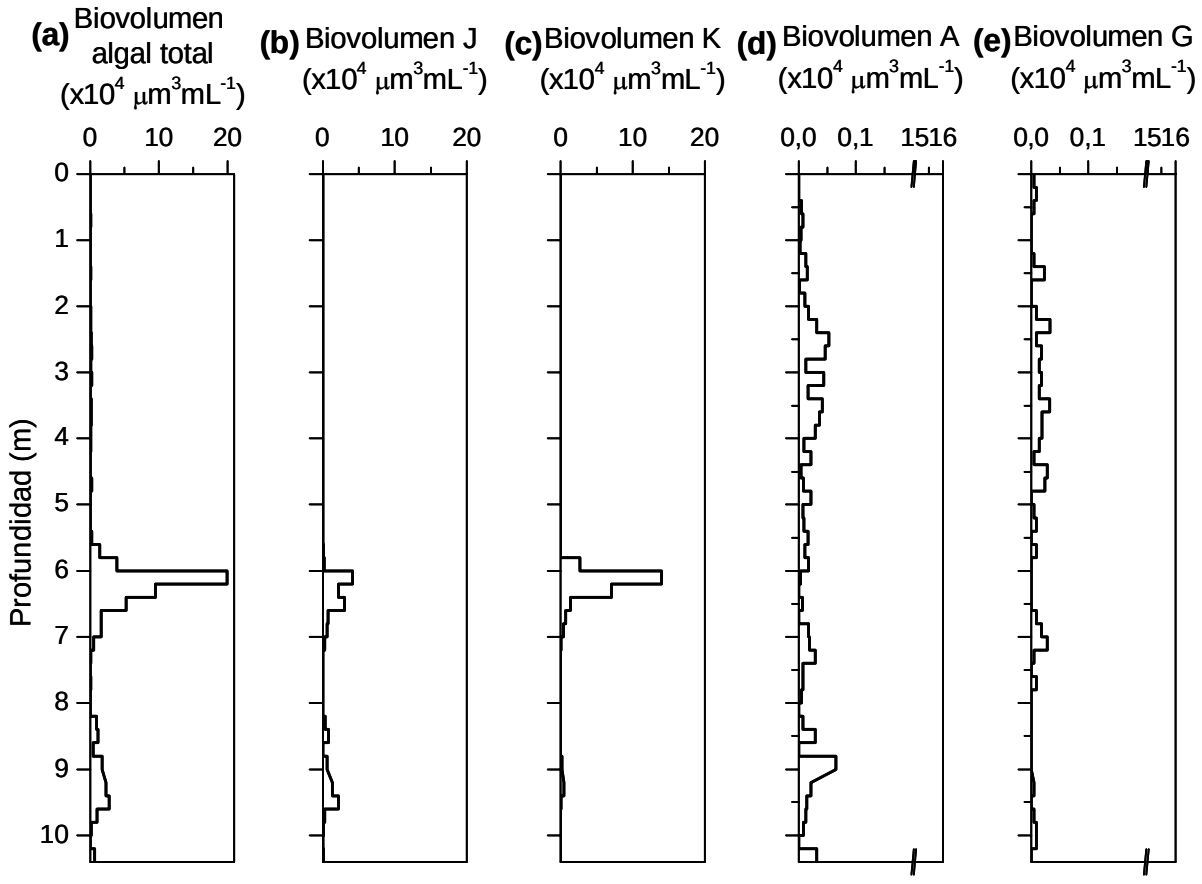

Fig. 5. - Perfiles verticales de biovolumen algal (x10^4 μm^3 mL^{-1}), del testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del Volcán Osorno, recuperado en noviembre 2005. **(a)** Biovolumen algal total, **(b)** biovolumen microalgas morfotipo J, **(c)** biovolumen microalgas morfotipo K, **(d)** biovolumen microalgas morfotipo A (<5μm), **(e)** biovolumen microalgas morfotipo G (<5μm)

Tabla 1.- Características de los 27 morfotipos de microalgas en muestras del testigo neviza/hielo del glaciar de la cumbre del Volcán Osorno.

Morfotipos	Tamaño y Morfologia
Cianobacterias	
A	Célula esférica, incolora, diámetro de 3-6 μm
AP	Célula esférica a ovalada , incolora, agrupadas en cenobios, 2-5 μm de largo, 2-4 μm de ancho. Es 1,3 ± 0,2 veces más larga que ancha.
Chlorophytas	
AE	Célula cilíndrica ápices redondeados, incolora, división central a lo ancho, 9-14 μm de largo y 3 μm de ancho. Es 3,8 ± 0,7 veces más larga que ancha.
AF	Célula ovalada , incolora, cubierta gruesa, 9-12 μm de largo y 5-8 μm de ancho. Es 1,5 ± 0,2 veces más larga que ancha.
B	Célula esférica, color verde tenue e incoloras, diámetro de 6-9 μm.
C	Célula ovalada un extremo aguzado, color café claro e incoloras, 10-14 μm de largo, 7-9 μm de ancho. Es 1,5 ± 0,2 veces más larga que ancha.
D	Célula cilíndrica ápices redondeados, incolora, 7-10 μm de largo, 3-4 μm de ancho. Es 2,3 ± 0,3 veces más larga que ancha.
E	Célula esférica, color verde tenue, diámetro de 10-13 μm
EA	Célula esférica, color verde tenue e incolora, diámetro de 14-17 μm
F	Célula fusiforme, incolora, 11 mm de largo, 6 μm de ancho.Es 2 veces más larga que ancha.
G	Célula ovalada, color café claro,5-11 μm de largo, 4-7 μm de ancho.Es 1,6 ± 0,2 veces más larga que ancha.
H	Célula esférica, color café oscuro, diámetro de 11-13 μm.
HC	Célula esférica, color café rojizo, diámetro de 5-9 μm
J	Célula cilíndrica alargada ápices redondeados, color verde tenue e incoloras, 12-19 μm de largo, 5-8 μm de ancho. Es 2,3 ± 0,3 veces más larga que ancha.
K	Célula esférica, incolora y otras verde tenue, diámetro de 5-9 μm
L	Célula esférica, color rojo, amarillo y anaranjado claro, diámetro de 19-23 μm
M	Célula ovalada, incolora, 15-22 μm de largo, 10-15 μm de ancho. Es 1,4 ± 0,1 veces más larga que ancha.
N	Célula ovalada eliptica, color verde tenue e incolora, 14-19 μm de largo, 8-12 μm de ancho. Es 1,6 ± 0,2 veces más larga que ancha.
Q	Célula cilíndrica ápices redondeados, incolora, 15-20 μm de largo, 9-11 μm de ancho. Es 1,9 ± 0,1 veces más larga que ancha.
R	Célula elíptica alargada, dividida a lo largo en dos, incolora,16-18 μm de largo, 7-8 μm de ancho. Es 2,4 ± 0,3 veces más larga que ancha.
S	Célula fusiforme alargada,dividida a lo ancho en cuatro segmentos iguales, incolora, 15-18 μm de largo, 4-5 μm de ancho. Es 3,5 ± 0,5 veces más larga que ancha.
T	Célula cilíndrica ápices levemente redondeados, incolora,19-21 μm de largo, 11-12 μm de ancho. Es 1,8 veces más larga que ancha.
U	Célula elíptica un ápice aguzado, incolora, 11-21 μm de largo, 5-8 μm de ancho. Es 2,5 ± 0,3 veces más larga que ancha.
V	Célula esférica a ovalada, incolora, 8-10 μm de largo, 6-7 μm de ancho. Es 1,4 ± 0,2 veces más larga que ancha.
W	Célula cilíndrica ápice levemente redondeados, incolora, 25 μm de largo, 14-15 μm de ancho. Es 1,7 veces más larga que ancha.
X	Célula elíptica, división central a lo ancho, incolora, 13 μm de largo, 6 μm de ancho. Es 2,1 veces más larga que ancha.
Z	Célula cilindrica ápices redondeados levemente, incolora, 19-21 μm de largo, 11-12 μm de ancho. Es 1,7 ± 0,05 veces más larga que ancha.

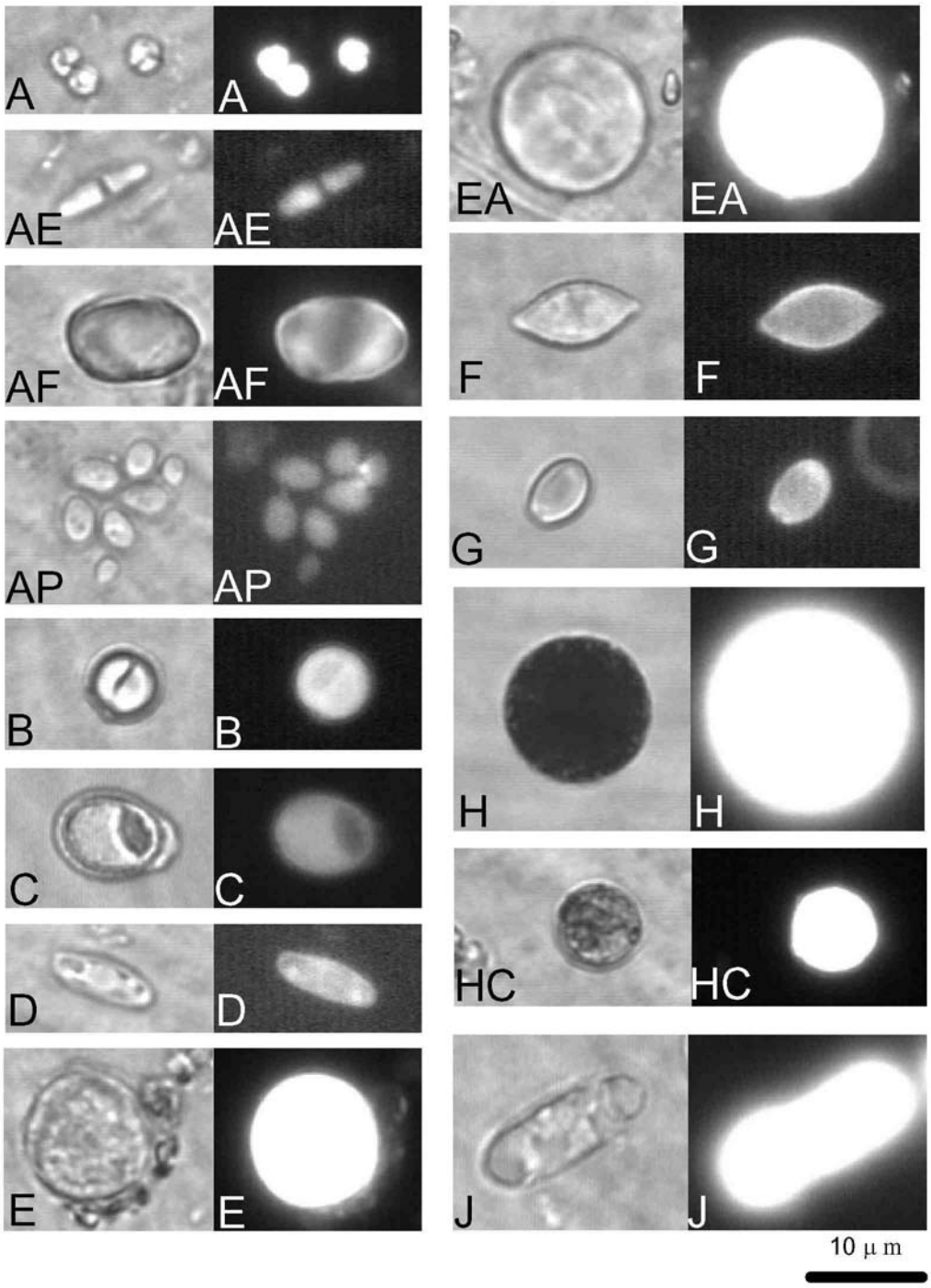

Fig. 6.- Morfotipos algales desde A hasta J, encontrados en el testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Osorno. Cada morfotipo esta señalado con la letra mayúscula que le corresponde. Las letras de color negro (izq.) corresponden a imágenes obtenidas en campo claro, las letras de color blanco (der.) son imágenes obtenidas con fluorescencia (filtro U-MWIG). Fotografías adquiridas con microscopio de fluorescencia modelo OLYMPUS BX-FLA.

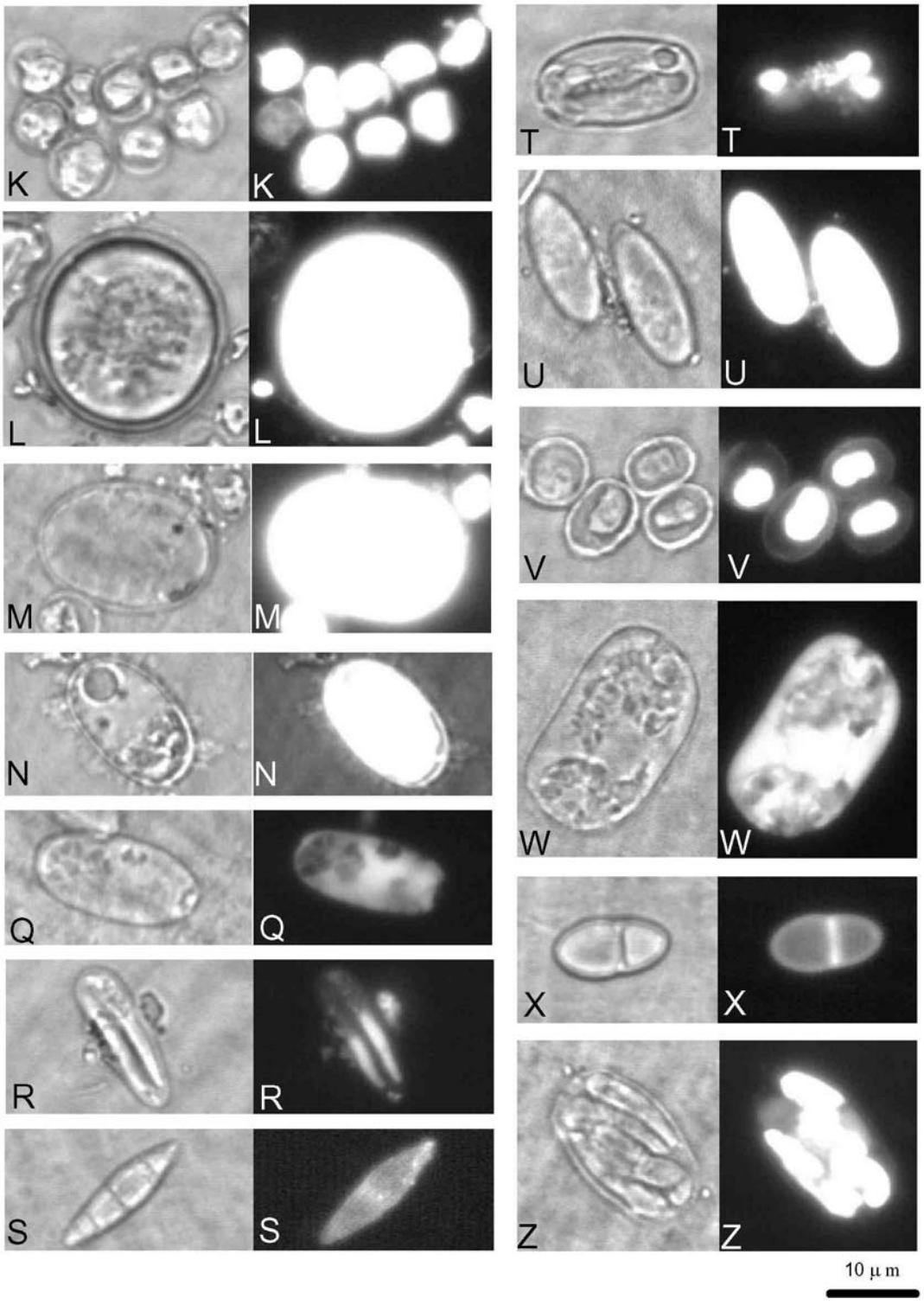

Fig.7.- Morfotipos algales desde K hasta Z, encontrados en el testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Osorno. Para más detalles ver leyenda de Fig. 6.

3.1.1.2. Granos de Polen

Se cuantificaron granos de polen de árboles de la familia Podocarpaceae (Fig. 8a, b) y granos de polen de árboles del género *Nothofagus* (Fig. 8c, d). Se observó polen de otras especies pero con menores concentraciones que las cuantificadas, que no permiten realizar perfiles confiables.

El perfil vertical de concentración de granos de polen (granos mL^{-1}) de la familia Podocarpaceae indica dos capas entre 0.2-0.8 m y 10.2-10.4 m (Fig. 10a). El perfil de concentración de granos de polen (granos mL^{-1}) del género *Nothofagus* muestra una capa entre 0.2-1 m (Fig. 10b).

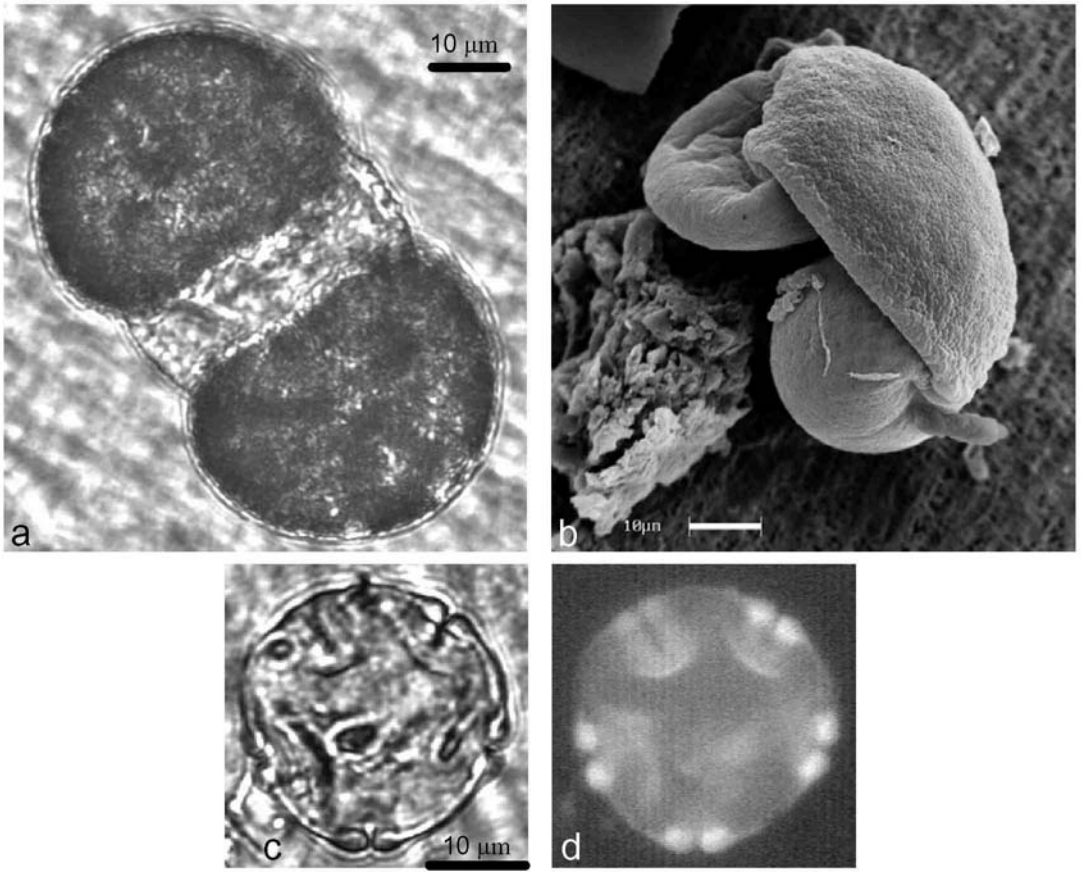

Fig. 8. - Granos de polen cuantificados en testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Osorno. **(a)** Polen de la familia Podocarpaceae en campo claro, **(b)** polen familia Podocarpaceae, **(c)** y **(d)** Polen del género *Nothofagus*, **(c)** campo claro y **(d)** fluorescencia. Fotografías **(a)**, **(c)** y **(d)** obtenidas de microscopio de fluorescencia OLYMPUS BX-FLA, fotografía **(b**) adquirida por un microscopio electrónico de barrido (MEB).

3.1.1.3. Protozoo Tecameba

3.1.1.3.1. Identificación Taxonómica (Patterson and Kumar, 2002):

Los individuos de protozoo Tecameba pertenecen al:

Subphylum Sarcodina Schmarda, 1871

Clase Reticularea Lankeser, 1885

Subclase Filosia Leidy, 1879

Orden Gromida Claparède y Lachmann, 1859

Familia Euglyphidae Wallich, 1864

Subfamilia TRINEMATINAE Hoogenraad y De Groot, 1940

Género *Trinema* Dujardin, 1841

3.1.1.3.2. Descripción del Género *Trinema*:

Organismos de testa incolora, sección transversal ovoide, oval o circular, comprimida anteriormente, compuesta por escamas o placas silíceas circulares; la abertura es sub-terminal circular, oblicua, invaginada, las placas de la abertura son denticuladas; el núcleo es posterior; pseudópodos del tipo filópodos no ramificados (Kudo, 1969; Decloitre, 1981) (Fig.9).

Los especímenes observados coinciden con la descripción anterior, aunque tienen los pseudópodos contraídos dentro de la testa, por lo tanto no pudieron ser observados. El tamaño de los individuos va desde 30 a 100 μm de largo y de 18 a 60 μm de ancho.

3.1.1.3.3. Cuantificación *Trinema spp*:

El perfil de abundancia (individuos mL^{-1}) nos indica seis capas con presencia de *Trinema spp*, entre los 6-6.2 m, 6.4-6.6 m, 8.2-8.6 m, 8.8-9.4 m, 9.6-9.8 m, 10-10.2 m (Fig. 9d), que se pueden interpretar como dos capas de 6.0–6.6 m y de 8.2–9.8 m. La máxima densidad de *Trinema spp* en este perfil es de 3 ind mL^{-1}.

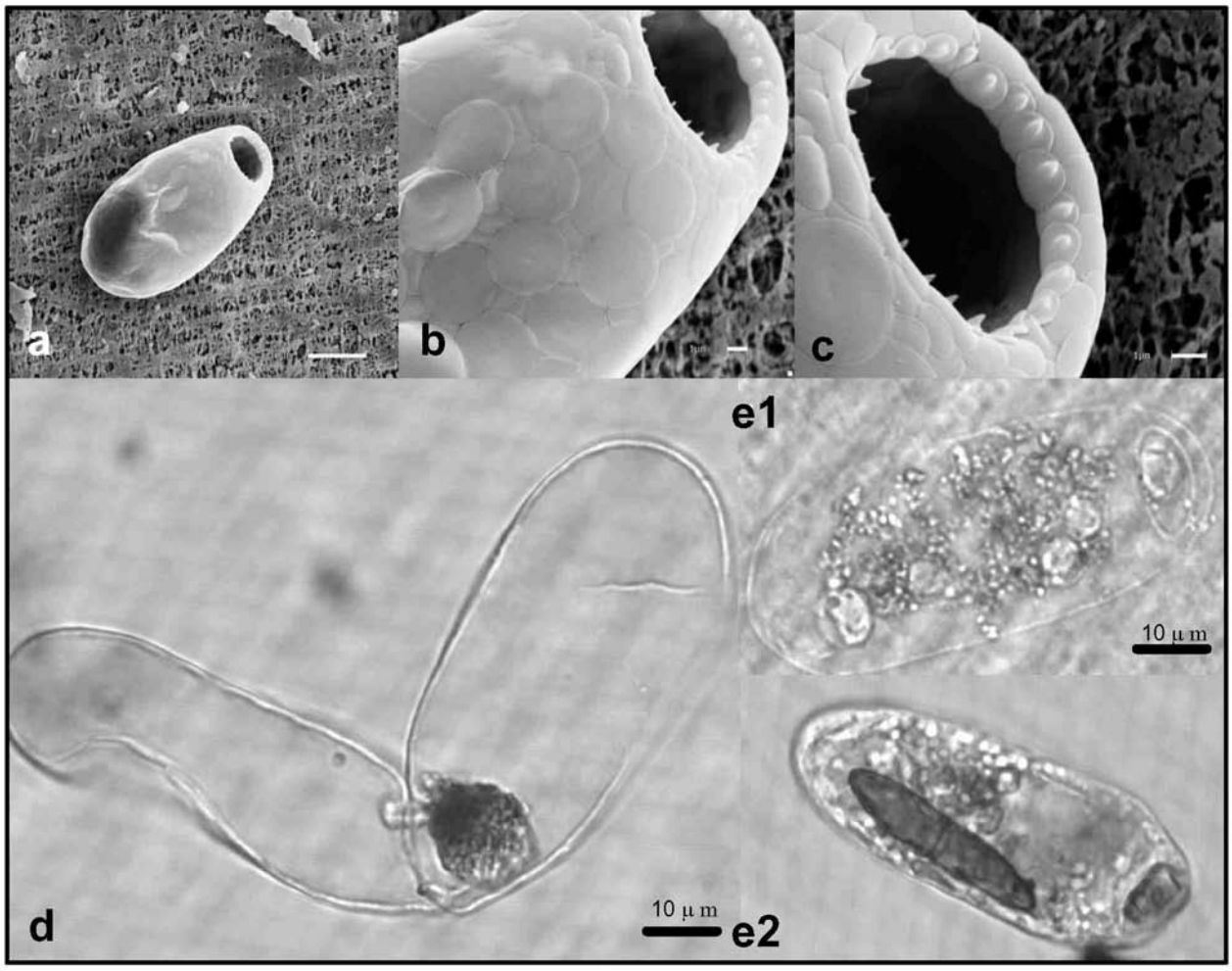

Fig. 9.- Fotografías protozoo Tecameba, *Trinema spp* observado en las muestras de los tres testigos de neviza/hielo obtenidos en este estudio. **(a)** Testa *Trinema spp,* **(b)** escamas silíceas circulares, **(c)** abertura con placas denticuladas, **(d)** Fusión sexual en *Trinema spp* **(e)** *Trinema spp* con alimento en su interior **(e.1)** dieta de microalgas, **(e.2)** dieta de hongo. Fotografías **(a)**, **(b)** y **(c)** adquiridas por MEB, y fotografías **(d)**, **(e1)** y **(e2)** adquiridas por microscopio de fluorescencia en campo claro.

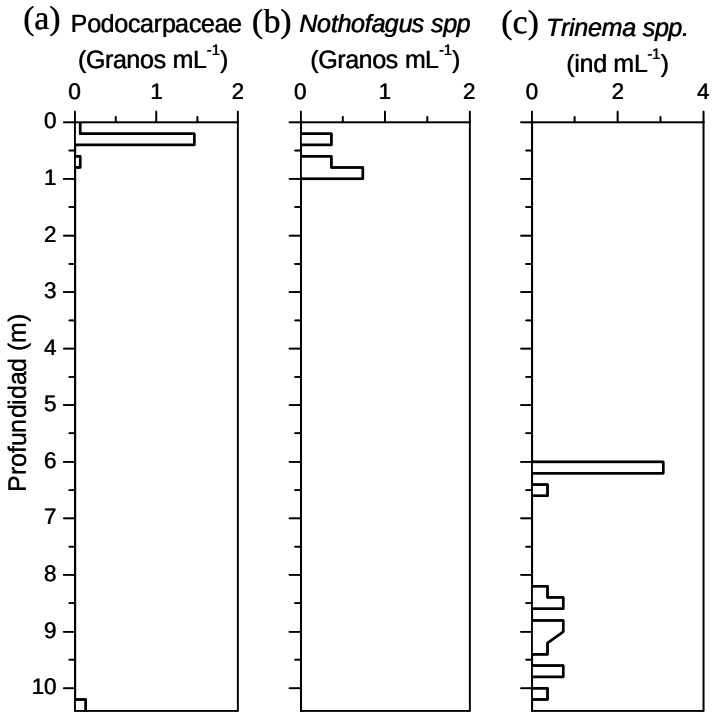

Fig. 10. – Perfiles biológicos verticales del testigo de neviza/hielo obtenido del glaciar de la cumbre del Volcán Osorno. **(a)** Concentración de polen de Podocarpaceae (granos mL^{-1}), **(b)** concentración de polen de *Nothofagus spp* (granos mL^{-1}), **(c)** Abundancia de *Trinema spp* (individuos mL^{-1}).

3.1.2. <u>Análisis Físico</u>

3.1.2.1. Propiedades Físicas

Las capas que presentan porcentajes superiores a un 60% de hielo se encuentran entre: 0.4-0.6 m con un 70%, 1.0-1.2 m con un 60%, 4.6-4.8 m con un 70%, 5.8-6.0 m con un 85%, 8.4-8.6 m con un 60%, 9.6-9.8 m con un 60% y 9.8-10.0 m con un 65%.(Fig. 11a)

La densidad incrementa levemente con la profundidad pero no se logra la transición neviza/hielo (Fig. 11b), que ocurre teóricamente a los 0.83 gr cm^{-3} (Paterson, 1994). Los 10.4 m de largo que posee este testigo corresponden a 5.88 m equivalentes de agua.

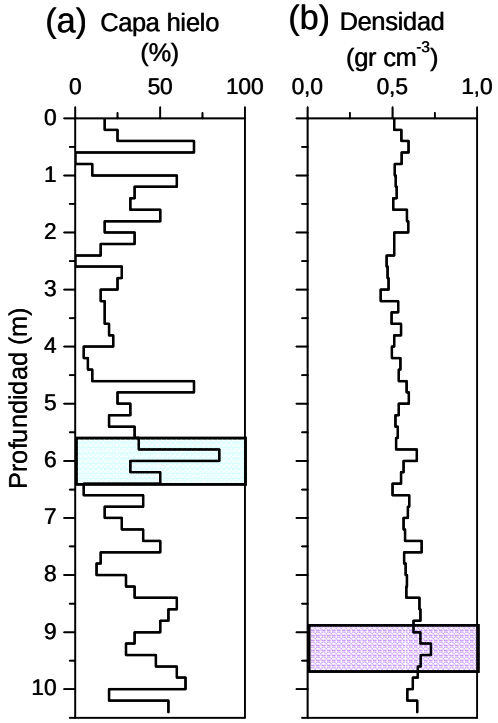

Fig. 11.- Perfiles verticales de características físicas en el testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Osorno**. (a)** Porcentaje de capa de hielo, la **franja celeste** indica el mayor porcentaje de capa de hielo observado, que corresponde a 85%. **(b)** Densidad (gr cm^{-3}), la **franja violeta** indica la mayor densidad observada a lo largo del perfil que corresponde a 0.73 gr cm^{-3}.

3.1.3. Análisis de Isótopos y Especies Químicas

3.1.3.1. Perfiles de Profundidad de Isótopos y de las Especies Químicas

3.1.3.1.1. Isótopo δD (Deuterio)

El valor promedio y desviación estándar de δD del total de 51 muestras medidas desde la superficie hasta el fondo de este testigo corresponde a -68.92 ± 9.98 ‰. El perfil de δD se muestra en la figura 12 donde se observan fluctuaciones de este isótopo sobre los 5 m. Los valores mínimos se encuentran entre los 1.4-2.2 m y 4-5 m. Bajo los 5 m el perfil isotópico se observa completamente homogéneo, excepto por una leve fluctuación mínima entre 7.2-7.8 m.

3.1.3.1.2. Especies químicas

En los perfiles verticales de los constituyentes químicos (Fig. 12), se pueden observar fluctuaciones en los registros químicos. Los perfiles de Cl^- y Na^+ presentan un patrón de

fluctuaciones similar a simple vista, ambos poseen sus concentraciones máximas en las mismas dos capas entre los 2.2-2.4 m, con valores de 1175.74 ppb y 600.76 ppb, y entre los 7.4-7.6 m co valores de 1353.55 ppb y 669.21 ppb, respectivamente. El perfil Ca^{2+} indica dos capas con sus concentraciones máximas, la primera es superficial entre los 0-0.8 m con una concentración media de 477.46 ± 44.0 ppb y la segunda entre 7.4-7.6 m con una concentración de 710.92 ppb. El perfil de Mg^{2+} solo presenta un peak entre los 7.4-7.6 m con una concentración de 614.01 ppb, el resto del perfil se considera homogéneo y con bajas concentraciones. Los perfiles de K^{+} y SO_4^{2-} exhiben un patrón de fluctuaciones muy similar, ambos registran sus concentraciones máximas en 5 capas a la misma profundidad, sobreponiéndose entre 0.2-1.0 m, 1.8-2.4 m, 3.4-3.6 m, 7.4-7.6 m y 9.0-9.4 m. La concentración máxima de K^{+} es de 62.36 ppb entre los 0.4-0.6 m y la de SO_4^{2-} corresponde a 191.33 ppb entre los 0.2-0.4 m. El perfil de NO_3^{-} posee sus concentraciones máximas en la capa superficial de 0-1.0 m, bajo los 2.8 m las fluctuaciones se reducen en comparación a los otros perfiles y a las que se presentan en la capa superficial, pero aun así se pueden observar en este perfil 5 capas con un patrón de profundidad similar a los perfiles de K^{+} y SO_4^{2-}. El perfil de NH_4^{+} posee su mayor concentración en la superficie desde los 0-0.4 m. Bajo los 0.4 m las fluctuaciones son mínimas por lo tanto el perfil es considerado homogéneo.

La composición química analizada del testigo está dominada por los iones de Cl^{-}, Na^{+}, Ca^{2+} y NH_4^{+} en orden descendente de las medianas de las concentraciones, basadas en equivalentes (Tabla 2).

Tabla 2.- Mediana de las concentraciones de todas las muestras del testigo de neviza /hielo del glaciar de la cumbre del volcán Osorno.

Mediana μeq. L^{-1}	
Aniones	
Cl^-	5,50
SO_4^{2-}	0,65
NO_3^-	0,11
Cationes	
Na^+	5,01
Ca^{2+}	3,28
NH_4^+	1,11
Mg^{2+}	0,44
K^+	0,16

3.1.3.2. Correlación de Especies Químicas

Se realizó un análisis de correlación entre las 8 especies químicas, 5 cationes y 3 aniones. La matriz de resultados se presenta en la Tabla 3. Las concentraciones fueron transformadas en valores logarítmicos para calcular los coeficientes de correlación.

Se encontraron coeficientes de correlación (r) mayores a 0.8 en 6 sets y valores mayores a 0.7 en 7 sets.

Tabla 3.- Matriz de correlaciones de las concentraciones de iones principales en testigo de neviza /hielo de la cumbre del glaciar del volcán Osorno. Números en rojo indican sets con coeficientes de correlación mayores a 0.8 y números en color azul indican sets con coeficientes de correlación mayores a 0.7.

	Cl^-	$Na+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	SO_4^{2-}	NO_3^-
$Na+$	1,00						
Ca^{2+}	0,44	0,45					
Mg^{2+}	0,81	0,80	0,68				
K^+	0,62	0,64	0,73	0,74			
SO_4^{2-}	0,73	0,73	0,75	0,86	0,85		
NO_3^-	0,44	0,45	0,75	0,65	0,72	0,86	
NH_4^+	0,31	0,32	0,46	0,29	0,57	0,42	0,45

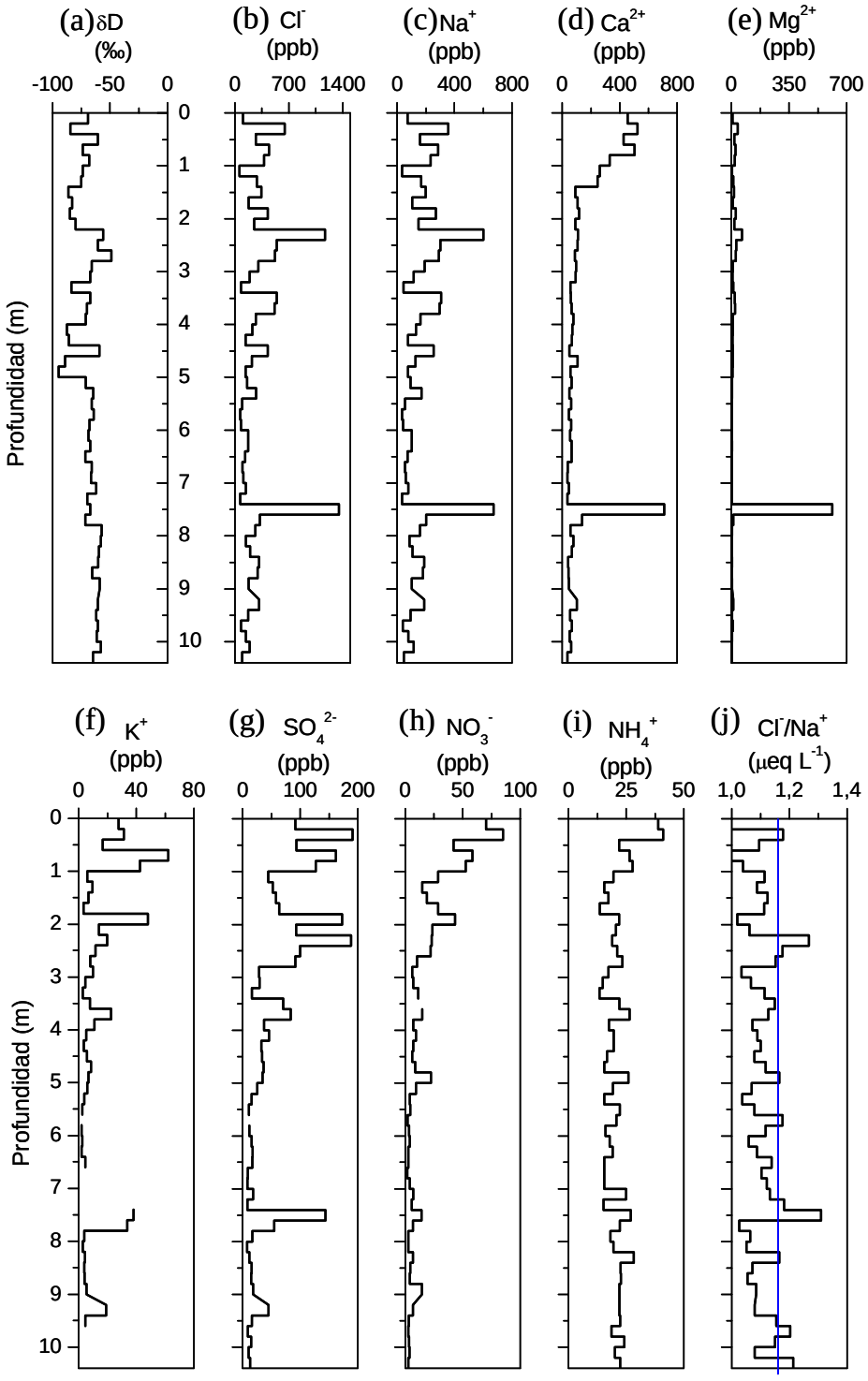

Fig. 12.- Perfiles verticales de **(a)** isótopo δD (‰) y especies químicas en ppb = μg L^{-1}, en el testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Osorno. **(b)** Cloro, **(c)** Sodio, **(d)** Calcio, **(e)** Magnesio, **(f)** Potasio, **(g)** Sulfato, **(h)** Nitrito, **(i)** Amonio y **(j)** Cl^-/Na^+ (μeq L^{-1}/ μeq L^{-1}). La línea azul indica la referencia marina de la proporción Cl^-/Na^+ de 1.16 μeq L^{-1} (Keene *et al.*, 1986).

3.2. TESTIGO DE NEVIZA/HIELO SOBRE EL GLACIAR DE LA CUMBRE DEL VOLCÁN MOCHO - CHOSHUENCO

3.2.1. Análisis Biológico

3.2.1.1. Microalgas

En este testigo se caracterizaron 22 morfotipos de microalgas de los cuales 21 corresponden a microalgas del Reino Protista, División Clorophyta (algas verdes) y un morfotipo pertenece al Reino Monera, División Cyanophyta (algas verde – azules) también conocidas como Cianobacterias (Tabla 4; Fig.14 y 15).

El perfil vertical de biovolumen algal indica cinco capas entre los 5.4- 5.6 m, 5.8-6.4 m, 6.8-7.4 m, 7.6-8.4 m, 8.6-9.2 m (Fig. 13). El biovolumen microalgal máximo en este perfil corresponde a 5.55×10^4 μm^3 mL^{-1}. Los morfotipos que presentan mayor biovolumen relativo corresponden a: N en la capa de 6.8-7.4 m representa un 67.8% del total, K en la capa de 5.8-6.2 m representa un 61.5% del total y el morfotipo FA en la capa de 8.6-9.2 m que representa un 56.7%. En este testigo el morfotipo que se excluyó en el perfil de biovolumen algal total, por tener tamaños menores de 5μm, corresponde a: A (2-5 μm) (Fig. 13).

3.2.1.2. Granos de Polen

El perfil de densidad de polen de Podocarpaceae (granos mL^{-1}), indica cuatro capas, desde los 0-1.4 m, 5.4-6.4 m, 6.8 – 7 m y de los 8.6-9 m. La concentración máxima en este perfil fue de 0.93 granos mL^{-1} (Fig. 16).

El perfil de densidad de polen de *Nothofagus spp.* (Granos mL^{-1}) indica cuatro capas de los 0 - 0.2 m, 5.4 - 5.6 m, 5.8 – 6 m y de los 9.4 - 9.6 m. La concentración máxima en este perfil fue de 0.41 granos mL^{-1} (Fig. 16).

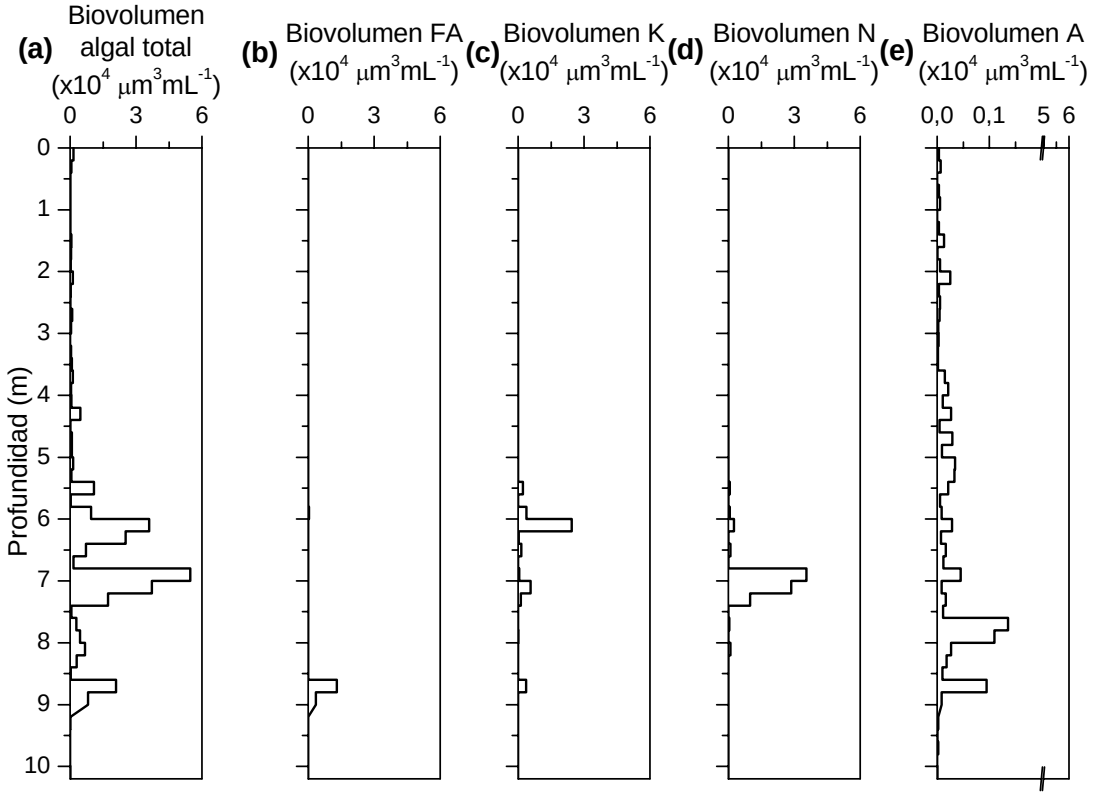

Fig. 13. - Perfiles verticales de biovolumen algal ($x10^4$ μm^3 mL^{-1}) del testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del Volcán Mocho – Choshuenco. **(a)** Biovolumen microalgas total, **(b)** biovolumen microalgas morfotipo FA, **(c)** biovolumen microalgas morfotipo K **(d)** biovolumen microalgas morfotipo N **(d)** biovolumen microalgas morfotipo A (< 5μm).

Tabla 4.- Características de los 22 morfotipos de microalgas en muestras del testigo neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Mocho - Choshuenco.

Morfotipos	Tamaño y Morfologia
Cianobacterias	
A	Célula esférica, incolora, diámetro de 2-5 µm.
Chlorophytas	
AE	Célula cilíndrica ápices redondeados, incolora, división central a lo ancho, 14 µm de largo y 5 µm de ancho. Solo se observó y cuantificó una célula en este testigo.
AF	Célula ovalada , incolora, cubierta gruesa, 9-12 µm de largo y 5-7 µm de ancho. Es 1,6 ± 0,16 veces más larga que ancha.
AG	Célula cilíndrica ápices redondeados, incolora,7-16 µm de largo, 5-10 µm de ancho. Es 1,7 ± 0,23 veces más larga que ancha.
B	Célula esférica, color verde tenue e incoloras, diámetro de 6-9 µm.
C	Célula ovalda un extremo aguzado, color café claro e incoloras, 10-15 µm de largo, 6-9 µm de ancho. Es 1,7 ± 0,28 veces más larga que ancha.
D	Célula cilíndrica ápices redondeados, incolora, 6-14 µm de largo, 2-5 µm de ancho. Es 2,4 ± 0,44 veces más larga que ancha.
E	Célula esférica, color verde tenue, diámetro de 10-13 µm
EA	Célula esférica, color verde tenue e incolora, diámetro de 14-17 µm
F	Célula fusiforme, incolora, 7-11 µm de largo, 4-7 µm de ancho. Es 1,7 ± 0,15 veces más larga que ancha.
FA	Célula fusiforme, incolora, 12-19 µm de largo, 8-11 µm de ancho. Es 1,6 ± 0,12 veces más larga que ancha.
G	Célula ovalada, color café claro,4-10 µm de largo, 4-7 µm de ancho. Es 1,5 ± 0,16 veces más larga que ancha.
H	Célula esférica, color café oscuro, diámetro de 6 -14 µm.
J	Célula cilíndrica alargada ápices redondeados, color verde tenue e incoloras, 12-20 µm de largo, 6-9 µm de ancho. Es 2,4 ± 0,23 veces más larga que ancha.
K	Célula esférica, incolora y otras verde tenue, diámetro de 5-8 µm
L	Célula esférica, color rojo, amarillo y anaranjado claro, diámetro de 18-25 µm
M	Célula ovalada, incolora, 15-21 µm de largo, 11-16 µm de ancho. Es 1,4 ± 0,07 veces más larga que ancha.
N	Célula ovalada eliptica, color verde tenue e incolora, 11-19 µm de largo, 7-12 µm de ancho. Es 1,5 ± 0,16 veces más larga que ancha.
Q	Célula cilíndrica ápices redondeados, incolora, 17-22 µm de largo, 6-11 µm de ancho. Es 2,23 ± 0,26 veces más larga que ancha.
R	Célula elíptica alargada, dividida a lo largo en dos, incolora,17 µm de largo, 6 µm de ancho. Solo se observó y cuantificó una célula en este testigo.
S	Célula fusiforme alargada,dividida a lo ancho en cuatro segmentos iguales, incolora, 11 µm de largo, 4µm de ancho. Solo se observó y cuantificó una célula en este testigo.
U	Célula elíptica un ápice aguzado, incolora, 15-19 µm de largo, 6-9 µm de ancho. Es 2,3 ± 0,26 veces más larga que ancha.

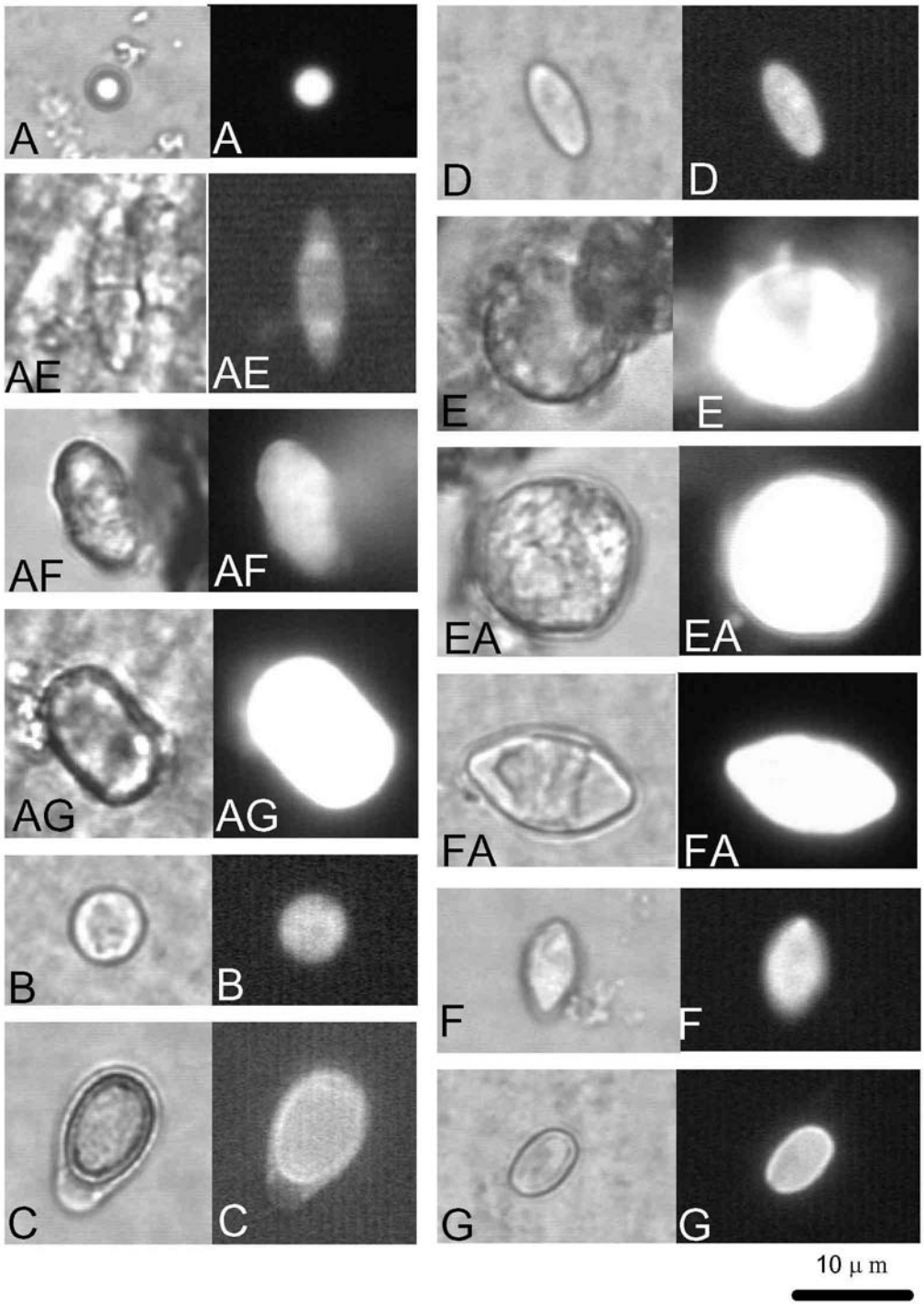

Fig. 14.- Morfotipos algales desde A hasta G, encontradas en el testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Mocho-Choshuenco. Para más detalles ver leyendas en Fig. 6.

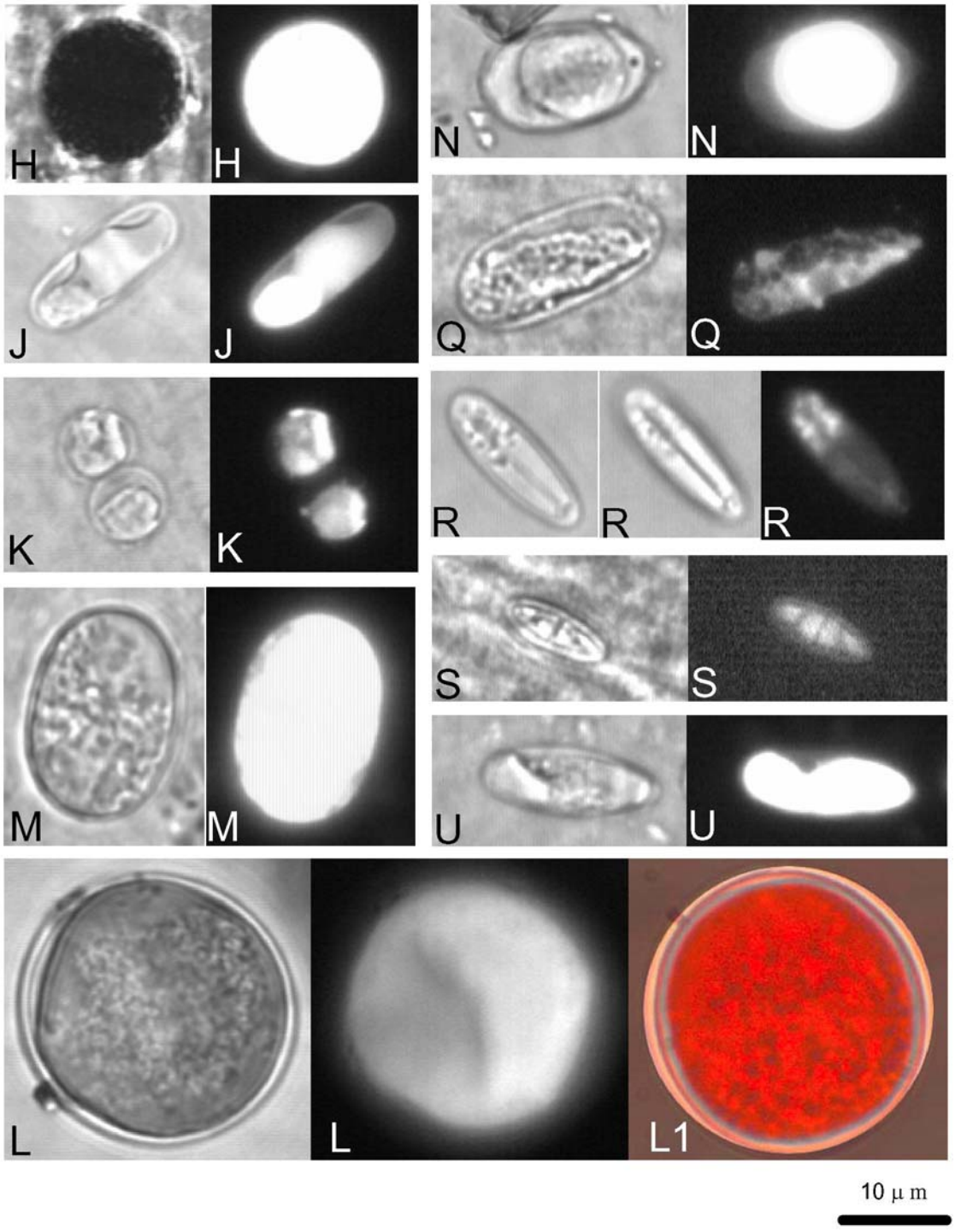

Fig. 15.- Morfotipos algales desde H hasta U, encontradas en el testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Mocho-Choshuenco. Fotografía L1 obtenida en campo claro con cámara a color. Para más detalles ver leyendas en Fig. 6.

3.2.1.3. Protozoo Tecameba

El perfil de abundancia (individuos mL^{-1}) nos indica cuatro capas con presencia de *Trinema spp*, las cuales corresponden a 5.2 – 5.6 m, 5.8 – 7.2 m, 7.6 – 8.4 m, 8.6 – 9 m. La densidad máxima de *Trinema spp* en este perfil es de 38 ind mL^{-1} (Fig. 16).

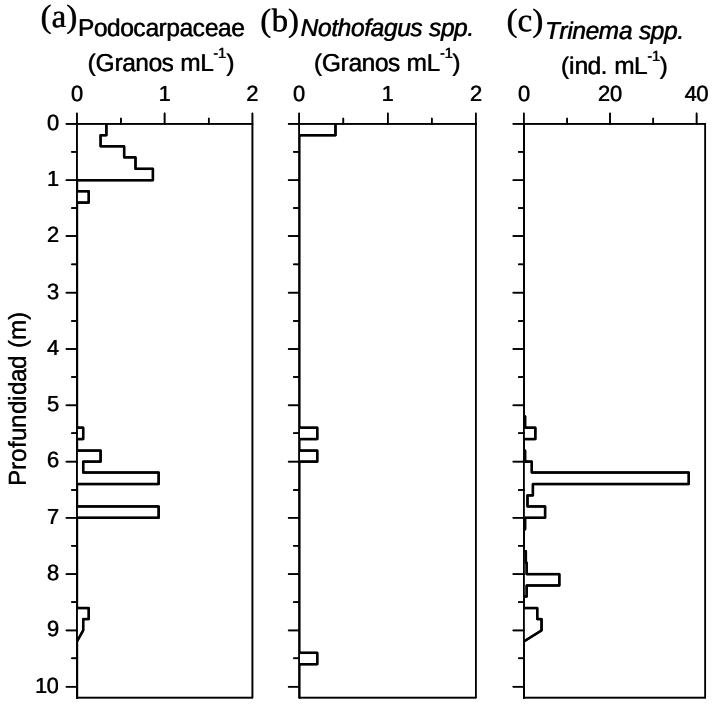

Fig. 16. - Perfiles verticales de polen del testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del Volcán Mocho – Choshuenco. **(a)** Densidad de Podocarpaceae (granos mL^{-1}), **(b)** densidad de *Nothofagus spp* (granos mL^{-1}) y **(c)** abundancia de *Trinema spp* (individuos mL^{-1})

3.2.2. <u>Análisis Físico</u>

3.2.2.1. Propiedades Físicas

En este caso las fluctuaciones de porcentaje de capa de hielo no superan el 45%, excepto en 2 capas donde los porcentajes son de 100% entre los 5.4-5.6 m y desde los 7.8 m hasta el final del testigo (Fig. 17 a).

La densidad incrementa con la profundidad logrando la transición neviza/hielo, que ocurre teóricamente a los 0.83gr cm^{-3} (Paterson, 1994), a los 9.8 m de profundidad (Fig. 17 b). Los 10.2

m de largo que posee este testigo, corresponden a una profundidad de 6.16 m equivalente en agua.

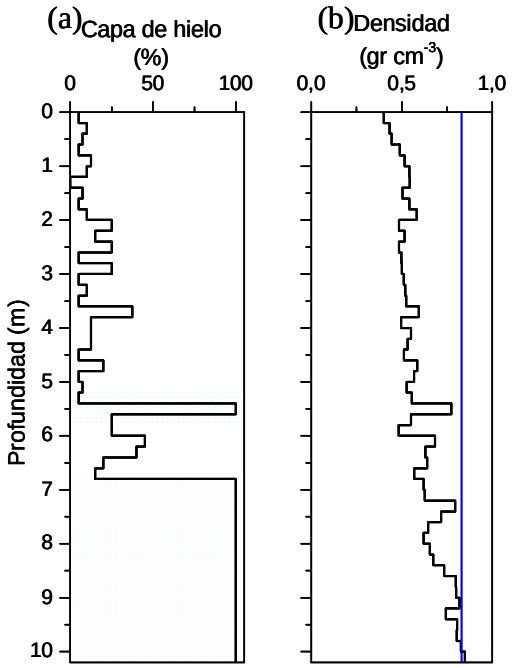

Fig. 17.- Perfiles verticales de características físicas en el testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Mocho - Choshuenco**. (a)** Porcentaje de capa de hielo, la **franja celeste** indica las profundidades en las cuales existe el porcentaje máximo de capa de hielo, que corresponde a 100%. **(b)** Densidad (gr cm^{-3}), la **franja violeta** indica la densidad máxima observada a lo largo del perfil que corresponde a 0.85 gr cm^{-3}, la línea azul es la referencia de la densidad a la cual se alcanza la transición neviza/hielo que corresponde a 0.83 gr cm^{-3} (Paterson, 1994)

3.2.3. Análisis de Isótopo y Especies Químicas

3.2.3.1. Perfiles de profundidad del Isótopo δD y Especies Químicas

3.2.3.1.1. Isótopo δD

El valor promedio y desviación estándar de δD de un total de 51 muestras en este testigo, corresponde a -73.71 ± 22.98 ‰ y la mediana a -65.77. El perfil de δD se muestra en la figura 18 donde se observan fluctuaciones claras del isótopo sobre los 6.0 m. Las capas que presentan los valores mínimos se encuentran entre los 2.4-2.6 m (-149.05 ‰), 3.2-3.6 m (media -122.11 ‰) y entre los 4.8-5.4 m (media -112.83 ‰). Bajo los 6.0 m el perfil no muestra fluctuaciones, observándose completamente homogéneo.

3.1.3.1.2. Especies Químicas

En los perfiles verticales de constituyentes químicos que se muestran en la figura 18, se pueden observan fluctuaciones en los registros químicos.

Los perfiles de Cl^- y Na^+ presentan un patrón de fluctuaciones similar. Ambos presentan sus mayores concentraciones en las mismas nueve capas entre los 0-0.2 m, 0.6-1.8 m, 3.6-4.8 m, 5.4-6.8 m, 7.6-8.2 m, 8.4-8.6 m y 8.8-9.2 m, excepto por un peak que se forma en el perfil de Na^+ que no se muestra en el perfil de Cl^- , que a su vez indica la concentración máxima registrada en este perfil que corresponde a 532.58 ppb entre los 7.4-7.6 m. En el caso del perfil de Cl^- la mayor concentración es de 816.05 ppb entre los 6.4-6.6 m. Los perfiles de Ca^{2+} y Mg^{2+} poseen patrones muy similares, ambos indican 6 capas con las mayores concentraciones entre los 4.0-4.2 m, 5.4-5.6 m, 6.2-6.8 m, 7.4-7.6 m, 8.4-8.6 m y 8.8-9.4 m, y en ambos perfiles la concentración más alta es de 799.6 ppb y 368.9 ppb, respectivamente, que se encuentra en el cuarto peak desde 7.4-7.6 m. El perfil K^+ presenta cinco capas con concentraciones altas entre los 0.8-1.0 m, 3.6-3.8 m, 5.4-6.0 m, 6.2-6.6 m y 7.4-7.6 m, de las cuales las tres últimas capas se sobreponen a los perfiles de especies químicas descritos anteriormente, con un valor de concentración máxima correspondiente a 108.75 ppb entre los 3.6-3.8 m. El perfil de SO_4^{2-} muestra cuatro amplias capas que poseen las concentraciones mayores entre 4.0-4.2 m, 5.0-6.0 m, 6.2-6.8 m y 8.4-9.4 m, con un valor de concentración máximo en la capa entre 6.2-6.8 m, correspondiente a 152.08 ppb. El perfil de NO_3^- posee cuatro capas con las máximas concentraciones que se encuentran entre 0-0.4 m, 2.2-2.6 m, 4.8-6.0 m y 8.4-8.8 m, y una concentración máxima en la superficie entre 0.2-0.4 m, que corresponde a 94.9 ppb. En el perfil de NH_4^+ las fluctuaciones son bastantes pequeñas, se observa mayor homogeneidad que en los perfiles anteriores, presentando solo dos

capas con concentraciones máximas, una en la superficie entre 0-0.4 m y otra entre los 7.4-7.6 m, siendo esta última la que posee una concentración máxima de 50.62 ppb.

La composición química analizada del testigo está dominada por los iones de Cl^-, Na^+, Ca^{2+} y NH_4^+, con las medianas de las concentraciones basadas en equivalentes en orden descendente, respectivamente. El orden de la composición de iones dominantes es igual a lo que ocurre en el testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del Volcán Osorno.

Tabla 5.- Mediana de las concentraciones de todas las muestras del testigo de neviza /hielo del glaciar de la cumbre del volcán Mocho-Choshuenco.

Mediana μeq. L^{-1}	
Aniones	
Cl^-	3,05
SO_4^{2-}	0,91
NO_3^-	0,24
Cationes	
Na+	3,03
Ca^{2+}	1,86
NH_4^+	1,06
Mg^{2+}	0,50
K^+	0,14

3.2.3.2. Correlación de Especies Químicas

Se realizó un análisis de correlación entre las 8 especies químicas, 5 cationes y 3 aniones. La matriz de resultados se presenta en la Tabla 6. Las concentraciones fueron transformadas en valores logarítmicos para calcular los coeficientes de correlación.

Se encontraron coeficientes de correlación (r) mayores a 0.8 en 3 sets y valores mayores a 0.7 en 4 sets.

Tabla 6.- Matriz de correlaciones de las concentraciones de iones principales en testigo de neviza/hielo de la cumbre del glaciar del volcán Mocho - Choshuenco. Para mas detalles ver Tabla 3.

	Cl^-	Na+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	SO_4^{2-}	NO_3^-
Na+	0,90						
Ca^{2+}	0,51	0,67					
Mg^{2+}	0,67	0,80	0,84				
K^+	0,62	0,79	0,58	0,56			
SO_4^{2-}	0,74	0,72	0,73	0,69	0,63		
NO_3^-	0,17	0,18	-0,06	-0,13	0,12	0,34	
NH_4^+	0,07	0,26	0,34	0,13	0,39	0,30	0,56

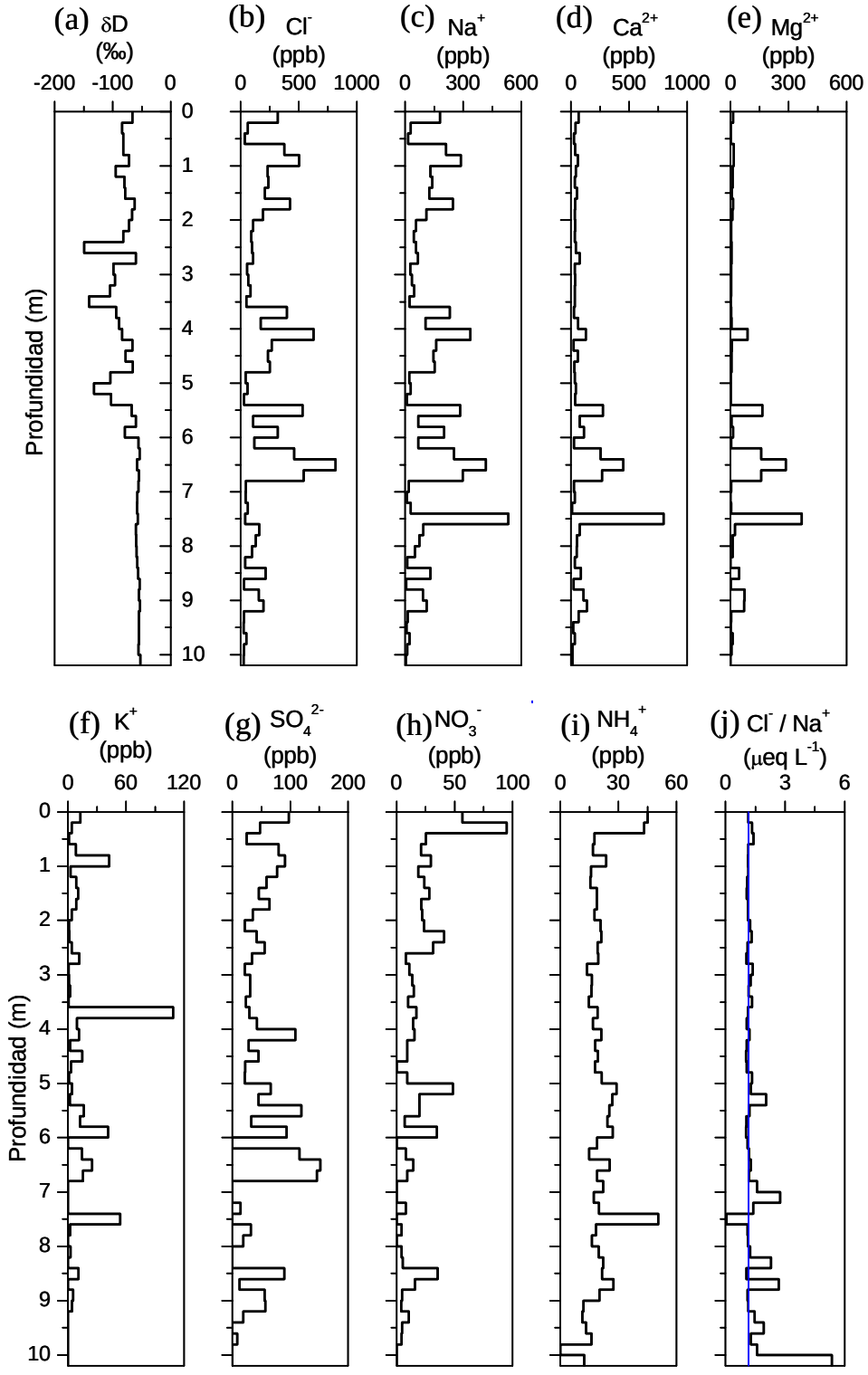

Fig. 18.- Perfiles verticales de **(a)** isótopo δD (‰) y especies químicas en ppb = μg L^{-1}, del testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Mocho - Choshuenco. **(b)** Cloro, **(c)** Sodio, **(d)** Calcio, **(e)** Magnesio, **(f)** Potasio, **(g)** Sulfato, **(h)** Nitrito, **(i)** Amonio y **(j)** Cl^- / Na^+ (μeq L^{-1} / μeq L^{-1}), la línea azul indica la referencia marina de la proporción Cl^- / Na^+ de 1.16 μeq L^{-1} (Keene, *et al.*, 1986).

3.3. TESTIGO DE NEVIZA / HIELO EN LA ESTACIÓN 18 DEL GLACIAR SURESTE DEL VOLCÁN MOCHO – CHOSHUENCO

3.3.1. Análisis Biológico

3.3.1.1. Microalgas

En este testigo se caracterizaron 17 morfotipos de microalgas de los cuales 16 corresponden a microalgas del Reino Protista, División Clorophyta (algas verdes) y un morfotipo pertenece al Reino Monera, División Cyanophyta (algas verde – azules) (Tabla 7; Fig. 20).

En el perfil vertical de biovolumen algal se puede observar una capa extensa, uniforme entre los 2.05 – 10.0 m con fluctuaciones mínimas, de las cuales resaltan dos capas que presentan biovolumenes máximos entre los 2.05 - 3.45 m y entre 8.65 - 9.05 m (Fig. 19a).

El máximo biovolumen microalgal en este perfil corresponde a 1.4×10^3 μm^3 mL^{-1}. Los morfotipos que presentan mayor biovolumen relativo corresponden a: A, este morfotipo no participa del perfil de biovolumen algal, aunque presente el mayor biovolumen algal, debido que las células son < 5 μm. En la capa de 9.65-10.05 m el morfotipo A representa un 84% del total de biovolumen. Otro morfotipo con mayor biovolumen relativo es EA que en la capa entre 2.65-2.85 m representa un 87% del biovolumen del total y en la capa 8.65-9.05 m representa un 79% del total.

En este testigo los morfotipos que no están incluidos en el perfil de biovolumen algal total, por tener tamaños menores de 5 μm, corresponden a: A (2-5 μm) y G (3-5 μm de ancho), sus perfiles se observan en la Fig. 19.

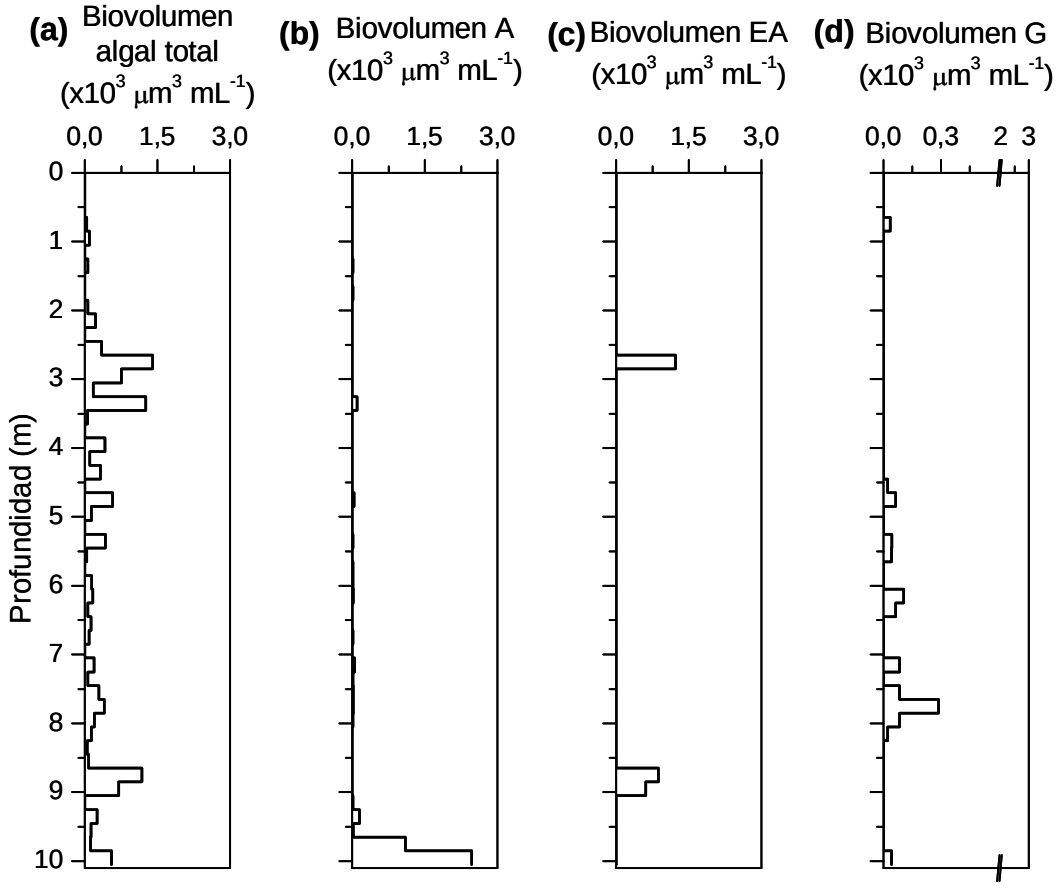

Fig. 19. - Perfiles verticales de biovolumen algal (x10^3 μm^3 mL^{-1}) del testigo de neviza/hielo en la estación 18 del glaciar Sureste del Volcán Mocho – Choshuenco. **(a)** Biovolumen algal total, **(b)** biovolumen microalgas morfotipo A (< 5 μm), **(c)** biovolumen microalgas morfotipo EA y **(d)** biovolumen microalgas morfotipo G (< 5 μm).

Tabla 7.- Características de los 17 morfotipos de microalgas en muestras del testigo de neviza/hielo en la estación 18 del glaciar Sureste del volcán Mocho - Choshuenco.

Morfotipos	Tamaño y Morfología
Cianobacterias	
A	Célula esférica, incolora, diámetro de 2-5 μm.
Chlorophytas	
AE	Célula cilíndrica ápices redondeados, incolora, división central a lo ancho, 13 μm de largo y 5 μm de ancho. Solo se observó y cuantificó una célula en este testigo.
AG	Célula cilíndrica ápices redondeados, incolora, 11 μm de largo, 7 μm de ancho. Solo se observó y cuantificó una célula en este testigo.
AK	Célula cilíndrica ápices aguzados y redondeados, incolora, cuatro divisiónes equidistantes a lo ancho, 20 μm de largo y 6-7 μm de ancho. Solo se observaron y cuantificaron dos células en este testigo.
AL	Célula cilíndrica ápices redondeados, un ápice aguzado, incolora, división central a lo ancho, 12 μm de largo y 6 μm de ancho. Solo se observó y cuantificó una célula en este testigo. Es 2 veces más larga que ancha.
B	Célula esférica, color verde tenue e incoloras, diámetro de 6-9 μm.
C	Célula ovalda un extremo aguzado, color café claro e incoloras, 8-14 μm de largo, 6-9 μm de ancho. Es 1,4 ± 0,16 veces más larga que ancha.
D	Célula cilíndrica ápices redondeados, incolora, 6-11 μm de largo, 3-6 μm de ancho. Es 2,3 ± 0,33 veces más larga que ancha.
E	Célula esférica, color verde tenue, diámetro de 10-13 μm
EA	Célula esférica, color verde tenue e incolora, diámetro de 14-17 μm
F	Célula fusiforme, incolora, 9-13 μm de largo, 6-8 μm de ancho. Es 1,7±0,13 veces más larga que ancha.
G	Célula ovalada, color café claro, 5-9 μm de largo, 3-7 μm de ancho. Es 1,5 ± 0,18 veces más larga que ancha.
H	Célula esférica, color café oscuro, diámetro de 7-12 μm.
I	Célula cilíndrica ápices redondeados, un ápice aguzado, incolora, división central a lo ancho, 18 μm de largo y 6 μm de ancho. Solo se observó y cuantificó una célula en este testigo. Es 3 veces más larga que ancha.
J	Célula cilíndrica alargada ápices redondeados, color verde tenue e incoloras, 13-14 μm de largo, 5-6 μm de ancho. Solo se observó y cuantificó dos células en este testigo.
L	Célula esférica, color rojo, amarillo y anaranjado claro, diámetro de 22 μm. Solo se observó y cuantificó una célula en este testigo.
N	Célula ovalada eliptica, color verde tenue e incolora, 13-14 μm de largo, 7-8 μm de ancho. Solo se observó y cuantificó dos células en este testigo.

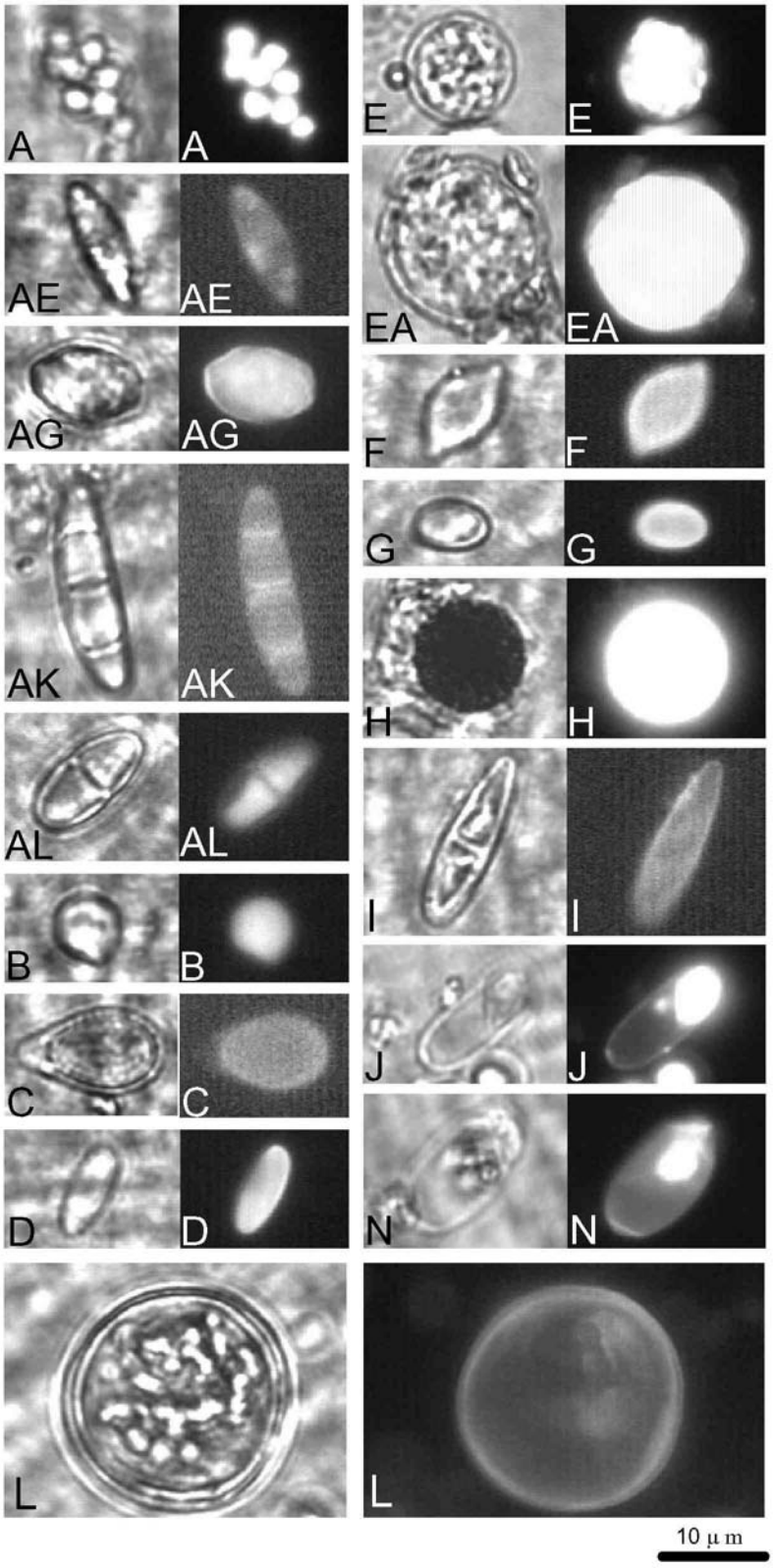

Fig. 20.- Morfotipos algales encontradas en el testigo de neviza/hielo en la estación 18 al sureste de la cumbre del volcán Mocho-Choshuenco. Para más detalle ver Fig. 6.

3.3.1.2. Granos de Polen

El perfil vertical de concentración de granos de polen (granos mL^{-1}) de la familia Podocarpaceae indica tres capas, la primera superficial y extensa que posee las concentraciones máximas de granos de polen y se distribuye desde los 0-2.85 m, en la cual resaltan cuatro peaks. Las capas siguientes poseen la misma concentración de 0.07 granos mL^{-1} y se distribuyen entre los 5.25-5.45 m y entre los 9.65-10.05 m (Fig. 21a). La máxima concentración de granos de polen de la familia Podocarpaceae corresponde a 1.8 granos mL^{-1}.

El perfil de concentración de granos de polen (granos mL^{-1}) del género *Nothofagus* indica cuatro capas estrechas de la misma concentración, la que corresponde a 0.2 granos mL^{-1}, que a su vez es la máxima concentración para este perfil y que se distribuyen entre los 0.65-0.85 m, 6.25-6.45 m, 8.85-9.05 m y entre los 9.45-9.65 m (Fig. 21b).

3.3.1.3. Protozoo Tecameba

El perfil de abundancia (individuos mL^{-1}) nos indica tres capas con presencia de *Trinema spp*, entre los 8.25 – 8.45 m, 8.85 – 9.05 m y entre los 9.65 – 9.85 m (Fig. 21c). La máxima densidad de *Trinema spp* en este perfil es de 1.6 Ind. mL^{-1} .

3.3.1.4. Otros Microorganismos

En este testigo se encontró, al momento de revisar el filtro, un copépodo entre los 8.25 - 8.45 m y dos nauplius (estado larval de copépodo) entre los 9.25-9.45 m, de los cuales también se elaboró un perfil vertical aunque son los únicos encontrados entre todas las muestras (Fig. 21d y e). La identificación taxonómica resulta muy compleja, ya que los individuos se encuentran fijados y aplastados.

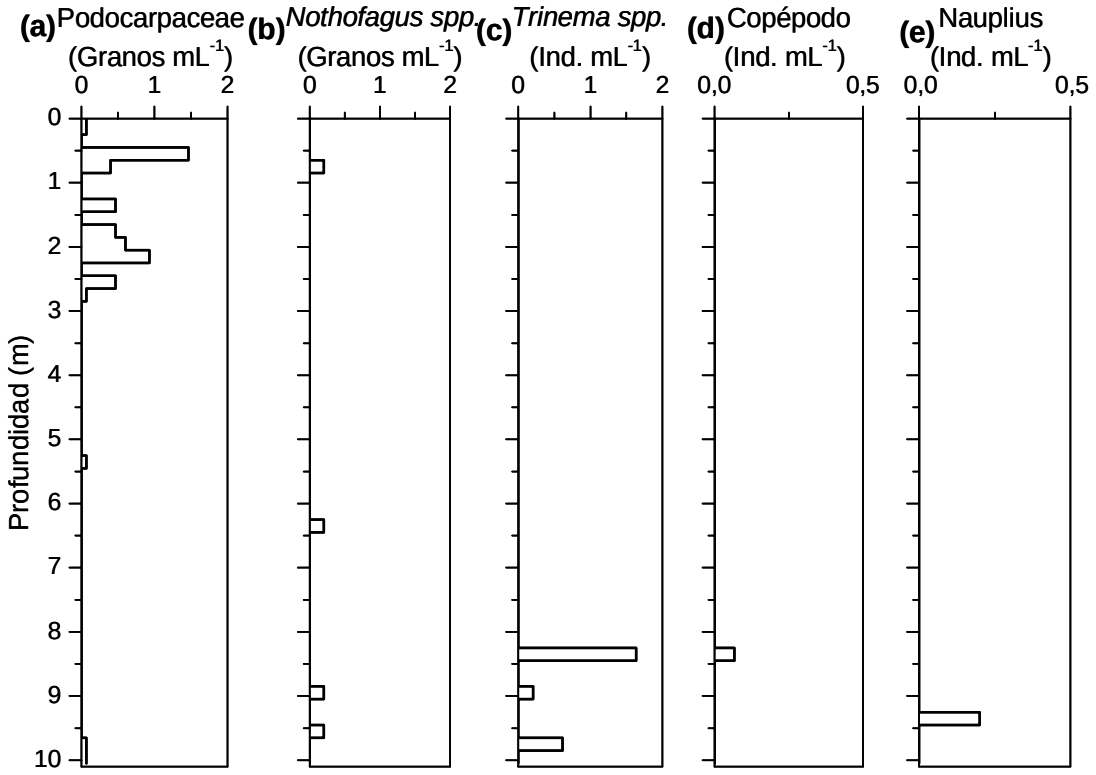

Fig. 21. - Perfiles verticales de polen y microorganismos del testigo de neviza/hielo en la estación 18 del glaciar sureste del Volcán Mocho – Choshuenco. **(a)** Densidad de Podocarpaceae (Granos mL^{-1}), **(b)** densidad de *Nothofagus spp* (Granos mL^{-1}), **(c)** abundancia de *Trinema spp* (Individuos mL^{-1}), **(d)** abundancia de Copépodos (Individuos mL^{-1}) y **(e)** abundancia de nauplius (Individuos mL^{-1})

3.3.2. <u>Análisis Físico</u>

3.3.2.1. Propiedades Físicas

Desde la superficie hasta los 8.45 m las capas de hielo presentan bajos porcentajes < 30 %. Bajo los 8.45 m hasta el final del testigo (10.05 m) existe un capa extensa y uniforme de 100% de hielo (Fig. 22a). Durante la estratigrafía visual, perforación y obtención del testigo se observó que esta última capa de hielo se encontraba saturada de agua, denominado en inglés *water soaked ice*.

La densidad incrementa con la profundidad logrando la transición neviza/hielo, que ocurre teóricamente a los 0.83gr cm^{-3} (Paterson, 1994), a los 8.45 m de profundidad (Fig. 22b). Los 10.05 m de largo que posee este testigo corresponden a 6.00 m equivalente de agua.

3.3.3. Análisis de Isótopo

3.3.3.1. Perfil de profundidad del Isótopo δD

El valor promedio, desviación estándar y mediana de δD de un total de 50 muestras de este testigo, corresponde a -76.0 ± 17.0 ‰ y 73.1‰, respectivamente (Fig. 22c). El perfil de δD señala fluctuaciones claras del isótopo a profundidades menores de 8.25 m, presentando los valores mínimos entre los 4.45-5.45 m con una media que corresponde a -113.3 ‰ y el valor minino a -129.67 ‰. Bajo los 8.25 m el perfil es completamente homogéneo, no se observan fluctuaciones.

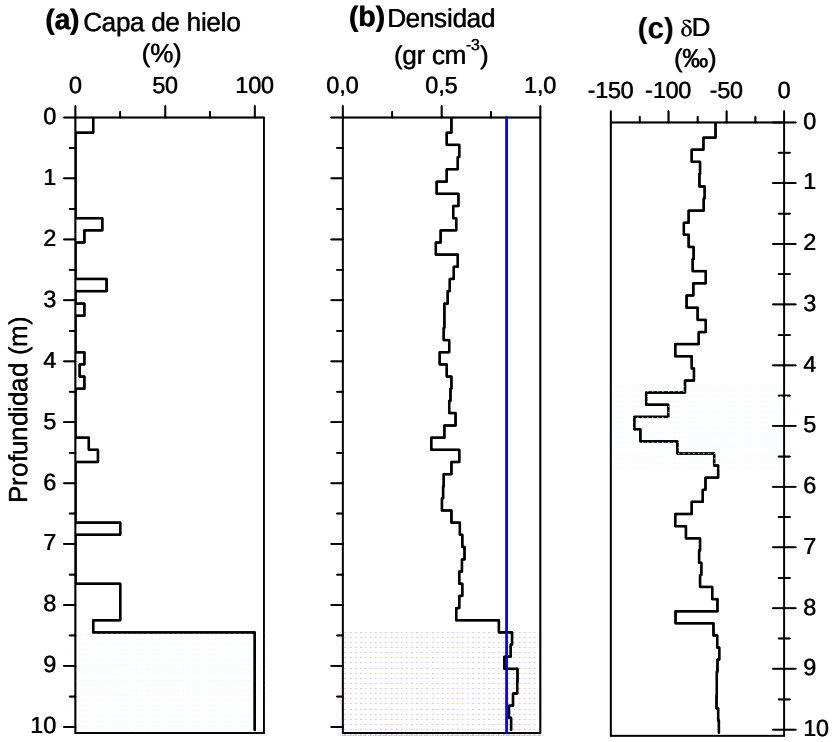

Fig. 21.- Perfiles verticales de las características físicas en el testigo de neviza/hielo en la estación 18 del glaciar Sureste del Volcán Mocho – Choshuenco. **(a)** Porcentaje de capa de hielo, la **franja celeste** indica profundidades en las cuales existe el mayor porcentaje de capa de hielo, que corresponde a 100%, **(b)** Densidad (gr cm^{-3}), la **franja violeta** indica la mayor densidad observada a lo largo del perfil que corresponde a 0.88 gr cm^{-3}, la **línea azul** es la referencia de la densidad a la cual se alcanza la transición neviza/hielo que corresponde a 0.83 gr cm^{-3}. **(c)** Perfil vertical del isótopo δD (‰), la **franja celeste** indica la capa con valores mínimos de deuterio.

Capítulo 4

DISCUSIÓN

4.1. REVISION BIBLIOGRAFICA PARA LA INTERPRETACIÓN DE TESTIGOS

4.1.1 Resolución Estacional a través de la Interpretación Biológica

Yoshimura *et al.* (1997, 2000) y Kohshima *et al.* (2006) señalan que las capas de microalgas, dentro de los testigos, indican la estación de verano (Diciembre a Marzo), que corresponde a la estación de derretimiento en la cual las microalgas proliferan y habitan en la superficie debido a que sus requerimientos, que consisten en luz para realizar fotosíntesis, agua y nutrientes disueltos disponibles, son óptimos. Por lo tanto a partir de lo señalado anteriormente cada capa de biovolumen algal registrada en los testigos debiera indicar la estación de derretimiento. Como las capas se van agregando al glaciar desde la superficie cada año, las capas profundas corresponden a las más antiguas y las superficiales a las más nuevas.

En general la dispersión de las especies de polen cuantificadas en este trabajo ocurre entre primavera y verano. Y se ha registrado que al aumentar la altitud (sobre 800 m.s.n.m) y latitud este período se retrasa acercándose a la estación de verano. Los estudios publicados que describen aspectos fenológicos de las especies de árboles chilenos de nuestro interés son muy escasos, y solo podemos concluir que la floración de las especies de polen cuantificado en este estudio ocurre en el último trimestre del año, vale decir primavera-verano (comunicación personal Dr. Patricio Moreno). Efectivamente, los escasos estudios encontrados revelan que la floración del género *Nothofagus* depende de cada especie y que ocurre entre primavera-verano (Riveros *et al.*, 2003). La identificación en este trabajo se limitó al género debido a la baja concentración en el perfil, lo cual no nos permite separar granos de polen por especie. Por consiguiente las capas dentro del perfil de concentración de granos de polen indican las

estaciones de primavera y verano. Sin embargo, no sería confiable admitir que las capas que no posean polen correspondan al período otoño-invierno, debido a la baja concentración de estos. Para poder interpretar que las capas con ausencia de polen corresponden a las estaciones sin floración es necesario que datos adicionales a partir de otro parámetro corrobore esta situación. Para aumentar la confiabilidad de este registro será necesario filtrar más mililitros de la muestra, ya que la probabilidad de cuantificar granos de polen en el filtro aumentará, de lo contrario puede suceder que estemos perdiendo información. En consecuencia la presencia de capas de polen sólo nos permitirá aceptar que corresponden al período primavera-verano. Para mejorar la interpretación de los perfiles de polen es necesario obtener una cantidad de granos de polen más cercano a la realidad y por ende disminuir el error. Se sugiere realizar una estimación superficial de la concentración de polen durante la estación de floración en los sitios de estudio, y también detectar el tipo de distribución o variación espacio-temporal del polen sobre la superficie del glaciar, ya que si la variación existiese estos perfiles serían poco útiles como registros anuales y/o estacionales (Reese *et al.*, 2003; Reese y Liu, 2005).

En los tres testigos se observó y cuantificó un género de protozoos el cual será utilizado como otra herramienta para la interpretación biológica. Primero, se confirmó que estos protozoos habitan sobre el glaciar, observándose que los individuos presentes en las muestras se encontraban con alimento, sin digerir, en su interior. Asmimismo se detectó que se estaban reproduciendo por fusión sexual (Fig. 9e1 y e2). Se sabe que el género al cual pertenecen forma parte del grupo de los Tecamebianos, también conocidos como Tecameba, que son un grupo artificial polifilético de organismos unicelulares provistos de una teca o testa rígida y de pseudópodos de naturaleza variable. Este genero se encuentran dentro del subphylum Sacordina Schmarda, 1871, que incluye órdenes como Arcellinida Kent 1880, y Gromida Claparède y

Lachmann, 1859, con parte del suborden Allogromiina Loeblich y Tappan 1961, y del orden Foraminiferida Eichwald, 1830 (Patterson y Kumar, 2002).

En las Tecamebas en general hay una gran variabilidad morfométrica, siendo más variable en tamaño las Tecamebas de la Subclase Filosea, a la cual pertenece el género *Trinema*. En lo particular *T. lineare* presenta grandes coeficientes de variación en el diámetro de la abertura y en menor grado para la longitud de la concha (Bobrov y Mazei, 2004). A su vez existe confusión taxonómica por la proliferación de especies descritas más de una vez (Patterson y Kumar, 2002) y en Chile el conocimiento de este grupo se mantiene en un estado muy incipiente (Zapata, 2006). Por lo cual para esta tesis no se realizo la identificación de protozoos hasta el nivel de especie, ya que esto requiere un trabajo minucioso y detallado que escapa de los objetivos planteados. Más aun, dicha falta de información no parece ser relevante para la utilización de este género como herramienta de datación de los testigos.

Los individuos pertenecientes al género *Trinema* son cosmopolitas, habitan en agua dulce (lagos, ríos estanques, charcos). Otros son semiterrestres, encontrándose en el musgo, líquenes, suelo húmedo y en marismas (Kudo, 1969; Decloitre, 1981). Se han registrado grandes abundancia relativas del género *Trinema* en el Ártico en hábitat acuáticos, musgos y líquenes (Beyens *et al.*, 1986; Trappeniers *et al.*, 1999; Matheeussen *et al.*, 2005) y en muestras de la Sub Antártica en hábitat acuáticos (Beyens *et al.*, 1995; Vincke *et al.*, 2004b), de suelo y musgo (Vincke *et al* 2004a; 2004c). Vincke *et al.* (2004c) indican que es una de las taxas mejor adaptadas al medio ambiente sub-Antártico.

Beyens *et al.* (1986) indican que las asociaciones de *T. lineare* prefieren condiciones de mayor humedad y que a su vez estas asociaciones están mejor adaptadas al incrementar la continentalidad. Patterson y Kumar (2002) y Vincke *et al.* (2004), indican que el factor que juega

un rol clave en determinar la distribución de las comunidades de Tecamebas es la humedad, mientras que el pH corresponde al factor secundario. Bobrov *et al.* (2004) utilizan los depósitos de Tecamebas como bioindicadores del Cuaternario, en donde los periodos extremadamente secos y fríos (Pleistoceno) están caracterizados por baja densidad y baja diversidad de especies de Tecamebas. De las tres especies del género *Trinema* encontradas en el estudio de Bobrov *et al.* (2004), dos de ellas no se encuentran en los períodos glaciales y la que sí está presente posee una muy baja frecuencia, al contrario de lo que ocurre en los periodos cálidos y húmedos. Bérzins y Stensdotter (1990) registran especies del género *Trinema* sobre troncos, ramas y hojas de árboles. Todo lo cual nos indica las posibilidades de sobrevivir que posee *Trinema spp* a las condiciones medioambientales que presenta la superficie glaciar y a su vez nos permite hipotetizar que estos microorganismos provienen de zonas cálidas y húmedas de los sectores bajos circundantes al glaciar, y son transportados hasta el glaciar por circulación atmosférica.

La literatura consultada sugiere que este trabajo corresponde a la primera observación del género *Trinema* y en general de Tecamebas habitando sobre glaciares, lo cual es confirmado por los tres testigos estudiados.

Proponemos que *Trinema spp* también habitará durante la estación de derretimiento sobre el glaciar (Diciembre a Marzo), y por lo tanto será otra herramienta para identificar la estación de verano, debido a sus requerimientos de humedad y alimentación. Esta propuesta es corroborada en los tres testigos, ya que al sobreponer los perfiles de profundidad con los perfiles de biovolumen algal se observa que las capas de *Trinema spp* se encuentran dentro del período de verano señalado por el biovolumen algal, aumentando la confianza de la estacionalidad obtenida por este último. A su vez la presencia de este protozoo reafirma que el límite superior de las capas de microalgas se utilice como límite para la estimación del balance de masa, pero no el

limite inferior ya que este se puede ver afectado por la ingesta de microalgas realizada por *Trinema spp*.

4.1.2 Interpretación de Propiedades Físicas

En las zonas de percolación de glaciares o capas de hielo sub-polares, el agua que se produce por el derretimiento superficial de la nieve penetra a las capas adyacentes y se recongela formando capas y/o lentes de hielo de patrones irregulares. La cantidad de derretimiento que se produce durante el verano depende del promedio de temperatura o quizá de las máximas observadas. La variación con la profundidad del porcentaje de hielo formado por la percolación provee un registro de las variaciones pasadas de las estaciones de verano (Paterson, 1994). Las capas de hielo con máximos porcentajes usualmente se forman en verano percolando a una cierta profundidad del glaciar, pero cuando hay una fuerte percolación en un sitio, es posible que las capas de hielo indiquen las capas de invierno y no las de verano. El motivo es que normalmente el agua que percola se recongela justo bajo la superficie, pero con fuerte percolación es viable que se recongelen mucho más profundamente, alcanzando las capas de invierno (Shiraiwa *et al*. 2002). Por lo tanto utilizaremos la presencia de capas de hielo como un indicador de percolación y recongelación.

4.1.3 Interpretación Isótopo e Iones Químicos

4.1.3.1 Variación Estacional δD

En los testigos de hielo, para cuantificar las capas anuales y estimar temperaturas pasadas, se utiliza habitualmente la variación estacional de los registros isotópicos, considerándose una herramienta moderna para la reconstrucción del paleoclima. Las variaciones y fluctuaciones de

los isótopos en un testigo con la profundidad, puede ser interpretado como las variaciones de temperatura en el pasado. El uso cuantitativo de δD corresponde a un *proxy* de la temperatura del aire en el momento de condensación, cuando se forma la precipitación, marca que al depositarse queda preservada en el glaciar y obtenida luego como registro en los testigos (Thompson *et al.,* 2003) Teniendo conocimiento que en los glaciares temperados de latitudes medias y altitud baja, al que corresponden todos los sitios perforados en este estudio, los signos de las variaciones estacionales de isótopos sufren una fuerte destrucción debido a la percolación del agua que se produce en la superficie producto del derretimiento (Schwikowski *et al.,* 1999 a; Eichler *et al.,* 2001), lo más probable es que parte de los registros del contenido isotópico en los tres testigos esté destruido. Por lo tanto, aunque perdamos información importante en cuanto a estacionalidad y estimación de temperaturas, los registros de este perfil nos servirán como herramienta, el cual señalará las profundidades afectadas por la percolación.

4.1.3.2. Variación Estacional de Especies Químicas

El estudio glacioquímico en las latitudes medias promete contribuir significativamente al entendimiento de los ciclos atmosféricos (Thompson *et al*., 1997), particularmente a través de especies químicas de corta vida del orden de días. Tales especies no están distribuidas uniformemente en la atmósfera, presentando altas concentraciones cercanas a sus fuentes de emisión y/u origen (Schwikowski *et al.,* 1999b). Para analizar si las especies químicas poseen tendencias de estacionalidad los perfiles de estas especies se sobreponen usualmente a perfiles del mismo testigo, que se encuentren datados a través del conteo de capas anuales u horizontes. Usualmente la estimación de la datación anual se obtiene a través del conteo de capas mediante estratigrafía (propiedades físicas), los signos de variación estacional de isótopos $\delta^{18}O$ y δ D, la

concentración activa de tritio producto de la prueba de armas nucleares en 1963/1964, el radioisótopo ^{210}Pb, horizontes conocidos de erupciones volcánicas que se caracterizan por las concentraciones de sulfato y calcio (de sitios cercanos a los testigos), los eventos de polvo de zonas continentales como por ejemplo el Sahara, determinados por ejemplo a partir de la identificación de capas amarillas con altos contenidos de calcio (Schotterer *et al.*, 1997; Schwikowski *et al*., 1999 a, b; Eichler *et al.*, 2000; Ginot *et al.*, 2002 a,b; Watanabe *et al.*, 2003; Oliver *et al.*, 2003; Eichler *et al.*, 2004). En otros casos se cuantifica la variación estacional de las especies químicas en la superficie del sitio que será perforado en forma mensual, lo cual sirve como referencia para interpretar luego el testigo (Watanabe *et al.*, 2003).

Debido a que la variación estacional del δD en nuestros testigos fue destruida por la percolación, se utilizó para comprobar la tendencia estacional de las especies químicas, y las capas anuales y estacionales estimadas a partir del análisis biológico. Aunque se tiende a pensar que si ha percolado el isótopo deberían por lo tanto percolar las especies químicas, Eichler *et al*. (200l) indica que las especies químicas de su estudio corroborado con otros estudios de laboratorio, son eluidas con diferente eficiencia. Ello se debe a los procesos que ocurren durante la metamorfosis de la nieve, combinado con las distintas solubilidades de las especies químicas en el hielo, que determinan su posición en el grano de nieve/neviza. Los iones que se incorporan relativamente más en la estructura del hielo, lo que es consecuencia de su alta solubilidad, se comportan relativamente inmóviles ante la percolación de la nieve derretida. Concluyendo que son necesarios estudios para el mejor entendimiento de estos procesos de modo de cuantificar la solubilidad de las especies químicas, y poder explicar las secuencias de elución (extracción de una sustancia absorbida desde un lecho poroso) con más detalle. Barnes *et al*., (2003) evidencia que ocurren movimientos de difusión post-depositación en el sulfato y cloro pero no en sodio.

Los dos mecanismos que explican la efectividad de la difusión están dirigidos indirectamente por la tasa de crecimiento del grano, lo cual podría estar sucediendo en otros testigos. Ginot *et al*., (2001) señala que las condiciones meteorológicas del trópico y subtrópico sugieren que los registros glacioquímicos pueden estar afectados por fenómenos de post-depositación tales como la sublimación y la depositación en seco, e indica que hay especies químicas que se depositan irreversiblemente ante la sublimación. Lo señalado por Ginot *et al.,* (2001) no correspondería a lo que sucede en los sitios que se analizan en este estudio, ya que no se presentan las condiciones meteorológicas señaladas. Pero este y los otros ejemplos anteriores exponen que extraer las señales de estacionalidad en las especies químicas puede ser una labor compleja, especialmente considerando que las señales pueden ser mezcladas por el agua que percola desde la superficie durante la estación de derretimiento.

La importancia de estos registros, además de su potencialidad como herramienta para corroborar el análisis biológico, es que corresponden a los primeros grupos de datos glacioquímicos para estos lugares, proveyendo de información para el entendimiento de los procesos de transporte atmosférico, y la depositación de especies químicas, entre otros.

El análisis de correlaciones sobre la concentración de los datos de las especies químicas son utilizados habitualmente para identificar las principales fuentes de origen de éstas, realizando una suposición general que indica que las especies que muestran altas correlaciones poseen una misma fuente o han sido transportadas por la misma masa de aire (Schwikowski *et al*., 1999b; Watanabe *et al.,* 2003; Olivier *et al.,* 2003 Eichler *et al.,* 2004).

Las especies químicas poseen las siguientes fuentes de origen. En el caso de NH_4^+, NO_3^- y SO_4^{2-} sus precursores gaseosos corresponden a NH_3, NO_x y SO_2 los que son emitidos a la atmósfera primariamente por medios antropogénicos como son la agricultura, los vehículos

motorizados y la quema de combustibles fósiles, respectivamente (Finlayson-Pitts y Pitts, 2000 citado en Eichler *et al.,* 2004; Schwikowski *et al*., 1999 a). En los testigos de hielo, el cloro y el sodio son frecuentemente atribuidos al rocío de sal marina, lo cual se corrobora con las altas correlaciones que deben presentar estas dos especies. Y asimismo con la cercanía a la referencia marina de la proporción Cl^- ($\mu eq\ L^{-1}$)/Na^+ ($\mu eq\ L^{-1}$), que corresponde a 1.16 (Keene *et al.,* 1986 citado en Schwikowski *et al*., 1999b, en Shiraiwa *et al.,* 2002 y en Olivier *et al.,* 2003). Esta proporción (Cl^-/Na^+) también nos sirve para observar percolación ya que podría ser eluida debido a la presencia de agua de derretimiento (Davies *et al.,* 1981, citado en Shiraiwa *et al.,* 2002). Se indica que las fuentes de origen del Ca^{2+}, K^+ y Mg^{2+} son del tipo natural, caracterizadas principalmente por partículas de polvo de origen volcánico o de desiertos que se ubican alrededor de los sitios (Schwikowski *et al*., 1999 a, b; Ginot *et al.,* 2002; Watanabe *et al.,* 2003; Olivier *et al.,* 2003; Eichler *et al.,* 2004).

4.2. INTERPRETACIÓN DEL TESTIGO DE NEVIZA/ HIELO DEL GLACIAR DE LA CUMBRE DEL VOLCÁN OSORNO.

4.2.1 Resolución Estacional y Datación a través del Análisis Biológico

Al sobreponer los cuatro perfiles biológicos de este testigo (Fig. 23), podemos interpretar que las dos capas de microalgas (entre los 5.6 – 7.2 m y los 8.2 – 10 m) que representan la estación de derretimiento se sobreponen al perfil de *Trinema spp*, lo cual nos permite establecer con mayor confianza que estas capas corresponden al período anteriormente señalado.

Dentro del primer metro el perfil de polen de *Nothofagus spp* posee una capa de mayor extensión y que comienza antes que en el perfil de polen de la familia Podocarpaceae (Fig. 23 b y c). Por la fecha de obtención del testigo (1º de noviembre del 2005), se sugiere que ambas capas superficiales corresponderían al periodo de floración para ambos tipos de polen. La capa superficial datada por los dos tipos de polen no poseen microalgas y por tanto da cuenta que al momento de la extracción del testigo, las microalgas aún no tienen las condiciones necesarias para habitar en la superficie del glaciar, de acuerdo con lo señalado por Yoshimura *et al.* (1997; 2000), el que indica que el crecimiento microalgal comienza a inicios del verano.

El perfil de concentración de granos de polen de la familia Podocarpaceae muestra una pequeña capa (entre los 10,2 y 10,4 m) indicando dispersión en el periodo de floración (primavera-verano) a esta profundidad. Esta capa se sobrepone al inicio de la capa de microalgas más antigua registrada en este testigo.

El análisis biológico nos sugiere que es posible obtener una datación de nivel estacional e interanual del testigo de neviza/hielo obtenido en el glaciar de la cumbre del volcán Osorno, ya que los perfiles verticales de biovolumen microalgal, abundancia de *Trinema spp* y concentración de polen (Fig. 23) se encuentran claramente preservados y relacionados.

4.2.1.1 Estimación de Balance de Masa basado en Interpretación Biológica

En el perfil de biovolumen algal se reconocen dos límites superiores de capas algales que corresponden al término de la estación de derretimiento y al comienzo de la estación de otoño. Los perfiles biológicos nos entregan una datación de resolución anual y estacional, la cual nos permite estimar el balance de masa de este sitio:

- Balance de masa neto desde el otoño 2004 hasta el otoño 2005 que corresponde a **1,51** m equivalente en agua (Fig. 24).
- Balance de masa de invierno para el año 2005, el cual considera la acumulación de nieve del período otoño-primavera, correspondiente a **2,4** m equivalente en agua (Fig. 24).

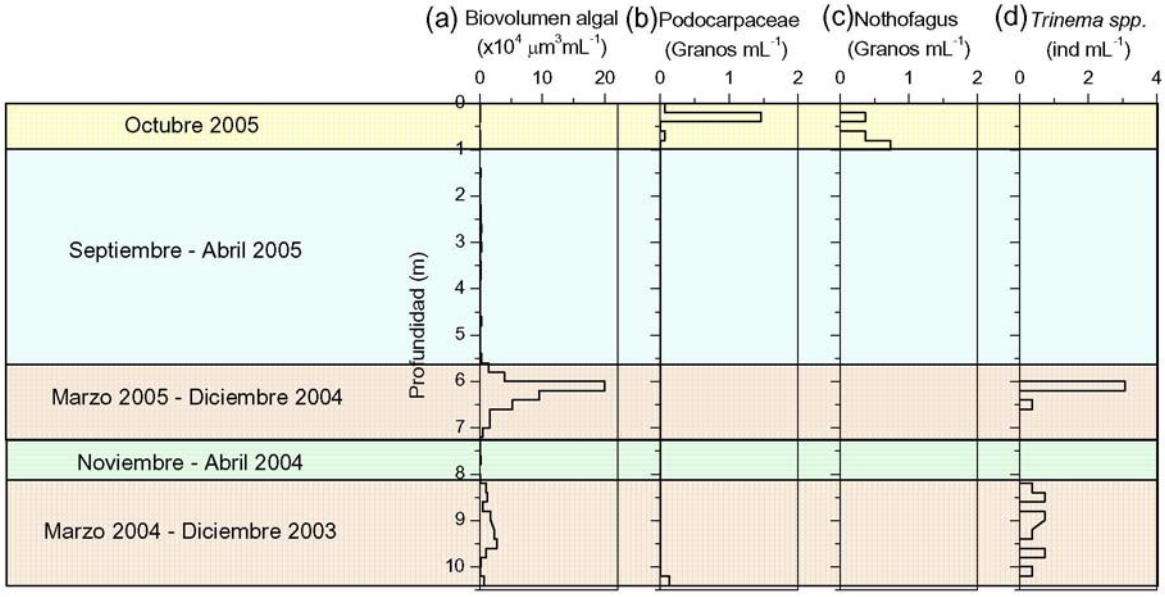

Fig. 23.- Perfiles verticales de microorganismos y polen en el testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Osorno**. (a)** Biovolumen algal (x10^4 µm^3 mL^{-1}), **(b)** concentración granos de polen de la familia Podocarpaceae (granos mL^{-1}), **(c)** concentración granos de polen de *Nothofagus spp* (granos mL^{-1}), **(d)** abundancia de *Trinema spp* (individuos mL^{-1}). La **Franja amarilla** representa comienzos de primavera indicado por período de floración (primavera-verano), estimado por presencia de polen. La **Franja celeste** representa período sin crecimiento de microorganismos y sin presencia de granos de polen cuantificados (otoño-invierno), estimado a partir de ausencia de microorganismos y polen en cada perfil. La **Franja naranja** indica período de crecimiento algal y de *Trinema spp* (verano desde diciembre-marzo) estimado por presencia de capas de biovolumen algal y perfil de *Trinema spp*. La **Franja verde** representa el período sin crecimiento de microorganismos y sin presencia de granos de polen cuantificados (otoño, invierno hasta Noviembre), entre dos capas de crecimiento de microorganismos.

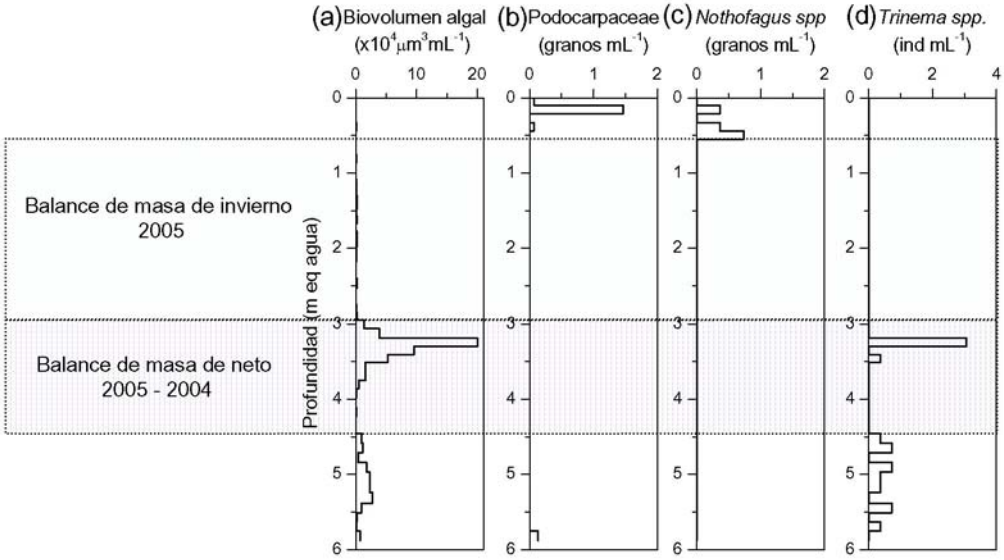

Fig. 24.- Perfiles verticales de profundidad en metros equivalente de agua (m eq. agua) de microorganismos y polen en el testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Osorno**. (a)** Biovolumen algal ($x10^4$ μm^3 mL^{-1}), **(b)** concentración granos de polen familia Podocarpaceae (granos mL^{-1}), **(c)** concentración granos de polen de *Nothofagus spp* (granos mL^{-1}), **(d)** abundancia *Trinema spp* (individuos mL^{-1}) La **Franja celeste** representa el balance de masa de invierno del año 2005. La **Franja violeta** representa el balance de masa neto entre 2005 y 2004.

4.2.2. Propiedades Físicas del Testigo

En este testigo se pueden reconocer dos horizontes donde las capas de hielo están casi ausentes, desde 1.8 – 4.6 m y 7.6 – 8.4 m, lo que indica ausencia de percolación (Fig. 11). Al sobreponer estas profundidades con las capas de resolución estacional estimada por el análisis biológico, estas se encuentran dentro de los horizontes que corresponden al período de otoño-invierno, lo cual corrobora la resolución estacional para este período. En la estación de primavera-verano, ocurre un alto porcentaje de hielo en las capas, con un máximo de 85%, lo que sugiere una relevante percolación durante la estación de derretimiento y posterior congelamiento.

4.2.3. Interpretación Isotópica y de Especies Químicas

4.2.3.1 Variación Estacional δD

Debido a las importantes fluctuaciones de δD observadas sobre los 5 m del testigo (Fig. 12 y Fig. 25 en m eq. de agua), que corresponde a la acumulación del período otoño-invierno 2005 basado en el análisis biológico, se considera que esta primera capa aún preserva los registros de δD, y demuestra que no es mayormente afectado por la percolación de agua. Por el contrario, bajo los 5 m las fluctuaciones de δD son mínimas y el perfil es más bien homogéneo, por lo tanto sugerimos la pérdida de la señal isotópica en las capas > 5 m debido a la mayor percolación, lo cual es consecuente con las capas y lentes de hielo que ocurren a esta profundidad. Por consiguiente este registro de δD no se puede utilizar para estimar las temperaturas pasadas en este sitio.

4.2.3.2. Especies Químicas

4.2.3.2.1. Principales fuentes de origen de las especies químicas

Se sugiere que la composición química de la nieve de este sitio está caracterizada principalmente por constituyentes de origen natural, indicado por las máximas medianas en bases equivalentes registradas de Cl^- y Na^+ (Tabla 2), que frecuentemente corresponden en los testigos a las sales marinas que son transportadas en el rocío oceánico (Olivier *et al.*, 2003). Esto es corroborado por el análisis de correlaciones el cual indica un alto coeficiente de correlación (r = 0.998, Tabla 3) entre Cl^- y Na^+, que a su vez coincide con la cercanía de la proporción de Cl^- / Na^+ con el valor de referencia marina (1.16). En nuestro caso el valor promedio de esta proporción a lo largo del perfil es de 1.11 ± 0.7 con una mediana de 1.10 (Fig. 25). Esta proporción también nos permite observar la posible elución de las especies químicas debido a la percolación. Se observa que la proporción se mantiene cercana a la referencia a lo largo del perfil, no indicando cambios drásticos. Por consiguiente proponemos que es posible que la

percolación no afecte fuertemente al Cl^- y Na^+, permitiendo observar una variación estacional de estas especies químicas. Si corroboramos lo expuesto anteriormente, las utilizaremos para comprobar la datación estimada a partir del análisis biológico.

Entre las especies químicas que se encuentran relacionadas como constituyentes de sal marina (Cl^-, SO_4^{2-}, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, K^+) se encontraron altos coeficientes de correlación en 5 sets: Cl^--Na^+ (1.00), Mg^{2+}-Na^+ (0.80), Mg^{2+}-Cl^- (0.81), Mg^{2+}-SO_4^{2-} (0.86) y SO_4^{2-}-K^+(0.85). Estos altos coeficientes indican una contribución significativa del sales, pero no está claro aun que el origen sea marino (Watanabe *et al.,* 2003).

Basado en los siguientes argumentos sugerimos que la contribución marina es importante en este sitio, lo cual se demuestra por: 1) el alto coeficiente de correlación ente cloro y sodio (r = 0.998); 2) cercanía de la proporción Cl^- / Na^+ con la referencia marina (1.16 contra 1.11 ± 0.7 obtenida en este estudio); y 3) las especies químicas relacionadas como constituyentes de sal marina Cl^-, SO_4^{2-}, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, K^+ poseen altos coeficientes de correlación en este sitio. Esto es fácilmente explicado por la proximidad del sitio con el Océano Pacifico (~90 km) y a su vez entrega características del transporte atmosférico que posee este sitio.

En este sitio, de los iones que frecuentemente poseen un origen antropogénico tales como NH_4^+,NO_3^-, y SO_4^2 , solo NH_4^+ tiene un valor relevante dentro de la composición de especies químicas cuantificadas, ya que corresponde a la cuarta especie con una mayor mediana de concentración, a pesar que posee una muy baja correlación con las otras dos especies a las que frecuentemente se vincula. El NO_3^- y SO_4^2, aunque presentan bajas concentraciones en relación a todas las especies químicas cuantificadas, poseen un coeficiente de correlación alto (0.86), por lo cual sugerimos que estas dos especies tienen un origen común y/o que fueron transportados por la misma masa de aire. Las concentraciones de estos iones de origen antropogénico son incluso

más bajos que las medianas de la concentración para el periodo pre-industrial registrados en un testigo de los Alpes Europeos (Schwikowski *et al.,* 1999a) (Tabla 8), sugiriendo que puede deberse a: 1) que las emisiones antropogénicas cercanas de estos componentes no son lo bastantes altas en comparación al entorno de los Alpes; 2) que las masas de aire no transportan estos componentes antropogénicos hacia el sitio, lo cual es poco probable debido a que la zona está fuertemente afectada una buena parte del año por la circulación del oeste que debiera transportar hacia el glaciar los contaminantes originados por acividades humanas en los valles; o 3) que estas especies químicas sufren algún efecto post-depositación que no conocemos. Ginot *et al* (2001) señala que en su sitio de estudio las especies químicas atrapadas irreversiblemente, que no se ven afectadas por la sublimación y enriqueciéndose en la superficie, son Cl^-, SO_4^{2-} y K^+. Eichler *et al.* (2001) indican que ante la presencia de elución producto de la percolación se preservan los patrones estacionales normales de las concentraciones de NH_4^+, Cl^- y NO_3^-, mientras que las concentraciones de K^+, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} y SO_4^{2-} fueron disminuyendo significativamente, siendo SO_4^{2-} el que se ve mayormente afectado, lo cual es corroborado con análisis de laboratorio de otros estudio.

Por otra parte un estudio realizado en un transecto valle longitudinal – cordillera de los Andes, desde la ciudad de Osorno hasta el Parque Nacional Puyehue (Oyarzún *et al.*, 2002), que evalúa la depositación atmosférica de compuestos nitrogenados en la química de las precipitaciones, concluye que: *aunque las concentraciones de NO_3-N en el agua de precipitación en las áreas agrícolas y ganaderas son significativamente mayores que en las áreas boscosas, los valores reflejan una escasa influencia de las actividades industriales en la región, al compararla con áreas altamentemente impactadas por actividades antropogénicas en el hemisferio norte. En cambio, las altas concentraciones de NH_4-N evidencian el impacto de las actividades ganaderas,*

especialmente en el valle longitudinal, lo cual corrobora lo expuesto anteriormente, explicando en parte la mayor concentración de NH_4^+ y la menor de NO_3^- en este caso.

.	A	B
SO_4^{2-}	0,65	1,60
NO_3^-	0,11	1,17
NH_4^+	1,11	1,61

Tabla 8. Medianas de las concentraciones en μeq L^{-1} . **A)** Concentraciones del testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Osorno estimada en este estudio. **B)** Concentraciones del período pre-industrial en los Alpes Europeos, estimada por Schwikowski *et al.*, (1999a)

Es necesario conocer en detalle los efectos de post-depositación que sufren las especies como a su vez la dirección de las masas atmosféricas para poder entregar una conclusión y explicación a los registros encontrados. Pero se considera que la información obtenida a partir de este registro es un primer e importante aporte para el entendimiento e interpretación de los procesos que ocurren en este y otros sitios en el entorno del glaciar de la cumbre del volcán Osorno.

4.2.3.2.2. Variación estacional de las especies químicas

En el caso de Cl^- y Na^+ las grandes fluctuaciones de sus concentraciones muestran variaciones estacionales que corresponden a las obtenidas por el análisis biológico, sugiriendo que estas especies se preservan en el sitio durante la estación de otoño-invierno (Fig. 25). La Tabla 8 indica que la mediana de concentración es mayor en invierno que en verano para ambas especies, indicando una proporción de 1.6 veces aproximadamente más concentración en invierno que en verano. La preservación de la variación estacional de estas dos especies coincide con los resultados obtenidos de la proporción Cl^- / Na^+. Eichler *et al.* (2001) investiga los procesos de arrastre de las especies químicas producto de la percolación en una capa natural de neviza. Dentro de sus conclusiones indica que el Cl^- preserva sus patrones estacionales normales.

Sugieren que los iones de Cl^- quedarían atrapados en la matriz cristalina del hielo durante su metamorfismo, permitiendo que no sean arrastrados por la percolación. En contraste indican que el Na^+ es excluido de los cristales de hielo debido a su baja solubilidad, siendo por lo tanto removido de la superficie, lo cual no es corroborado por nuestras observaciones. No obstante, Ginot *et al.* (2002) encuentran que en el glaciar de la cumbre del Cerro Tapado en Chile, donde ocurre alta sublimación, el Cl^- es depositado irreversiblemente sobre la nieve y no es significativamente liberado de la superficie, al igual que el Na^+. Esto podría explicar en parte nuestros registros, y apoyaría la propuesta de que ambas especies químicas han preservado su variación estacional en este sitio, no habiendo sido afectadas por la percolación. Por lo tanto ambas especies químicas son utilizadas como una herramienta para la corroboración de la datación obtenida a través del análisis biológico.

En el caso del Ca^{2+} y Mg^{2+}, al sobreponer sus perfiles a la estacionalidad biológica (Fig. 25), ambos presentan una gran fluctuación indicando su concentración máxima en la capa de invierno del 2004 bajo los 3 m eq de agua, pero no en la capa de invierno del 2005 la cual está sobre los 3 m eq. de agua. Bajo los 2.65 m eq de agua se observa la percolación de deuterio, lo que sugiere que estas dos especies químicas podrían estar afectadas por la percolación, no indicando estacionalidad, lo que también es sugerido en Eichler *et al* (2001) ya que el calcio y magnesio disminuyen significativamente encontrándose dentro de las tres especies que se ven mayormente afectadas por la remoción debido a la percolación desde la capa de neviza. En el caso del calcio podemos observar que en la superficie, que corresponde a lo transcurrido de la primavera, que se ha preservado en parte, pero no lo suficientemente para sugerir estacionalidad. Ello se confirma por la ausencia de señal en Ca^{2+} y Mg^{2+} durante lo que se interpreta como

invierno de 2005. Consecuentemente la interpretación de estas dos especies necesita de más información con respecto a procesos de post-depositación y estacionalidad superficial.

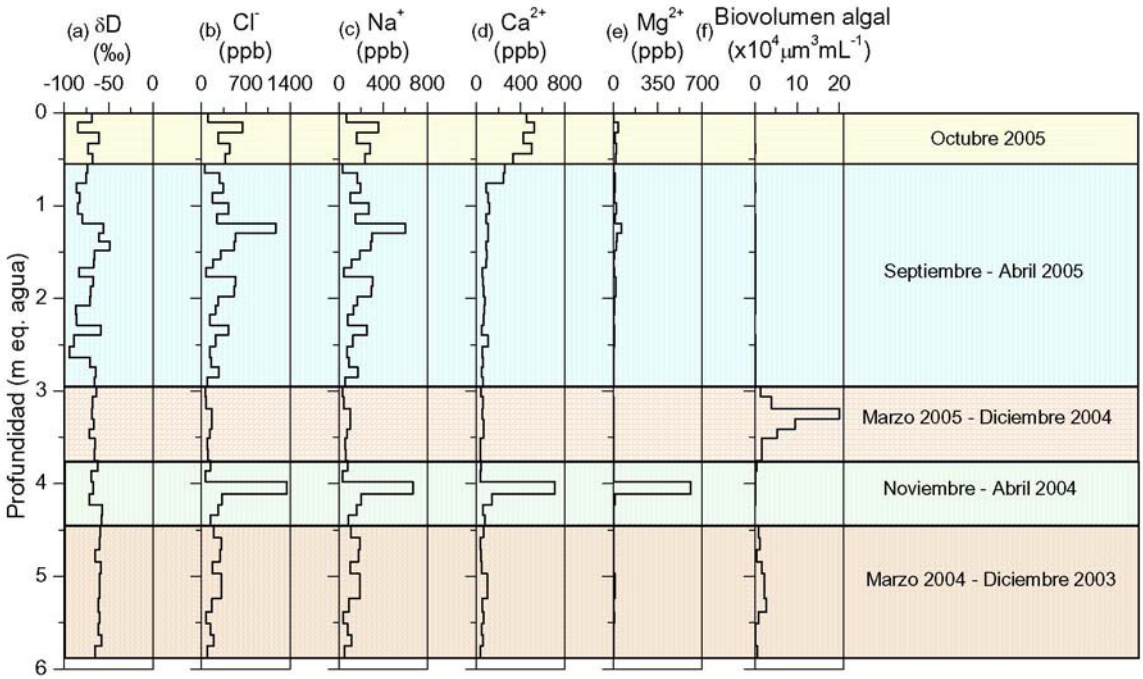

Fig. 25.- Perfiles verticales de especies químicas e isótopo sobrepuestos a estacionalidad obtenida a partir de interpretación y análisis biológico, en testigo de neviza/hielo de la cumbre del glaciar del volcán Osorno. **(a)** Isótopo δD (‰) y especies químicas en ppb = µg L^{-1} **(b)** Cloro, **(c)** Sodio, **(d)** Calcio, **(e)**Magnesio, **(f)** biovolumen algal (x10^4 µm^3 L^{-1}). Para mas detalles ver leyenda de Fig. 23.

En el perfil de K^+ y SO_4^{2-} se puede sugerir que ambas especies se preservan entre finales de invierno y primavera según lo que se observa al sobreponer los perfiles con la estacionalidad propuesta por el análisis biológico (Fig. 26). Al obtener la proporción entre invierno y verano, se estima que el invierno posee 1.53 y 2.56 veces mas concentración que la estación de derretimiento, respectivamente (Tabla 9). En el estudio de Eichler *et al.* (2001) se indica que la concentración de K^+ disminuye significativamente por lo que es medianamente afectada por la percolación mientras que el SO_4^{2-} es preferencialmente eluido en el sitio de estudio. Dentro de ese mismo estudio se comparan resultados de laboratorio los cuales también corroboran lo indicado para el sulfato. En el estudio de Ginot *et al.* (2002) ambos elementos pertenecen al

grupo de especies químicas que son depositadas irreversiblemente. Consecuentemente la variación estacional que se sugiere para estas especies químicas corrobora nuestros datos. Pero debido al estudio de Eichler *et al,* (2001), el cual corrobora con experimentación en laboratorio, proponemos que la estacionalidad obtenida corresponde a un primer registro para futuras interpretaciones, y no serán utilizadas estas especies como herramientas para la interpretación del testigo. Estas especies necesitan de más información con respecto a los procesos de post-depositación y estacionalidad superficial.

Los perfiles de NH_4^+ y NO_3^- no indican estacionalidad, mostrando pequeñas fluctuaciones que se distribuyen homogéneamente a lo largo del testigo (Fig. 26), aunque ambas especies en Eichler *et al.* (2001) preservan sus patrones estacionales normales. Podríamos sugerir que no presentan variaciones estacionales ya que se distribuyen homogéneamente durante el año sobre este sitio. Sin embargo, esta propuesta se contradice al observar que ambas especies presentan sus concentraciones máximas a nivel superficial, lo que si nos permite conjeturar que ambas se ven sometidas a algún efecto de post-depositación.

Tabla 9.- Concentraciones medianas de cloro, sodio, potasio y sulfato en neviza/hielo de invierno (estación sin capas de microalgas que integra invierno, primavera y otoño) y neviza/hielo de verano (estación de derretimiento). Estacionalidad a partir de interpretación y datación biológica, en el testigo de neviza/hielo de la cumbre del glaciar del volcán Osorno. (*n* = numero de muestras)

	n	**Cl^-**	**Na^+**	**K^+**	**SO_4^{2-}**
Invierno	28	267,60	162,35	6,93	40,82
Verano	23	169,41	101,65	4,54	15,92
Proporción		1,58	1,60	1,53	2,56

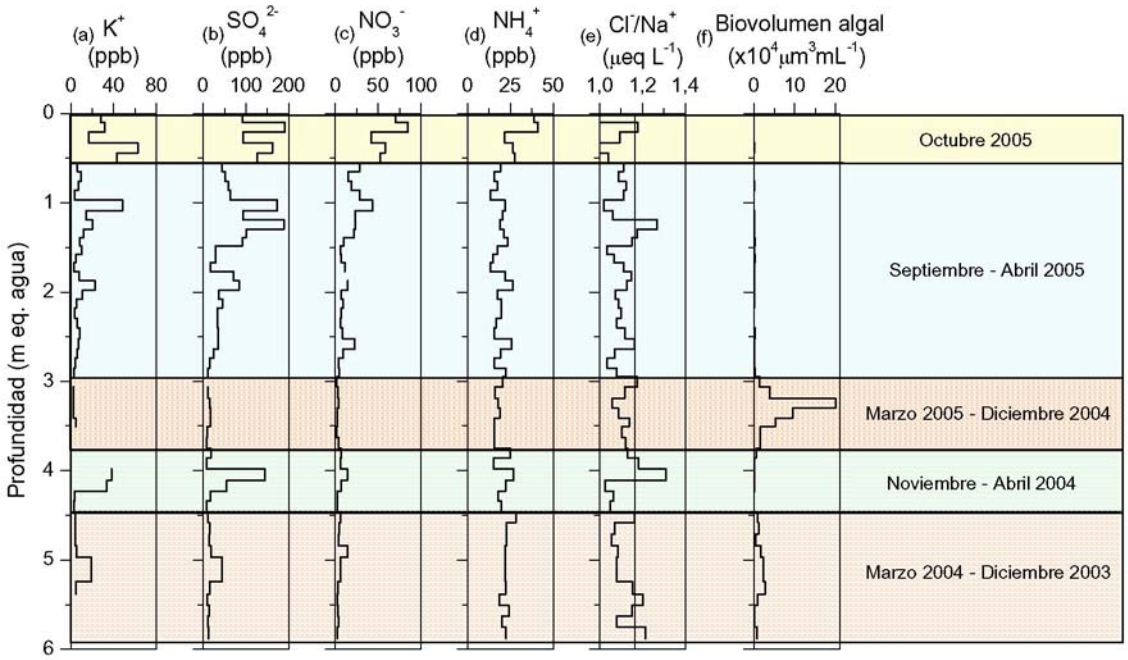

Fig. 26.- Perfiles verticales de especies químicas sobrepuestos a estacionalidad obtenida a partir de interpretación y análisis biológico, en testigo de neviza/hielo de la cumbre del glaciar del volcán Osorno. **(a)** Potasio, **(b)** Sulfato, **(c)** Nitrito, **(d)** Amonio, **(e)** Cl^- / Na^+ ($\mu eq\ L^{-1}$/ $\mu eq\ L^{-1}$), la línea indica la referencia marina de la proporción Cl^- / Na^+ 1.16 $\mu eq\ L^{-1}$, y **(f)** biovolumen algal ($x10^4\ \mu m^3\ L^{-1}$). Para más detalle ver leyenda Fig. 23.

4.2.4. Estimación del Balance de Masa

Nuestros resultados sugieren que las capas de microalgas fueron formadas durante la estación de derretimiento cuando estas proliferan en la superficie, corroborado con los perfiles de polen y *Trinema spp*. El efecto de arrastre y mezcla que sufren el isótopo y las especies químicas debido a la percolación, no afecta a los perfiles biológicos (biovolumen algal, abundancia de *Trinema spp* y concentración de polen) debido a su mayor tamaño.

Aunque aún no es claro para este sitio cuando comienza el crecimiento algal y cuando finaliza exactamente, sabemos que debe ocurrir mientras se mantengan las condiciones apropiadas para su proliferación desde diciembre-marzo aproximadamente. En este caso la información que nos entregan las especies químicas y propiedades físicas son mínimas. Sin embargo nos permiten en algunos casos corroborar las estimaciones de balance de masa

obtenidas de la interpretación biológica, utilizándolas como herramientas indicadoras de perturbación.

La resolución anual, estacional, y la estimación de balance de masa para este sitio, son obtenidas a través de la interpretación biológica ya señalada, interpretación que no sufrió modificaciones al evaluar las propiedades físicas y las especies químicas. Se concluye que este testigo de 10.4 m posee el registro de una capa anual sumado al último periodo de acumulación y otro de verano, indicando un balance de masa neto positivo entre 2004/2005 de 1.51 m eq. de agua, y un balance de masa de invierno (acumulación) de 2.4 m eq. de agua.

4.3. INTERPRETACIÓN TESTIGO DE NEVIZA/ HIELO DEL GLACIAR DE LA CUMBRE DEL VOLCÁN MOCHO - CHOSHUENCO.

4.3.1 Resolución Estacional y Datación a través del Análisis Biológico

Al sobreponer los cuatro perfiles biológicos en este testigo (Fig. 27), podemos interpretar que las capas de microalgas que representan la estación de derretimiento (diciembre-marzo) se sobreponen al perfil de *Trinema spp*, permitiéndonos establecer con mayor confianza cuatro capas, que corresponderían al período anteriormente señalado. Se sugiere que la capa de microalgas que termina a los 7.4 m empieza a los 5.8 no se separa en dos capas entre los 6.8-6.6 m debido a que en esta capa de transición hay microalgas y *Trinema spp* en bajo biovolumen y abundancia. Es posible que en las capas de otoño, invierno y primavera, se observen bajos biovolumenes de microalgas que son transportadas por los vientos desde sus fuentes de origen. Por el contrario *Trinema spp* no se ha encontrado en ninguna otra estación que no sea la de derretimiento, debido probablemente a sus requerimientos de humedad y alimentación. Se sugiere interpretar la capa entre 5.8-7.4 m como una sola y explicar la disminución de ambos microorganismos con un episodio de enterramiento (*burial*) entre los 6.6-6.8 m producto de una nevazón durante la estación de derretimiento. Esta propuesta deberá ser respaldada con otras herramientas tanto físicas como químicas.

Se sugiere que el peak de microalgas que se observa entre los 4.2 – 4.4 m (Fig. 27), de menor biovolumen que las otras capas de este perfil, no representa una estación de derretimiento. Concluimos esto debido a que ninguno de los otros perfiles biológicos indica capas a esa profundidad. Por lo tanto se conjetura que este peak se forma a partir de las microalgas que son transportadas por el viento desde las fuentes que proporcionan microalgas a la superficie del glaciar. Una característica muy particular de los sitios de este estudio, es que poseen varios lagos

cercanos en sus alrededores que cumplirían esta función. Los más cercanos (~30 km) corresponden al lago Riñihue, lago Panguipulli, lago Neltume, lago Pirihueico, con el lago Ranco un poco más alejado que los anteriores (~60 km aprox.).

Se puede observar dentro del primer metro del testigo, para ambos perfiles de polen, una capa de distinta extensión para cada uno, que indica lo transcurrido del período de primavera, ya que este testigo fue rescatado el 27 de octubre del 2005 (Fig. 27). Al sobreponer el perfil de Podocarpaceae con las capas que señalan el biovolumen algal y la abundancia de *Trinema spp*, éstos registros coinciden en tres profundidades (capas) a lo largo del perfil. Sin embargo, la segunda capa más antigua de microalgas y *Trinema spp* no posee presencia de polen. Como hemos señalado anteriormente, ello puede deberse a la baja concentración o al tipo de distribución del polen sobre el glaciar y no a que represente el período sin dispersión de polen. Las tres capas que presentan polen y se sobreponen a las capas de biovolumen algal y abundancia de *Trinema spp*, aumentan la confiabilidad de los dos perfiles e indican tres períodos de verano. Un cuarto período es inferido a partir de la coincidencia de *Trinema spp* y biovolumen algal, a pesar que desaparece en esta capa intermedia el polen, que es razonable según lo expuesto en la sección anterior (4.1).

Al sobreponer el perfil de polen de *Nothofagus spp* con las capas ya interpretadas, dos de las tres capas que se encuentran bajo la capa de la superficie se insertan dentro de las capas de *Trinema spp* y microalgas.

El análisis biológico nos sugiere una datación de nivel estacional e interanual del testigo de neviza/hielo obtenido en el glaciar de la cumbre del volcán Mocho – Choshuenco. Ello debido a que los perfiles verticales de biovolumen microalgal, abundancia de *Trinema spp* y

concentración de polen (Fig. 27) se encuentran claramente preservados y relacionados estacional e interanualmente.

4.3.1.1 Estimación de Balance de Masa basado en la Interpretación Biológica

En el perfil de biovolumen algal se reconocen cuatro límites superiores de capas algales para estimar balance de masa. En complemento con los otros perfiles biológicos obtenemos una datación de resolución anual y estacional. Se estima el balance de masa de este sitio, el cual será corroborado o modificado por la interpretación de las propiedades físicas y las especies químicas:

- Balance de masa neto durante otoño 2002 – otoño 2003 que corresponde a **0.66** m equivalente de agua (Fig. 28).
- Balance de masa neto durante otoño 2003 – otoño 2004 que corresponde a **1.26** m equivalente de agua (Fig. 28).
- Balance de masa neto durante otoño 2004 – otoño 2005 que corresponde a **0.2** m equivalente de agua (Fig. 28). En este caso el balance de masa es bastante menor a los anteriores, lo cual sugiere que: 1) esta capa podría ser parte del período anterior; o 2) que hay una clara disminución del balance de masa neto para este período. Por este motivo es necesario analizar e interpretar los registros físicos o químicos para ver si pueden aclarar la situación y a su vez comparar estos valores con los obtenidos por el método glaciológico de balizas durante este período publicados por Rivera *et al.*, (2005).
- El balance de masa de invierno para el año 2005, el cual considera la acumulación de nieve de otoño a primavera, corresponde a **2.12** m equivalente de agua (Fig. 28).

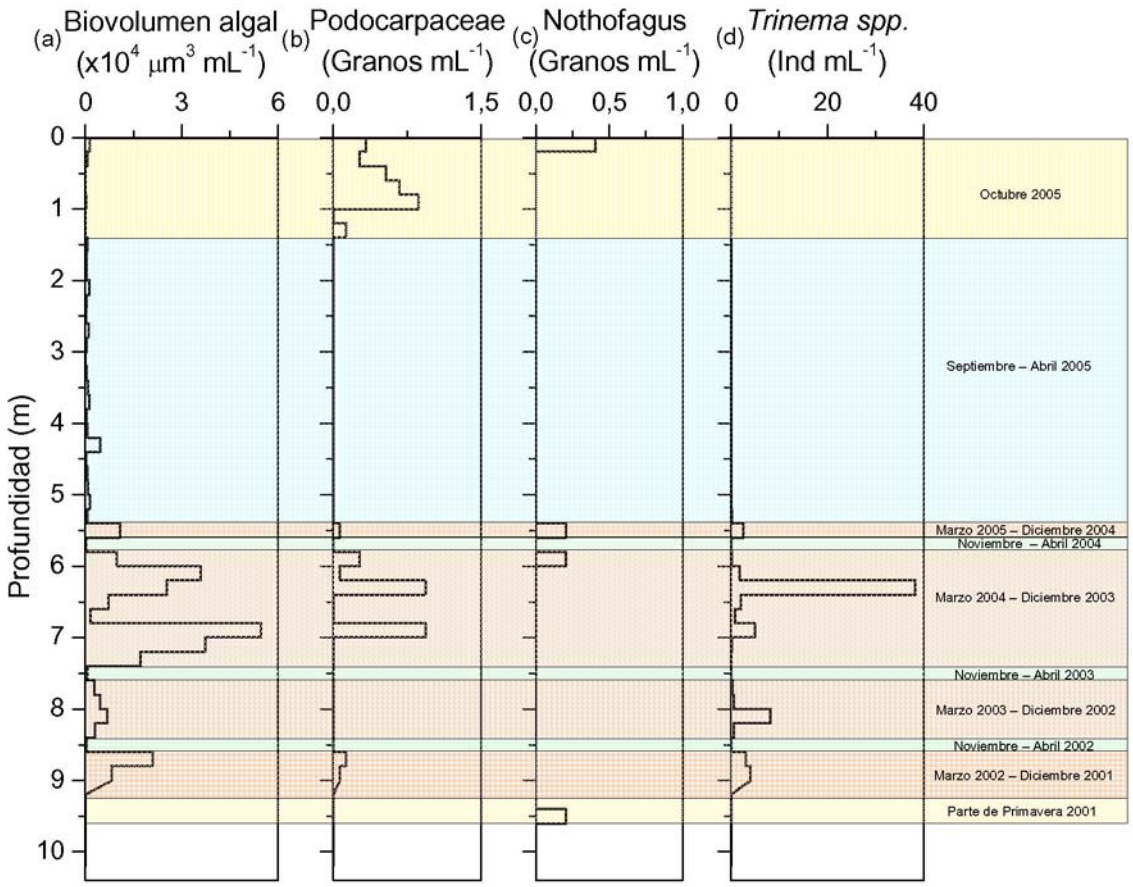

Fig. 27.- Perfiles verticales de microorganismos y polen en el testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Mocho - Choshuenco**. (a)** Biovolumen algal ($x10^4$ μm^3 mL^{-1}), **(b)** concentración de granos de polen de la familia Podocarpaceae (granos mL^{-1}), **(c)** concentración de granos de polen *Nothofagus spp* (granos mL^{-1}), **(d)** abundancia *Trinema spp* (individuos mL^{-1}). Para más detalles ver leyenda de Fig. 23.

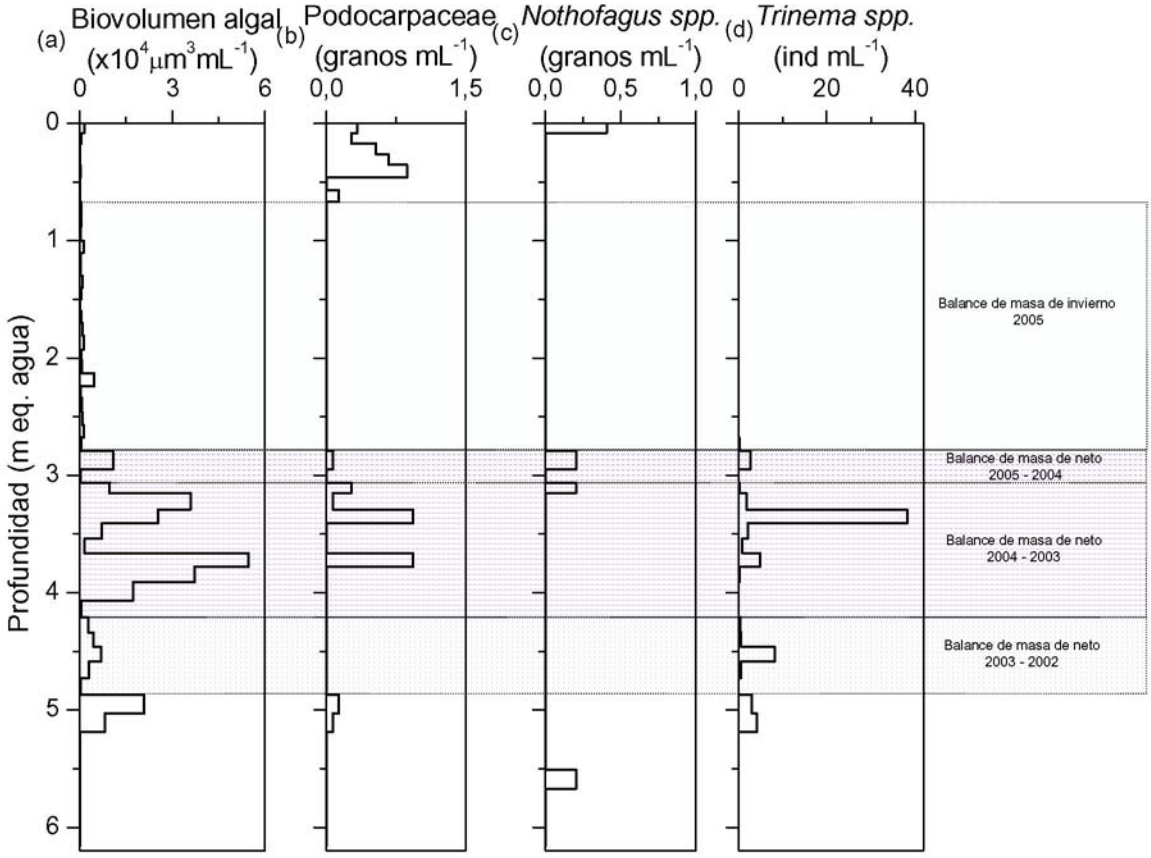

Fig. 28.- Perfiles verticales de profundidad en metros equivalente de agua (m eq. agua) de microorganismos y polen en el testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Mocho - Choshuenco**. (a)** Biovolumen algal (x10^4 µm^3 mL^{-1}), **(b)** concentración granos de polen familia Podocarpaceae (granos mL^{-1}), **(c)** concentración grano de polen *Nothofagus spp* (granos mL^{-1}), **(d)** abundancia *Trinema spp* (individuos mL^{-1}). La **Franja celeste** representa el balance de masa de invierno del año 2005. **La Franja violeta** representa el balance de masa neto entre 2005 -2004; 2004-2003; 2003-2002.

4.3.2. <u>Propiedades Físicas del Testigo</u>

En este testigo se pueden reconocer dos horizontes donde las capas de hielo están casi ausentes desde: 0 – 2.79 m eq. de agua y 2.95-3.66 m eq. de agua (Fig. 29). Al sobreponer estas profundidades con las capas de resolución estacional estimadas por el análisis biológico, estas se encuentran dentro de los horizontes que corresponden a la estación de otoño-invierno, lo cual corrobora la resolución estacional. La capa de 2.79-2.95 m eq. de agua que posee un 100% de hielo se sobrepone a la capa que corresponde a la estación de derretimiento para el período

diciembre 2004 a marzo 2005. Luego la capa entre 3.29-3.41 m eq. de agua también posee un porcentaje de hielo considerable, no tan alto como el anterior, que también se sobrepone a la capa de verano 2003-2004, corroborando la datación biológica. Después se produce una disminución del porcentaje de hielo en la capa siguiente, el cual aumenta considerablemente a los 3.65 m eq. de agua, alcanzando un 100% de hielo, lo que se mantiene hacia lo profundo del testigo. La capa entre 3.29 – 3.41 m eq de agua, tiende a separar los dos peak que se producen en esa estación de derretimiento estimada, lo que nos permitiría proponer: 1) la capa posee dos años distintos, los cuales casi se sobreponen entre si debido a un fuerte derretimiento de la superficie durante la estación de verano más joven, lo cual provocaría una clara sobreposición de esta con la capa de invierno anterior; o 2) que durante ese verano se produjeron bajas temperaturas y por ende un episodio de enterramiento.

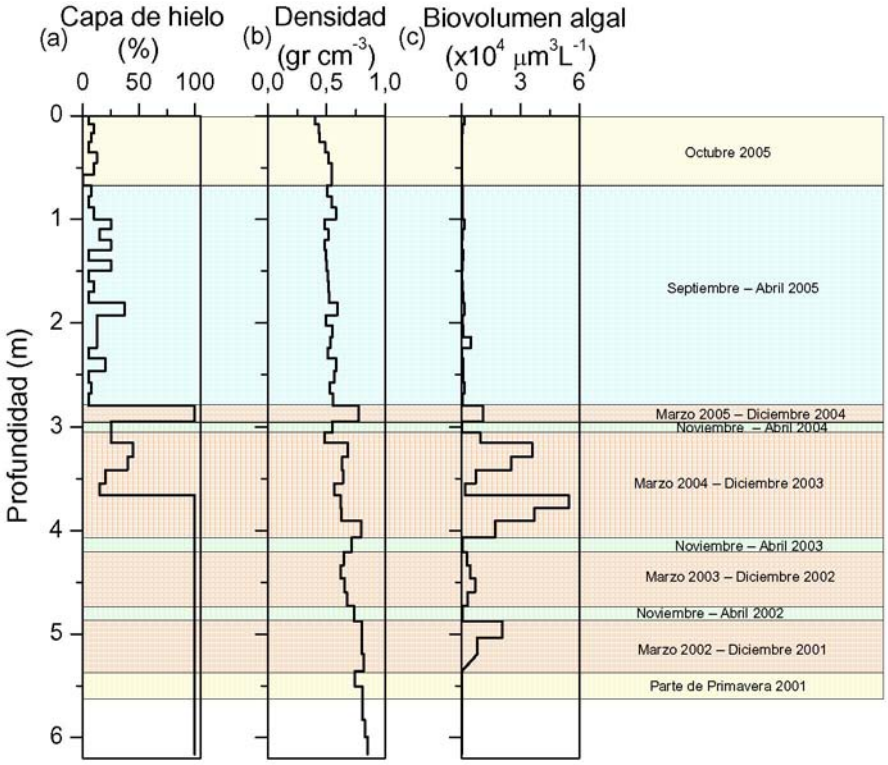

Fig. 29.- Perfiles verticales de propiedades físicas en m eq. de agua, sobrepuestos a estacionalidad obtenida de la interpretación del análisis biológico, en el testigo de neviza/hielo de la cumbre del glaciar del volcán Mocho-Choshuenco. **(a)** Porcentaje de capa de hielo **(b)** densidad (gr cm^{-3}) y **(c)** biovolumen algal ($x10^4$ μm^3 L^{-1}).

4.3.3. Interpretación Isotópica y de Especies Químicas

4.3.3.1 Variación Estacional δD

Debido a las fluctuaciones observadas sobre los 2.79 m eq. de agua del testigo (Fig. 30), que corresponde a la acumulación del periodo otoño-invierno 2005 estimado mediante análisis biológico, se considera que este sector del perfil aún preserva los registros de δD. Al contrario, bajo los 2.79 m eq. de agua, las fluctuaciones son mínimas y el perfil es más bien homogéneo. Por lo tanto sugerimos bajo este nivel la pérdida de la señal isotópica en cuanto a registro de estacionalidad y cantidad. Ello es debido probablemente a una fuerte percolación en el sitio, lo cual es consecuente con el incremento brusco de densidad de 0.55 a 0.77 g cm^{-3} que se produce a los 2.79 m eq. agua (Schwikowski *et al.*, 2006), como también con las capas y lentes de hielo que ocurren a esta profundidad (Fig. 30).

4.3.3.2. Especies Químicas

4.3.3.2.1. Principales fuentes de origen de especies químicas

Se sugiere que la composición química de la neviza/hielo de este sitio es igual al testigo analizado anteriormente (volcán Osorno) en cuanto al orden de dominancia de las especies químicas. En cuanto a las concentraciones medianas este sitio posee menores valores que en el volcán Osorno, excepto en Mg^{2+}.

El volcán Mocho-Choshuenco está caracterizado principalmente por constituyentes de origen natural, indicado por las máximas medianas en bases equivalentes registradas de Cl^- y Na^+ (Tabla 5), situación parecida al volcán Osorno. Ello es corroborado por el análisis de correlaciones, el cual indica un alto coeficiente de correlación (r = 0.90, Tabla 6) entre Cl^- y Na^+. La proporción de Cl^-/Na^+ de este sitio fue comparada con la referencia marina típica de 1.16

(Keene *et al.,* 1986, citado en Shiraiwa *et al.,* 2002), la cual indica que la capa entre 0 - 3.66 m eq. de agua, posee una proporción de 1.2 ± 0.18 con una mediana de 1.15 cercana a la referencia marina (Fig. 31e). Bajo la profundidad señalada la media corresponde a 1.68 ± 1.12 con una mediana de 1.33, lejana a la referencia marina. Por consiguiente esta lejanía nos sugiere que probablemente estas especies químicas involucradas fueron perturbadas por la percolación bajo la profundidad indicada. A esta profundidad coinciden el perfil de δD que indica perturbación bajo los 3.15 m eq. agua, con una capa de hielo de un 100%, y con la elución de cloro y sodio. Se sugiere que la percolación en este sitio puede ser lo bastante fuerte para someter a todas las especies químicas a una gran perturbación, lo cual haría complejo determinar la variación estacional de éstas.

Entre las especies químicas que se encuentran relacionadas como constituyentes de sal marina (Cl^-, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}) se encontraron altos coeficientes de correlación en 3 sets: Cl^--Na^+ (9.00), Mg^{2+}-Na^+ (0.80) y Mg^{2+}-Ca^+ (0.84).

Por lo tanto la contribución marina es importante en este sitio, lo cual se demuestra por: 1) alto coeficiente de correlación ente cloro y sodio (r = 0.90); 2) cercanía de la proporción Cl^- / Na^+ con la referencia marina en la capa no afectada por la posible percolación; y 3) especies químicas relacionadas como constituyentes de sal marina Cl^-, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, que poseen altos coeficientes de correlación en este sitio. Lo cual al igual que el caso anterior (volcán Osorno) puede ser explicado por la proximidad del sitio con el Océano Pacifico (~90 km). Podemos observar diferencias entre los sitios de los volcanes Osorno y Mocho-Choshuenco, las que sugerimos pueden deberse a: 1) que el transporte atmosférico es diferente para cada sitio; 2) el testigo del volcán Osorno se encuentra más alto y más al Sur y por lo tanto preserva mejor los

contenidos, no siendo tan afectado por la percolación como el caso de este sitio; o 3) puede sugerir un efecto importante de sal que no es de origen marino (Watanabe *et al.*, 2003).

En este sitio los iones que frecuentemente poseen un origen antropogénico, NH_4^+,NO_3^-, SO_4^{2} , en cuanto a su importancia dentro de la composición de las especies químicas cuantificadas, solo NH_4^+ tiene un valor relevante, igual que en el testigo anterior. La baja correlación entre las tres especies nos permite sugerir que: 1) estas especies no tienen un origen común y no fueron transportados por la misma masa de aire; o 2) que han sufrido una gran perturbación producto de la percolación o de efectos post-depositación. Al igual que en el testigo anterior las concentraciones de estos iones de origen antropogénico son incluso más bajos que las medianas de la concentración para el período pre-industrial registrados en un testigo de los Alpes Europeos (Schwikowski *et al.,* 1999a). Se sugiere para estas especies químicas algo muy similar a lo mencionado en el testigo anterior, pero en el volcán Mocho-Choshuenco existe una mayor influencia de la fuerte percolación detectada.

	A	**B**	**C**
$\mathbf{SO_4^{2-}}$	0,91	1,60	0,65
$\mathbf{NO_3^-}$	0,24	1,17	0,11
$\mathbf{NH_4^+}$	1,06	1,61	1,11

Tabla 10. Medianas de las concentraciones en $\mu eq\ L^{-1}$. **A)** Concentraciones del testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Mocho-Choshuenco estimada en este estudio. **B)** Concentraciones del periodo pre-industrial en los Alpes Europeos, estimada en Schwikowski *et al.,* (1999a). **C)** Concentraciones del testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Osorno estimada en este estudio.

4.3.3.2.2. Variación estacional de las especies químicas

En este sitio es muy complejo interpretar las especies químicas y se requieren conocimiento tales como: procesos de post-depositación, variación estacional de las especies químicas obtenida desde la superficie, registros de las condiciones meteorológicas que afectan al sitio, intensidad del viento, transporte atmosférico, balance neto de masa, entre otros. En el

estudio de Rivera *et al.* (2005) se indica que en la cumbre del Volcán Mocho hay redistribución de nieve por vientos fuertes y avalanchas de nieve que provocaron la pérdida de la baliza que mide el balance de masa en este y otros puntos.

Los perfiles de profundidad de deuterio, porcentaje de capas de hielo, densidad y proporción Cl^-/Na^+ nos permiten proponer que bajo los 2.79 m eq. de agua este sitio sufre una fuerte percolación que pudo afectar a las especies químicas. Por lo tanto podríamos sugerir que no habría efecto de percolación sobre los 2.79 m eq. de agua. Las especies químicas que presentan fluctuaciones y peaks de altas concentraciones en la capa de invierno del 2005, estimada por el análisis biológico, son Cl^-, Na^+, K^+, SO_4^{2} y levemente Mg^{2+}, por lo tanto estas especies podrían señalarnos dentro de sus perfiles la estación de invierno. La estacionalidad obtenida de estas especies químicas corrobora en las capas más profundas las capas interpretadas como período otoño-invierno por el análisis biológico. Pero además de corroborar ciertas capas, nos entregan información que sugiere una modificación de la resolución anual y estacional obtenida a través de la interpretación del análisis biológico.

La capa entre los 2.79 y 2.95 m eq. de agua, representa la estación de derretimiento entre diciembre del 2004 y marzo del 2005, ya que encontramos un peak en todos los perfiles biológicos. Ello a pesar que se encontraba separada por solo 0.2 m eq. de agua de la anterior estación de derretimiento, estimando un balance de masa neto muy pequeño en comparación a los otros estimados (Fig. 28). Las especies químicas también presentan un peak en esta capa (entre 2.79 y 2.95 m eq. de agua) y lo aún más relevante es que esta capa está constituida por un 100% de hielo (Fig. 29, 30, 31) presentando a su vez un aumento brusco de densidad. Lo que podría estar sugiriendo que hacia finales de la estación de derretimiento cuando ya habían comenzado los eventos de precipitación de nieve, estos se detuvieron produciéndose nuevamente días

despejados y con mayores temperaturas, lo que permitió el derretimiento de la superficie y su consiguiente congelamiento. Producto de ello se estimuló la proliferación de las microalgas y *Trinema spp*. Este mismo derretimiento superficial provocó probablemente la concentración de especies químicas en esta capa. Consecuentemente se sugiere que esta capa es parte de la capa anterior datada como estación de derretimiento (más antigua), fechada a través del análisis biológico entre diciembre del 2003 y marzo 2004. Según lo expuesto anteriormente se agrega luego la capa más nueva de microalgas (verano 2004/2005) y es datada como la estación de derretimiento de diciembre del 2004 a marzo del 2005 (Fig. 31).

Pero esta nueva capa datada, de 2.79-4.05 m eq. de agua, posee un espesor de aproximadamente 1 m eq. de agua sin incluir la capa más joven recién agregada. En la capa que separa las dos capas ricas en especies biológicas, 3.55-3.75 m eq. de agua, podemos observar una disminución clara de microalgas y paralelamente una disminución de *Trinema spp*. Asimismo, en esta capa cinco de las especies químicas, que podrían indicar estacionalidad de invierno, señalan importantes fluctuaciones (Fig. 30). Por consiguiente se propone que esta capa de 2.79-4.05 m eq. de agua corresponde a dos estaciones de derretimiento y que la cercanía de estas puede deberse a que las mas joven de ellas, producida entre diciembre del 2004 y marzo del 2005, tuvo una gran intensidad de derretimiento provocando que las microalgas y otros microorganismos proliferen en la capa de invierno, que debería separarlas. Obteniendo altos biovolumenes en comparación a las capas mas profundas, acumulando a las especies químicas debido al efecto de percolación las cuales a su vez se detuvieron por la presencia de una gruesa capa de hielo, permitiendo que las microalgas queden insertas en la capa de invierno y lo bastante cercana de la capa de microalgas formada el año anterior. Este gran derretimiento puede deberse a muchos factores tales como: temperatura, intensidad del viento y a la misma presencia de

microalgas. Ya que estas al colorear y oscurecer la nieve disminuirían el albedo provocando que se absorba más energía solar y estimulando significativamente su derretimiento. Estudios sugieren que la actividad biológica sobre el glaciar afecta sustancialmente la reducción del albedo en la superficie del glaciar (Kohshima *et al.,* 1993, citado en Takeuchi y Kohshima 2004; Thomas y Duval, 1995; Takeuchi *et al.*, 2001; Hoham y Duval, 2001 citado en Takeuchi, 2001), lo que tiene un interés biológico como geofísico, producto que la actividad de microorganismos afecta el derretimiento y por consiguiente al balance de masa del glaciar. Consecuentemente la interpretación de las especies químicas aunque es compleja en este caso, por la fuerte percolación contribuyó a la modificación del balance de masa estimado a partir del análisis biológico, el cual será definido a continuación.

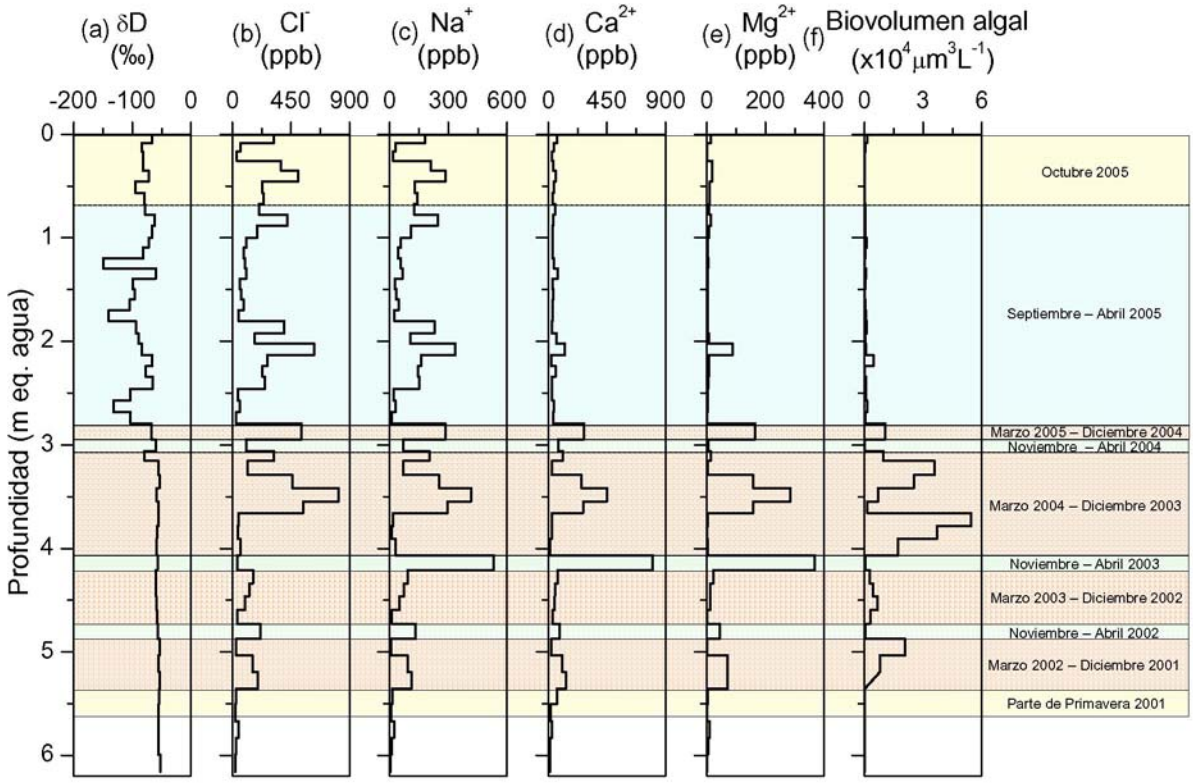

Fig. 30.- Perfiles verticales de especies químicas e isótopo sobrepuestos a estacionalidad obtenida a partir de interpretación y análisis biológico, en testigo de neviza/hielo de la cumbre del glaciar del volcán Mocho-Choshuenco. **(a)** Isótopo δD (‰) y especies químicas en ppb = μg L^{-1} **(b)** Cloro, **(c)** Sodio, **(d)** Calcio, **(e)**Magnesio, **(f)** biovolumen algal (x10^4 μm^3 L^{-1}).

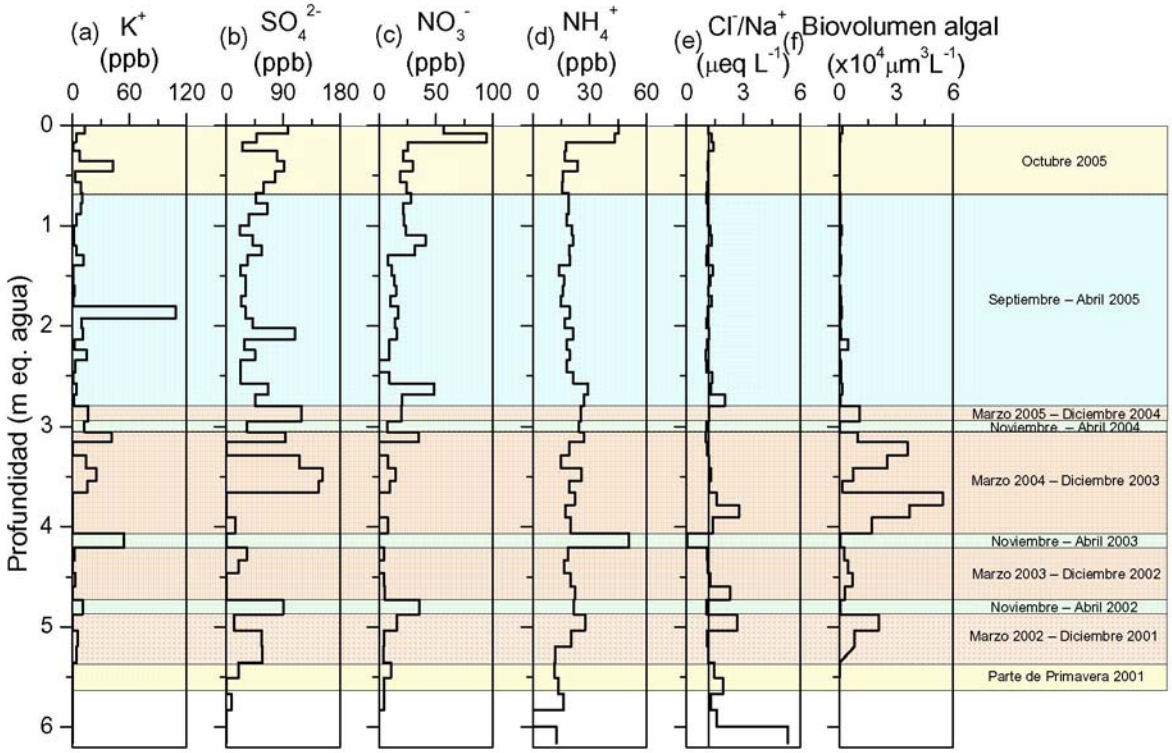

Fig. 31.- Perfiles verticales de especies químicas sobrepuestos a estacionalidad obtenida a partir de interpretación y análisis biológico, en testigo de neviza/hielo de la cumbre del glaciar del volcán Mocho-Choshuenco. **(a)** Potasio, **(b)** Sulfato, **(c)** Nitrito, **(d)** Amonio, **(e)** Cl^- / Na^+ (μeq L^{-1}/ μeq L^{-1}), línea indica referencia marina de la proporción Cl^- / Na^+ 1.16 μeq L^{-1}, y **(f)** biovolumen algal (x10^4 μm^3 L^{-1}).

4.3.4. Estimación del Balance de Masa

Consecuente con las interpretaciones obtenidas desde las propiedades físicas y el análisis químico se propone que el balance de masa estimado para este sitio a través de la interpretación biológica, deben ser modificados. La estimación, resolución anual y estacional del sitio se realizará a través de una interpretación con un conjunto de herramientas biológicas, físicas y químicas, lo cual aumenta la confiabilidad y nos indica lo siguiente:

- Balance de masa neto durante otoño 2002 – otoño 2003 que corresponde a **0.66** m equivalente de agua (Fig. 32).
- Balance de masa neto durante otoño 2003 – otoño 2004 que corresponde a **0.56** m equivalente de agua (Fig. 32).

- Balance de masa neto durante otoño 2004 – otoño 2005 que corresponde a **0.86** m equivalente de agua (Fig. 32).
- Balance de masa de invierno para el año 2005, el cual considera la acumulación de nieve de otoño-invierno, corresponde a **2.12** m equivalente de agua, de 0.67-2.79 m eq. de agua (Fig. 32).

Por lo tanto se estima que este testigo de 10.2 m equivalente a 6.16 m eq. de agua, incluye 3 capas anuales (2002/2003 – 2003/2004 – 2004/2005) y el último periodo de acumulación. El promedio de los tres balances de masa netos obtenidos para este sitio es de 0.69 ± 0.152 m eq. de agua. Este valor es comparable con el balance de masa neto estimado para 2003-2004 a través de balizas que se encontraba a los 2169 m s.n.m. en el estudio de Rivera *et al.* (2005), el cual corresponde a 0.9 m eq. de agua/año. El balance de masa de acumulación invernal obtenido por Rivera *et al*. (2005) es de 2.4 m eq. de agua/año, cercano también al balance de masa de invierno (acumulación) obtenido en este estudio el cual corresponde a 2.12 m eq. de agua/año. Aunque la comparación no se puede realizar en el mismo sitio de perforación por causa de avalanchas y fuertes vientos, podemos sugerir que los valores obtenidos a través de la datación multi*proxy* (interpretación biológica, física y química) en este estudio son muy similares a los estimados por balizas cercanas a este sitio. Por tanto las marcas anuales de microalgas corroboradas por otros microorganismos y polen entregan una señal útil de los límites anuales de acumulación neta.

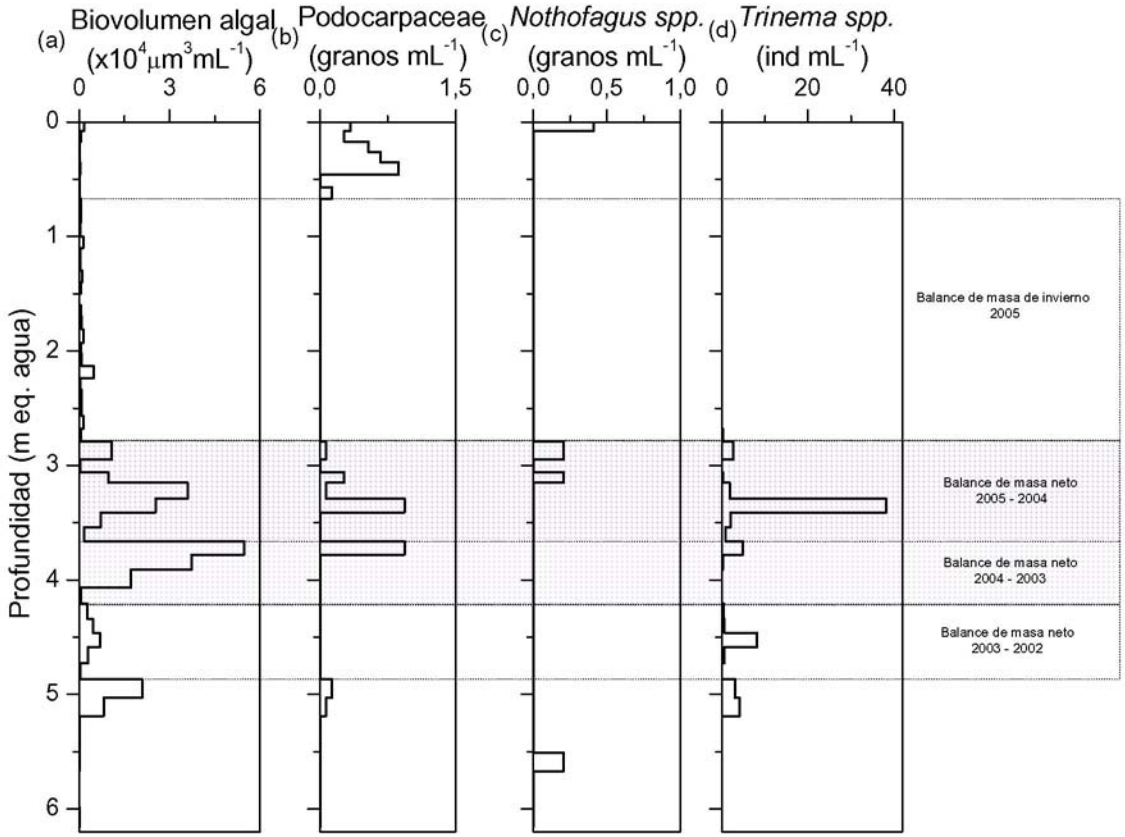

Fig. 32.- Estimación de balance de masa a interpretando análisis biológicos, físicos y químicos. Perfiles verticales de profundidad en metros equivalentes de agua (m eq. agua) de microorganismos y polen en el testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Mocho - Choshuenco**. (a)** Biovolumen algal ($x10^4$ μm^3 mL^{-1}), **(b)** concentración granos de polen familia Podocarpaceae (granos mL^{-1}), **(c)** concentración grano de polen *Nothofagus spp* (granos mL^{-1}), **(d)** abundancia *Trinema spp* (individuos mL^{-1}). **Franja celeste** representa balance de masa de invierno del año 2005. **Franja violeta** representa balance de masa neto entre 2005/2004; 2004/2003; 2003/2002.

4.4. INTERPRETACIÓN TESTIGO DE NEVIZA/HIELO EN ESTACION 18 DEL GLACIAR SURESTE DEL VOLCÁN MOCHO - CHOSHUENCO.

4.4.1 Resolución Estacional y Datación a través del Análisis Biológico

En este sitio de perforación se obtuvieron seis perfiles de especies biológicas (Fig. 19). La sobreposición de ellos no muestra una relación clara, lo cual complica la interpretación biológica para separar las capas estacionales. En primer lugar, el perfil de microalgas no indica capas, sino más bien se distribuye homogéneamente en el perfil mostrando dos máximos de biovolumen. El máximo mas antiguo se sobrepone a la capa de *Trinema spp*. El máximo superficial no se sobrepone a ninguna capa del protozoo, es más, se ubica antes (más profunda) que la capa superficial de los dos tipos de polen que indican lo avanzado del período de floración (primavera-verano). Los perfiles de los otros microorganismos (copépodo y nauplius) que se cuantificaron en el testigo coinciden con las capas superficiales de *Trinema spp,* que es razonable ya que en la estación de derretimiento existe alimento disponible (microalgas) para su desarrollo.

Para dar una explicación a la homogeneidad del perfil de biovolumen algal y la escasez de marcas claras, se procede a comparar los perfiles de biovolumen algal de los tres sitios perforados (Fig. 33). Como no conocemos cual es la cantidad de biovolumen algal que es depositado por el viento durante otoño - invierno sobre el glaciar, se hace necesario establecer esta comparación, que nos pueda entregar alguna sugerencia o señal de esta cantidad y así obtener algún tipo de explicación para este sitio. Al observar a escalas iguales el biovolumen algal de los tres sitios perforados este testigo, el volcán Mocho-Choshuenco estación 18 posee los menores valores de biovolumen. Se observa que los valores de biovolumen cuantificados en el testigo obtenido desde la estación 18 del glaciar sureste del volcán Mocho – Choshuenco, no supera los valores de biovolumen de los otros dos sitios durante el período de acumulación de

nieve (otoño-invierno). Esto nos lleva a proponer que los valores de biovolumen registrados para este perfil corresponderían al biovolumen que el viento es capaz de transportar durante el periodo de otoño- invierno sobre el glaciar. La ausencia de capas importantes de biovolumen algal podría deberse a que este perfil solo registraría la acumulación de las estaciones de otoño-invierno del año 2005, donde no proliferan las algas. Sin embargo, esto no parece correcto al observar la capa de *Trinema spp*, de polen y de los otros microorganismos entre los 8.25 – 9.85 m, los cuales coinciden en el sector más profundo del testigo, y que en principio podrían indicar la presencia de un estrato del verano anterior.

En este sitio, desde Mayo del 2003 se realiza un programa de balance de masa en el glaciar Sureste del volcán Mocho – Choshuenco. Este incluye la obtención de la densidad de las capas de nieve/neviza, la cual es medida mensualmente a través de una excavación en un pozo de 2 m de profundidad que se realiza en la estación 18, lo cual podría explicar que el testigo fue adquirido en un sitio que sufrió algún tipo de perturbación por parte de las excavaciones que se realizan desde el año 2003.

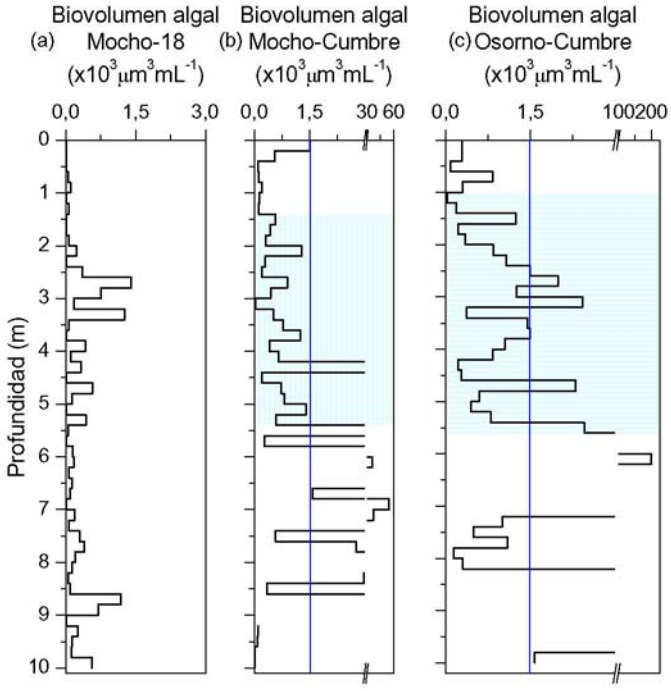

Fig. 33.- Perfiles verticales de biovolumen algal ($x10^3$ μm^3 mL^{-1}) **(a)** Testigo de neviza / hielo sobre estación 18 del glaciar Sureste del volcán Mocho - Choshuenco, **(b)** testigo neviza / hielo del glaciar de la cumbre del volcán Mocho – Choshuenco y **(c)** testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Osorno. La **Franja celeste** indica la estimación de la acumulación de otoño -invierno 2005 obtenida en ambos testigos a partir del análisis biológico. La **Línea azul** indica la referencia del biovolumen algal máximo (1.49×10^3 μm^3 mL^{-1}) registrado en el perfil del testigo de neviza/hielo del glaciar Sureste estación 18 volcán Mocho - Choshuenco.

4.4.2. Propiedades Físicas del Testigo

En este testigo se puede reconocer un horizonte donde las capas de hielo están casi ausentes desde: 0 – 4.64 m eq. de agua. Bajo este horizonte comienza una capa que posee un 100% de hielo hasta el final del testigo. En esta misma capa profunda se observa en la estratigrafía que el la neviza/hielo está saturada de agua (*water soaked firn/ice*), semejante a una napa subterránea. Se registra bajo los 4.64 m eq. de agua un aumento brusco de la densidad, el cual alcanza el valor de la transición neviza/hielo. Al sobreponer estos resultados con los perfiles biológicos, se puede observar que las capas de *Trinema spp.*, copépodo y nauplius bajo los 4.64 m eq. de agua coinciden. Es más, la capa de 100% de hielo comienza bajo el primer peak de *Trinema spp*. Por lo tanto proponemos que la capa entre 4.48 – 6 m eq. agua, corresponde al verano del año anterior, vale decir el período entre diciembre 2004/marzo 2005.

La información estratigráfica indica la presencia de agua en profundidad que satura la interfaz neviza/hielo, lo que podría estar eliminando las señales químicas e isotópicas, similar a lo reportado en el estudio de Shiraiwa *et al.* (2002). A su vez podría ser responsable del bajo biovolumen algal en la estación de derretimiento recién estimada, motivo del arrastre de estas células tanto vertical como horizontalmente, incluso las microalgas de mayor tamaño. Ello no se observaría en los otros microorganismos (*Trinema spp.*, copépodo y nauplius) que son preservados en el glaciar debido a su mayor tamaño con respecto a las microalgas.

4.4.3. Interpretación Isotópica

4.4.3.1 Variación Estacional δD

El efecto de percolación observado en este sitio se ve reflejado en el perfil de deuterio (Fig. 34). Entre los 2.36 – 2.88 m eq. de agua se producen los valores mínimos de δD, los cuales

a su vez indican bajas temperaturas sugiriendo la presencia de la estación de invierno. Al sobreponer este perfil con los biológicos y físicos, esta capa de invierno corrobora la estacionalidad interpretada hasta el momento. Bajo los 4.5 m eq. de agua, que coincide con la capa de hielo, el perfil de δD deja de mostrar variaciones y alcanza un valor medio de -63‰, lo que se interpreta es el resultado de la fuerte percolación de agua en esta zona.

4.4.4. Resolución Anual, Estacional y Estimación del Balance de Masa

La interpretación de este sitio se dificulta debido a la ausencia de capas claras en el perfil de biovolumen algal y a la vez la ausencia de los análisis químicos. No obstante, se tienen dos especies biológicas adicionales (copépodo y nauplius) comparado con los otros sitios interpretados en este estudio. Por lo tanto se sugiere que la capa desde los 0 a 1.52 m eq. de agua, corresponde a la primavera 2005, lo cual se estima por la presencia de granos de polen del tipo Podocarpaceae hasta esta profundidad, y la ausencia de otros microorganismos que deberían desarrollarse más tarde, hacia el verano. De hecho, tal como indicamos anteriormente, el biovolumen algal presente en este perfil podría deberse a microalgas transportada desde los valles/lagos por el viento hasta la superficie del glaciar, pero no a la proliferación de ellas *in situ*, lo cual se refleja al comparar los perfiles de biovolumen de los tres testigos (Fig. 33) y también es indicado por la ausencia de capas claras de biovolumen en el perfil. Luego, desde los 1.52 - 4.48 m eq. de agua podríamos sugerir que corresponde a la capa de otoño-invierno debido a la ausencia de microorganismos, a la presencia de los valores mínimos de Deuterio y la ausencia de capas de hielo que pudiesen indicar derretimiento (Fig. 34). Sin embargo, en esta capa interpretada como invierno, hay presencia de un pequeño peak de concentración de dos tipos de granos de polen, que eventualmente podría deberse a la perturbación que sufre este sector

mensualmente por el programa de balance de masa que se realiza sobre el glaciar sureste del Volcán Mocho-Choshuenco desde el 2003 (Rivera *et al.*, 2005). Bajo los 4.48 m eq. de agua hasta el final del testigo correspondería a la estación previa de derretimiento, debido a: la presencia de microorganismos que habitan durante esta estación; presencia de granos de polen; formación de capa de hielo; brusco cambio de densidad y homogeneidad del perfil de Deuterio. Las últimas tres características indican importante percolación de agua de nieve derretida en superficie durante la estación de derretimiento.

Por lo anteriormente expuesto, podríamos sugerir que esta capa bajo los 4.48 m eq. de agua representa parte de la estación de derretimiento desde marzo del 2004 hasta diciembre del 2005, pero es claro que no está completa, ya que el testigo fue tomado hasta los 6 m eq. de agua y a esta profundidad aun se indica la presencia de Podocarpaceae. Consecuentemente, como no tenemos certeza donde comienza la estación anterior de derretimiento en este sitio, solo podremos obtener la estimación de balance de masa de invierno del 2005 (abril-septiembre), la cual corresponde a 2.95 m eq. de agua obtenida a partir de la resolución anual y estacional de nuestros perfiles (Fig. 34). Esto concuerda con la acumulación obtenida para este sitio a través de balizas durante el periodo 2003/2004 presentada en Rivera *et al.* (2005), que corresponde a 2.9 m eq. de agua/año.

Esto reafirma que la interpretación a través del método *multiproxy* es capaz de entregarnos la datación de un testigo, aunque parezca difícil inicialmente debido a la perturbación por agua o a la ausencia de algún parámetro.

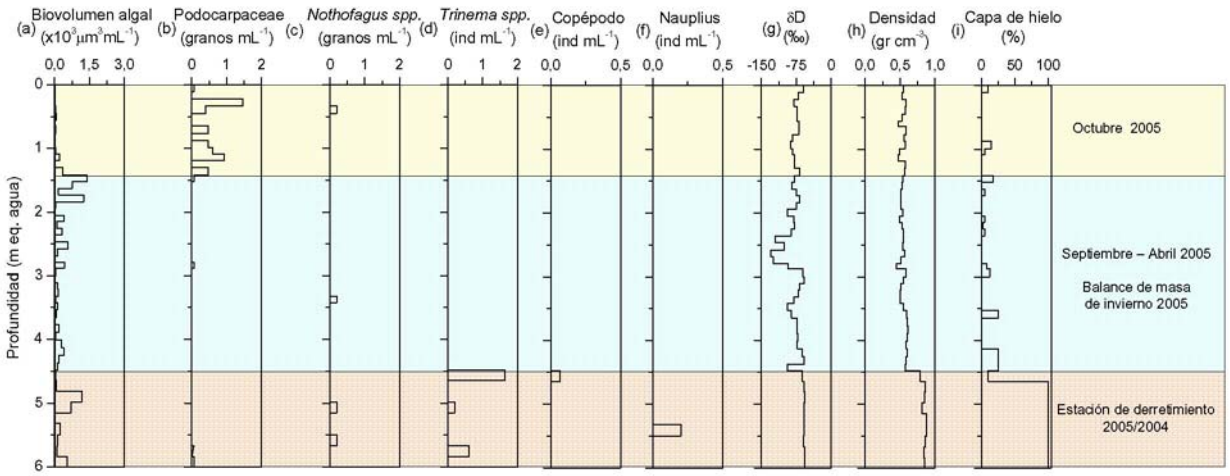

Fig. 34.- Perfiles verticales de microorganismos y polen, propiedades físicas e isótopo en el testigo de neviza/hielo del glaciar Sureste, estación 18 del volcán Mocho-Choshuenco**. (a)** Biovolumen algal ($x10^4$ μm^3 mL^{-1}), **(b)** concentración granos de polen de la familia Podocarpaceae (granos mL^{-1}), **(c)** concentración grano de polen *Nothofagus spp* (granos mL^{-1}), **(d)** abundancia *Trinema spp* (individuos mL^{-1}), **(e)** abundancia de Copépodos (Individuos mL^{-1}), **(f)** abundancia de Nauplius (Individuos mL^{-1}), **(g)** isótopo δD (‰), **(h)** densidad (gr cm^{-3}) e **(i)** porcentaje de capa de hielo. Para mas detalles ver leyenda Fig. 23.

4.5. DIFERENCIA DE DISTRIBUCION DE MICROALGAS, SEGUN TAMAÑO CELULAR.

Las figuras 5, 13 y 19 muestran los perfiles verticales de morfotipos algales con distintos tamaños celulares y distintos aportes en biovolumen. Los morfotipos con las algas de menor tamaño indicados son el A y G los cuales se encuentran en los tres sitios. Los cambios estacionales son más claros en los perfiles de biovolumen de los morfotipos de mayor tamaño. Los organismos de pequeño tamaño (< 5 μm) se distribuyen mas homogéneamente a lo largo del perfil, no así los de mayor tamaño. Lo que nos permite sugerir y apoyar lo indicado en Uetake *et al.* (2006), donde esto se debe probablemente al efecto de arrastre que produce la percolación, el cual disminuiría con el aumento del tamaño de la célula. Por lo tanto, las células pequeñas no son marcas estacionales confiables en el análisis de testigos de neviza/hielo. Por esta misma razón se eliminó las microalgas menores de 5 μm del perfil de biovolumen algal total en este estudio. Pero también podría ser que las microalgas menores a 5 μm se distribuyen a lo largo del testigo siendo depositadas por el viento durante todo el año y podrían corresponder a diferentes estados de una misma especie de microalga como: hypnozygotos, esporas, células de resistencia (cistos), cigotos, akinetes o células flageladas.

Se propone que es necesario identificar a nivel de especie los morfotipos a través de biología molecular. Una misma microalga puede tener varios morfotipos, los cuales podrían indicar algún cambio medioambiental y climático. También proponemos que los distintos estados de una misma microalga puedan indicar y corroborar la estacionalidad, debido a que quizás los distintos estados microalgales se distribuyen de manera diferente entre las estaciones de invierno y verano. Un ejemplo podría ser el morfotipo K, que corresponde a uno de los morfotipos con mayor valor de biovolumen relativo en las capas de derretimiento. Al observar su perfil este morfotipo se encuentra solo en esas capas y no en las capas de invierno. Lo que podría

explicarse si el morfotipo K corresponde al estado de célula móvil de alguna espora que se encuentra en este trabajo rotulada como un morfotipo distinto, la cual llega a través del viento y solo cuando tiene las condiciones favorables prolifera y se desarrolla transformándose en K. Lo interesante del morfotipo K es que en los primeros dos testigos interpretados corresponde a uno de los morfotipos mas importantes a nivel de biovolumen, pero está presente en el último testigo analizado, el de la estación 18 del glaciar sureste del volcán Mocho-Choshuenco. Por el contrario, el morfotipo más importante en biovolumen corresponde al A, el cual fue eliminado del perfil de biovolumen algal total por su tamaño, pero que puede indicarnos nuevamente que en ese sitio ocurrió una fuerte perturbación, motivo por el cual las células de este morfotipo se concentran al final del testigo. Consecuentemente es importarte registrar si hay diferencias entre los estados microalgales y las estaciones del año, lo cual sería una valiosa herramienta para mejorar la interpretación de los testigo de neviza/hielo.

4.6. EVALUACION DE TESTIGOS

El presente estudio se realizó para evaluar la preservación de las características biológicas, físicas y químicas en tres testigos someros en la región de Los Lagos, y luego seleccionar un sitio para obtener un testigo profundo (>50 m), que cubra idealmente un registro climático y ambiental único de un par de siglos, incorporando datos en una zona carente de información.

El sitio que definitivamente rechazamos es el que corresponde al testigo de neviza/hielo del glaciar sureste sobre estación 18 del volcán Mocho-Choshuenco, debido a la dificultad de su interpretación motivo de la extraña pérdida de microalgas, por la abundante presencia de agua en profundidad y la existencia de una capa de hielo continua bajo los 4.48 m eq. de agua.

Se propone que el sitio mejor preservado y que por lo tanto fue de más fácil interpretación, corresponde al testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Osorno. Ello a pesar que no pudimos comparar nuestros valores estimados del balance de masa neto y el de invierno con otros datos, ya que este corresponde al primer registro para este sitio. Pero aunque es el hielo con mejores señales preservadas, dentro de los 10.4 m de testigo solo tenemos una capa anual completa, más un período de acumulación de otoño-invierno y un período de verano, estos dos últimos de años distintos. Proponemos que la mejor preservación de los microorganismos y algunas especies químicas en este sitio, se debe y concuerda con su ubicación geográfica, encontrándose más al sur y a mayor altitud con respecto a los otros dos sitios. Sin embargo para obtener un registro de un par de siglos o décadas se necesitaría en el volcán Osorno un testigo de mayor profundidad que en el sitio sobre la cumbre del Volcán Mocho-Choshuenco.

Por otra parte, el sitio que corresponde al testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Mocho-Choshuenco preserva 3 capas anuales completas dentro de los 10.2 m. Los valores estimados de balance de masa neto y de invierno en este sitio son cercanos a los obtenidos por las balizas en Rivera *et al.* (2005), pero la cercanía de las distintas capas de microorganismos y la baja abundancia de polen dificultó su interpretación, la cual fue modificada en parte por fuentes químicas y físicas.

Proponemos que el sitio donde se podría recuperar un registro preservado y que posea varias décadas de registro, corresponde al sitio del testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Mocho-Choshuenco. Para ello sería interesante correlacionar datos meteorológicos con patrones de estacionalidad superficial de los microorganismos. También sería necesario conocer las variaciones estacionales de las especies químicas, ya que estas últimas aunque percolan fueron de gran ayuda para interpretar este testigo.

4.7. UTILIDAD DE LA METODOLOGIA UTILIZADA

Los resultados de este estudio indican que las microalgas, *Trinema spp* y el polen son parámetros estacionales exitosos para interpretar los testigos de neviza/hielo de glaciares temperados de latitudes medias y bajas altitudes, los cuales frecuentemente se ven afectados por fuertes perturbaciones provocadas por la percolación de la nieve derretida en la superficie, que destruye la estacionalidad del testigo. Para la mejor interpretación, datación y estimación del balance de masa de estos testigos es necesario tener la mayor cantidad de herramientas o fuentes que nos proporcionen información para mejorar la confiabilidad del testigo. Este estudio está basado en el análisis biológico pero es corroborado con las propiedades físicas y análisis químico, método denominando multi*proxy*.

Este tipo de metodología permitió para el volcán Mocho-Choshuenco obtener balances de masas similares a los obtenidos anteriormente con balizas. Lo cual sugiere que es posible utilizar la metodología de este estudio para reconstruir el balance de masa pasado incluso en este tipo de glaciares.

Mientras más herramientas se tengan para interpretar y obtener las variaciones estacionales de la estratigrafía del glaciar, nuestra interpretación será más cercana a la realidad. No obstante, debemos tener presente que en un sitio que posea balances de masa negativos, esta metodología basada en el análisis biológico se vuelve mucho más compleja y menos confiable debido a que las capas con microorganismos pueden sobreponerse año tras año, no preservando la capa que les corresponde.

Para mejorar este método multi*proxy*, es necesario desarrollar nuevas técnicas de identificación y cuantificación más rápidas, precisas y representativas del sitio. Se necesitan ampliar los registros de este método en más glaciares alrededor del mundo y en los glaciares ya

estudiados, para poder interpretar los patrones estacionales de microalgas, polen, *Trinema spp* y otros microorganismos. Estos podrían entregarnos información al correlacionarlos con condiciones climáticas y medioambientales. De acuerdo con Yoshimura *et al.* (1997), Takeuchi *et al.* (1998) y Takeuchi (2001),la composición de especies y el biovolumen de las microalgas sobre los glaciares estudiados cambia con la altitud, reflejando los cambios de las condiciones medioambientales.

También son imperiosos más estudios de ciclos de vida de microalgas, identificación molecular de microalgas, los procesos de post-depositación y ecología de los microorganismos.

Algo bastante importante es el conocimiento de la fenología de los tipos de polen o quizás más específicamente conocer los períodos de floración de éstos y las variaciones que sufre este período con la altitud, como también saber su distribución en la superficie del glaciar y la concentración de granos de polen, para utilizar de mejor manera esta herramienta ya que en este estudio no se pudo utilizar con total confiabilidad, motivo de la baja abundancia que presentaron.

Capitulo 5

CONCLUSIONES Y PROYECCIONES

- En los testigos de neviza/hielo en la Región de los Lagos los ciclos estacionales y anuales se encuentran mejor preservados en el biovolumen algal, concentración de polen y abundancia de *Trinema spp*, que en el isótopo δD y especies químicas, considerando la percolación del agua de la nieve derretida sobre la superficie en los sitios de perforación.
- La densidad de polen y *Trinema spp*, este último considerado como nueva herramienta para la interpretación climática y ambiental de estos sitios, son exitosos marcadores estacionales y anuales para la reconstrucción de balance de masa, que apoyan y mejoran la confiabilidad del análisis biológico con biovolumen algal en los sitios de perforación. Sugerimos su uso en la datación de testigos de neviza/hielo y estimación de balances de masa pasados.
- Las microalgas < 5μm se distribuyen homogéneamente a lo largo de los testigos.
- Los ciclos estacionales de Deuterio se ven preservados solo hasta la estación de derretimiento previa, bajo ella se puede observar relevante perturbación por percolación de agua. El perfil de Deuterio es una herramienta útil para identificar la zona percolada, en conjunto con las propiedades físicas tal como porcentajes de capa de hielo y densidad.
- Sugerimos que la contribución marina es importante en los dos primeros sitios interpretados en este estudio, vale decir las cumbres de los volcanes Osorno y Mocho-Choshuenco. Esto puede ser explicado por la proximidad de los sitios con el Océano Pacifico (~90 km). Ello refleja las características del transporte atmosférico para estos sitios, importante información al momento de comparar y relacionar nuestros datos con el modelamiento de las condiciones meteorológicas actuales.

- El método multi*proxy* basado en el análisis biológico de diversos parámetros permite obtener una resolución estacional y anual, para luego reconstruir el balance de masa anual pasado en los tres sitios de este estudio que corresponden a glaciares temperados.
- La interpretación del testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Osorno, nos indica una capa anual de registro. Se estimó un balance de masa neto entre otoño del 2004/2005 y el período de acumulación del 2005. Se sugiere que este sitio preserva el Cl^-, Na^+, K^+ y SO_4^{2-} durante la estación de invierno.
- La interpretación del testigo de neviza/hielo del glaciar de la cumbre del volcán Mocho-Choshuenco nos señala tres capas anuales completas. Se estimó el balance de masa neto para 2002/2003 - 2003/2004 y 2004/2005, y el balance de masa de invierno (2005). Los valores son muy cercanos a los obtenidos por balizas para el 2003/2004 en un sitio próximo (Rivera *et al.* 2005, 0.9 m eq a. año^{-1}).
- La interpretación del testigo de neviza/hielo sobre la estación 18 del glaciar sureste del volcán Mocho-Choshuenco, indica solo el último período de acumulación (2005), obteniendo el balance de masa de invierno, el cual es muy similar al estimado a través de balizas en el estudio de Rivera *et al.* (2005).
- Estos microorganismos son potencialmente buenos marcadores medioambientales (bioindicadores), y paleoclimáticos para análisis de testigos de neviza/hielo, y deberían utilizarse en combinación con parámetros físicos, químicos e isotópicos.
- El conocimiento de la variabilidad del clima pasado es crucial para el entendimiento y modelamiento activo de las futuras tendencias climáticas. Las incertezas solo se reducirán a través de la expansión de registros climáticos alrededor del mundo y su obtención a partir de diversos *proxy* (Jones *et al.*, 2001). Los cambios en el balance de masa glaciar están

acompañados de cambios en la masa oceánica y en ese sentido la gran mayoría de los glaciares de la región de los Lagos han retrocedido y encogido durante las recientes décadas (Rivera *et al.,* 2002). Las consecuencias globales de la pérdida de superficie, adelgazamiento y retroceso de los glaciares, pueden ser analizada desde el punto de vista del aporte al aumento del nivel del mar, donde se estima que los glaciares de Chile podrían aportar cerca del 10% del total aportado por los glaciares de montaña del planeta (Rivera *et al.,* 2000). Consecuentemente la continuidad de los estudios multi*proxy* basados en el análisis biológico en glaciares temperados de latitudes medias contribuirá a precisar los cambios climáticos presentes y pasados, incluyendo el balance de masa, y asimismo proveer datos para calibrar modelos de predicciones futuras. Proponemos que esta metodología corresponde a una útil herramienta de datación y caracterización estratigráfica para sitios que sufren fuertes perturbaciones debido a la percolación de agua.

LITERATURA CITADA

Barnes, P., Wolff, E., Mader, H., Udisti, R., Castellano, E., and Röthlisberger, R. (2003) Evolution of chemical peak shapes in the Dome C, Antarctica, ice-core. *Journal of Geophysical Research*, 108, D3, 17-1; 17-14.

Bérzins, B. and Stensdotter, U. (1990) Ecological studies of freshwater rhizopods. *Hidrobiologia*, 202, 1-11.

Beyens, L., Chardez, D., De Baere, D., and Verbruggen, C. (1995) The aquatic testate amoebae fauna of the Stromness Bay area, South Georgia. *Antarctic Science*, 7, 1, 3-8.

Beyens, L., Chardez, D., and De Landtsheer, R. (1986) Testate Amoebae populations from moss and lichen habitats in the Artic. *Polar Biology*, 5, 165-173.

Bobrov, A., Andreev, A., Schirmeister, L., and Siegert, C. (2004) Testate amoebae (Protozoa: Testacealobosea and Testaceafilosea) as bioindicators in the Late Quaternary deposits of the Bykovsky Peninsula, Laptev Sea, Russia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 209, 165-181.

Bobrov, A., and Mazei, Y. (2004) Morphological variability of testate amoebae (Rhizoda: Testacealobosea: Testaceafilosea) in natural populations. *Acta Protozoologica*, 43, 133-146.

Bourgeoi, J., Koerner, R., Gajewski, K., and Fisher, D. (2000) A Holocene ice-core pollen record from Ellesmere Island, Nunavut, Canada. *Quaternary Research*, 54, 275-283.

Bown, F., and Rivera, A. (en prensa) Climate changes and glacier responses during recent decades in the Chilean Lake District. *Global and Planetary Change.*

Bradley, R. (1999): Paleoclimatology: reconstructing climates of the Quaternary. Harcourt. Academic Press, San Diego, 610 pp.

Bradley, R. (2000). Past global changes and their significance for the future. *Quaternary Sciance Reviews*, 19, 391-402.

Braithwaite, R. (2002) Glacier mass balance: the first 50 years of international monitoring. *Progress in Physical Geography*, 26, 1, 76-95.

Davies, T., Vincent, C., and Brimblecombe, P. (1982) Preferential elution of strong acids from a Norwegian ice cap. *Nature*, 300, 5888, 161-163.

Decloitre, L. (1981) Le genre Trinema Dujardin, 1841. Révision à jour au 31 décembre 1979. *Arch Protistenkd*, 124, 193-218.

Eichler, A., Schwikowski, M., Gäggeler, H., Furrer, V., Synal, H., Beer, J., Saurer, M., and Funk, M. (2000) Glaciochemical dating of an ice core from the upper Grenzgletscher (4200 m a.s.l.) *Journal of Glaciology*, 46, 507-515.

Eichler, A., Schwikowski, M., and Gäggeler, H. (2001) Meltwater-induced relocation of chemical species in Alpine firn. *Tellus*, 53B, 192-203.

Eichler, A., Schwikowski, M., Furger, M., Schotterer, U., and Gäggeler, H. (2004) Sources and distribution of trace species in Alpine precipitation inferred from two 60-year ice core paleorecords. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 4, 71-108.

EPICA (2004) Eight glacial cycles from an Antarctic ice-core. *Nature*, 429, 6992, 623-628.

Escobar, F., Casassa, G., and Pozo, V. (1995) Variaciones de un glaciar de montaña en los Andes de Chile central en las últimas dos décadas. *Bull. Inst. Fr. Etudes Andines*, 24, 3, 683-695.

Finlayson-Pitts, B., and Pitts, J. (2000) Chemistry of the upper and lower atmosphere. *Academic Press*, San Diego. 969 pp.

Ginot, P., Kull, C., Schwikowski, M., Schotterer, and Gäggeler, H. (2001) Effects of postdepositional processes on snow composition of subtropical glacier (Cerro Tapado, Chilean Andes). *Journal of Geophysical Research,* 106, D23, 32,375-32,386.

Ginot, P., Schwikowski, M., Brütsch, S., Gäggeler, H., Schotterer, U., Kull, C., Funk, M., Rivera, A., Stampfli, F., and Stichler, W. (2002 a) First results of a paleoatmospheric chemistry and climate study of Cerro Tapado glacier, Chile. *The Patagonian Icefields: A Unique Natural Laboratory for Environmental and Climate Change Studies.* Series of the Centro de Estudios Científicos. Academic/Plenum Publishers. New York, NY, USA. 157-167.

Ginot, P., Schwikowski, M., Schotterer, Stichler, W., U., Gäggeler, H., Francou, B., Gallaire, R., and Pouyaud, B. (2002 b) Potential for climate variability reconstruction from Andean glaciochemical records. *Annals of Glaciology*, 35, 443-450.

Haeberli, W., and Beniston, M. (1998) Climate Change and Its Impacts on Glaciers and Permafrost in the Alps. *Ambio*, 27, 4, 258-265.

Hoham, R., and Duval, B. (2001) Microbial ecology of snow and freshwater ice. *Snow Ecology*. Cambridge University Press: Cambridge; 168-228.

Heusser, C. (1971) Pollen and Spores of Chile: Modern Types of the Pteridophyta, Gymnospermae, and Angiospermae. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona. 167 pp.

IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T.,Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K.Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.

Jones, P., Osborn, T., and Briffa, K. (2001). Paleoclimate review: The evolution of climate over the last millennium. *Science*, 292, 5517, 662-667.

Kääb, A., Chiarle, M., Raup, B., and Schneider, C. (2006) Climate change impacts on mountain glaciers and permafrost. *Global and Planetary Change*. En prensa.

Keene, W., Pszenny, A., Galloway, J., and Hawley, M. (1986). Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation. *Journal Geophysical Research*, 91, D6, 6647-6658.

Kohshima, S. (1984) A novel cold-tolerant insect found in a Himalayan glacier. *Nature,* 310, 5974, 225-227.

Kohshima, S. (1987) Glacial biology and biotic communities. In Kawano, S., Connell, J., and Hidaka, T. (eds), *Evolution and coadaptacion biotic communities*. Kyoto: Facultad of Science, Kyoto University, 77-92.

Kohshima, S., Seko, K., and Yoshimura, Y. (1993) Biotic acceleration of glacier melting in Yala Glacier, Langtang region, Nepal Himalaya. *Snow and Glacier Hydrology* (Proceeding of the Kathumandu Symposium, 1992), IAHS Publication 218, 309-316.

Kohshima, S., Yoshimura, Y., and Takeuchi, N. (2002) Glacier ecosystem and biological ice-core analysis. *The Patagonian Icefields: A Unique Natural Laboratory for Environmental and Climate Change Studies.* Series of the Centro de Estudios Científicos. Academic/Plenum Publishers. New York, NY, USA. 1-8.

Kohshima, S., Takeuchi, N., Uetake J., Shiraiwa T., Uemura R., Yoshida N., Matoba S., and Godoi M. (2006) Estimation of net accumulation rate at a Patagonian glacier by ice core analyses using snow algae. *Global and Planetary Change*. En prensa.

Kudo, R. (1969) Protozoología. Compañia Editorial Continental, S.A., Mexico. 905 pp.

Liu, K., Yao, Z., and Thompson, L. (1998) A pollen record of Holocene climatic changes from the Dunde ice cap, Qinghai-Tibetan Plateau. *Geology*,. 26, 2, 135-138.

Lliboutry, L. (1956). Nieves y glaciares de Chile: Fundamentos de glaciología. Ediciones de la Universidad de Chile. Santiago, Chile, 471 pp.

Lorius, C., Jouzel, J., Raymaud, D., Hansen, J., and Le Treut, H. (1990). The ice-core record: climate sensitivity and future greenhouse warming. *Nature*, 347, 139-145.

Mattheeussen, R., Ledeganck, P., Vincke, S., Van de Vijver, B., Nijs, I., and Beyens, L. Habitat selection of aquatic testate amoebae communities on Qeqertarsuaq (Disko Island), West Greenland. *Acta Protozoologica*, 44, 253-263.

McManus, J. (2004) A great grand-daddy of ice cores. *Nature*, 429, 611-612.

Nakazawa, F., Fujita, K., Takeuchi, N., Fujiki, T., Uetake, J., Aizen, V., and Nakawo, M. (2005) Dating of seasonal snow/firn accumulation layers using pollen analysis. *Journal of Glaciology*, 51, 174, 483-490.

Nakazawa, F., Fujita, K., Uetake, J., Kohno, M., Fujiki, T., Arkhipov, S., Kameda, T., Suzuki, K., and Fujii, Y. (2004) Application of pollen analysis to dating of ice-cores from lower-latitude glaciers. *Jounal of Geophysical Research*, 109, F04001.

Oerlemans, J. (2005). Extracting a climate signal from 169 glacier records. *Science*, 308, 5722, 675-677.

Olivier, S., Schwikowski, M., Brütsch, S., Eyrikh, S., Gäggeler, H., Lüthi, M., Papina, T., Saurer, M., Schotterer, U., Tobler, L., and Vogel, E. (2003) Glaciochemical investigation of ice-core from Belukha glacier, Siberian Altai. *Geophysical research letters* 30, 19.

Overpeck, J., Otto-Bliesner, B., Miller, G., Muhs, D., Alley, R., and Kiehl, J. (2006) Paleoclimatic evidence for future ice-sheet instability and rapid sea-level rise. *Science*, 311, 5768, 1747-1750.

Oyarzún, C., Godoy, R., Leiva, S. (2002) Depositación atmosférica de nitrógeno en un transecto valle longitudinal-cordillera de los Andes, centro-sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 75, 233-243.

Parra, O., Gonzalez, M., and Dellarossa, V. (1983) Manual Taxonómico de Fitoplancton de aguas continentales, V.- Chlorophyceae. Editorial Universidad de Concepción, Concepción. 151 pp.

Paterson, W. (1994) The Physics of Glaciers. (3º Edición) Elsevier Science Inc., New York, USA, 480 pp.

Patterson, T., and Kumar, A. (2002) A review of current testate rhizopod (Thecamoebian) research in Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 180, 225-251.

Reese, C., and Liu, K. (2005) Interannual variability in pollen dispersal and deposition on the Tropical Quelcaya ice cap. *The Professional Geographer*, 57, 2, 185-197.

Reese, C., Liu, K., and Mountain, H. (2003) Pollen dispersal and deposition on the ice cap of Volcán Parinacota, Southwestern Bolivia. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research,* 35, 4, 469-474.

Rivera, A., Casassa, G., Acuña, C., y Lange, H. (2000) Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Investigación geográfica Chile*, 34, 29-60.

Rivera, A., Bown, F., Casassa, G., Acuña, C., and Clavero, J. (2005) Glacier shrinkage and negative mass balance in the Chilean Lake District (40°S). *Hydrological Sciences Journal*, 50, 6, 963-974.

Rivera, A., Acuña, C., Casassa, G., and Bown, F. (2002) Use of remotely-sensed and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to eustatic sea-level rise. *Annals of Glaciology*, 34, 355-362.

Riveros, M., Perez, M., Baez, P., y Baez, A. (2003) Cinética mensual de parámetros químicos en la fase de prefloración en especies del género *Nothofagus*. *Bosque*, 24, 3, 85-95.

Schotterer, U., Froehlich, K., Gäggeler, W., Sandjordj, S., and Stichler, W. Isotope records from Mongolian and Alpine ice-cores as climatic indicators. *Climatic Change,* 36, 3-4, 519-530.

Schwikowski, M., Döcher, A., Gäggeler, H., and Schotterer, U. (1999 a) Anthropogenic versus natural sources of atmospheric sulphate from an Alpine ice core. *Tellus*, 51B, 938-951.

Schwikowski, M., Brütsch, S., Gäggeler, H., and Schotterer, U. (1999 b) A high-resolution air chemistry record from an Alpine ice-core: Fiescherhorn glacier, Swiss Alps. *Journal of geophysical research*, 104, D11, 13709-13719.

Schwikowski, M., Brütsch, S., Casassa, G., and Rivera, A. (2006) A potential high-elevation ice-core site at Hielo Patagónico Sur. *Annals of Glaciology*, 43, 8-13.

Segawa, T., Miyamoto, K., Ushida, K., Agata, K., Okada, N., and Kohshima, S. (2005) Seasonal Change in Bacterial Flora and Biomass in Mountain Snow from the Tateyama Mountains, Japan, Analyzed by 16S rRNA Gene Sequencing and Real-Time PCR. *Applied and Environmental Microbiology*, 71, 1, 123-130.

Shiraiwa, T., Kohshima, S., Uemura, R., Yoshida, N., Matoba, S., Uetake, J., and Godoi, M. (2002) High net accumulation rates at Campo de Hielo Patagonico Sur, South America, revealed by analysis of a 45.97 m long ice-core. *Annals of Glaciology*, 35, 84-90.

Takeuchi, N., Kohshima, S., and Fujita, K. (1998). Snow algae community on a Himalayan glacier, Glacier AX010 East Nepal: Relationship with glacier summer mass balance. *Bulletin of Glacier Research*, 16, 43-50.

Takeuchi, N. (2001). The altitudinal distribution of snow algae on an Alaska glacier (Gulkana Glacier in the Alaska Range). *Hydrological Processes*, 15, 3447-3459.

Takeuchi, N., and Kohshima, S. (2004). A snow algal community on Tyndall Glacier in the Southern Patagonia Icefield, Chile. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36, 1, 92-99.

Takeuchi, N., Kohshima, S., and Seko, K. (2001) Structure, formation, and darkening process of albedo-reducing material (cryoconite) on a Himalayan Glacier: a granular algal mat growing on the glacier. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 33, 2, 115-122.

Thomas, H., and Duval, B. (1995) Sierra Nevada, California, U.S.A., snow algae: snow albeo changes, algal-bacterial interrelationships, and ultraviolet radiation effects. *Artic and Alpine Research*, 27, 389-399.

Thompson, L., Thompson-Mosley, E., Davis, M., Lin, P., Henderson, K. and Mashiotta, T. (2003) Tropical glacier and ice core evidence of climate change on annual to millennial times scales. *Climatic Change*, 59, 137-155.

Thompson, L., Thompson-Mosley, E., and Henderson, K. (2000) Ice-core palaeoclimate records in tropical South America since the Last Glacial Maximum *Journal of Quaternary Science*, 15, 4, 377–394.

Thompson, L., Yao, T., Davis, M., Henderson, K., Mosley-Thompson, E., Lin, P., Beer, J., Synal, H., Cole-Dai, J., and Bolzan, J. (1997) Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Quinghai-Tibetan ice-core, *Science*, 276, 1821-1825.

Trappeniers, K., van Kerckvoorde, A., Chardez, D., Nijs, I., and Beyens, L. (1999) Ecology of testate amoebae communities from aquatic habitats in Zackenberg area (Northeast Greenland). *Polar Biology*, 22, 271-278.

Uetake, J., Kohshima, S., Nakazawa, F., Suzuki, K., Kohno, M., Kameda, T., Arkhipov, S., and Fujii, Y. (2006) Biological ice-core analysis of the Sofiyskiy Glacier in the Russian Altai. *Annals of Glaciology*, 43, 70-78.

Van den Hoek, C., Mann, D., and Jahns, H. (1998) Algae: An introduction to phycology. Cambridge University Press, 627 pp.

Vincke, S., Ledeganck, P., Beyens, L., and Van de Vijver, B. (2004 a) Soil testate amoebae from sub-Antarctic Île Crozet. *Antarctic Science*, 16, 2, 165-174

Vincke, S., Beyens, L., and Van de Vijver, B. (2004 b) Freshwater Testate Amoebae Communities from Île de la Possession, (Crozet Archipelago, Subantarctica). *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36, 4, 584-590.

Vincke, S., Gremmen, N., Beyens, L., and Van de Vijver, B. (2004 c) The moss dwelling testacean fauna of Ile de la Possession. *Polar Biology*, 27, 753-766.

Watanabe, O., Kamiyama, K., Motoyama, H., Fujii, Y., Igarashi, M., Furukawa, T., Goto-Azuma, K., Saito, T., Kanamori, S., Kanamori, N., Yoshida, N., and Uemura, R. (2003) General tendencies of stable isotopes and major chemical constituents of the Dome Fuji deep ice-core. *Memoirs National Institute of Polar Research*, 57, 1-24.

Yoshimura, Y., Kohshima, S., and Ohtani. (1997) A community of snow algae on a Himalayan glacier: change of algal biomass and community structure with altitude. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 29, 1, 126-137.

Yoshimura, Y., Kohshima, S., Takeuchi, N., Seko, K., and Fujita K. (2000) Himalayan ice-core dating with snow algae. *Journal of Glaciology*, 46, 153, 335-340.

Zapata, J. (2006) Estado de conocimiento de los Tecamebianos dulceacuícolas de Chile. *Gayana*, 70, 1, 27-30.